



AVALIAÇÃO DE ESCALA DE MONITORAMENTO E DO COMPORTAMENTO
HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO PIABANHA/RJ

Claudia Daza Andrade

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: José Paulo Soares de Azevedo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

AVALIAÇÃO DE ESCALA DE MONITORAMENTO E DO COMPORTAMENTO
HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO PIABANHA/RJ

Claudia Daza Andrade

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

Prof. Leonardo Duarte Batista da Silva, D.Sc.

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, Ph.D.

Dr. José Otávio Goulart Pecly, D.Sc.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2016

Andrade, Claudia Daza

Avaliação de escala de monitoramento e do comportamento hidrológico na bacia do rio Piabanha/RJ/ Claudia Daza Andrade. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 184 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: José Paulo Soares de Azevedo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 163-178.

1. Avaliação hidrológica. 2. Bacia do rio Piabanha. 3. Análise pluviométrica. 4. Modelagem hidrológica. 5. Modelo HEC-HMS/SMA. I. Azevedo, José Paulo Soares de II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A mi familia, que representa el pilar de mis metas

“La vida es un océano insondable en el cual navegamos”

“No está en ningún mapa los lugares verdaderos nunca lo están”

Herman Melville (1851)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos na minha caminhada pela vida e por ter me acompanhado sempre.

A minha família pelo amor, carinho, apoio e incentivo sempre apesar da distância.

Ao meu orientador, professor José Paulo, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À CAPES pela bolsa concedida, que viabilizou a realização deste estudo.

À UFRRJ pelo apoio e tempo concedido para o término do doutorado.

Ao pessoal do laboratório de hidrologia e hidráulica do programa de Engenharia Civil da UFRJ, pelo apoio e ajuda em todos os momentos necessários, obrigada pela amizade e parceria.

Às instituições e órgãos que disponibilizaram os dados para o desenvolvimento deste trabalho, CPRM, INEA, CEMADEN, UFRJ.

Aos Professores membros da banca, por aceitarem fazer parte da avaliação da tese de doutorado e por todas as contribuições feitas.

A todos os professores que de alguma maneira contribuíram nesta caminhada, agradeço pelo tempo que me brindaram nos momentos que precisei, professores de várias universidades do Brasil e de outros países, que ainda com a correria do dia a dia, cumprem com o trabalho de transmitir o ensino, mesmo que, para pessoas desconhecidas por meio de e-mails trocados. Tive a oportunidade de vivenciar isto com pessoas que não conheci pessoalmente, porém se prontificaram sempre para ajudar no desenvolvimento deste estudo.

Ao meu amigo e namorado Moisés que me incentivou nos momentos mais difíceis e de estresse, obrigada pela paciência, pelo carinho e por estar do meu lado.

Um agradecimento especial aos meus amigos e colegas que foram essenciais nesta caminhada, pela ajuda, pelos conselhos recebidos e pelo incentivo; Vinicius, Anne, Tatiana, Bárbara, Irene, Marta O., Marta R., Caroline, Bianca, Rafael, Fabricio, Jardel, Marcos, Danielle, Camilla, Leo, Riane, Leandro, Sérgio, Clea, Adriana, Vanessa, Sarah, Lígia, Bete, Jerson, Paulo Vitor, Fernanda, Monique, Juliana, João, Bianca, Vitor, Conan, Juciara, Jhonatan, Ingrid, José Carlos, Wagner, e Thiago.

Agradeço especialmente ao professor Francisco que me incentivou na tomada de decisões relacionadas à parte da modelagem nesta pesquisa.

A todos os meus amigos e colegas que de alguma maneira contribuíram e fizeram parte deste trabalho, a lista é enorme, agradeço de coração pelo apoio e pela amizade, por ter me recebido de braços abertos tornando-se a minha família Brasileira. A todos muito Obrigada!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DE ESCALA DE MONITORAMENTO E DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO PIABANHA/RJ

Claudia Daza Andrade

Dezembro/2016

Orientador: José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Engenharia Civil

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica envolve a integração de diversos processos que se manifestam com grande variabilidade espacial e temporal, exigindo dados de diferentes variáveis hidrometeorológicas compatíveis com a escala de atuação desses processos. Esta tese visa avaliar se a escala de medições de variáveis consideradas no monitoramento hidrológico convencional existente na bacia, como a altura de chuva e vazão, é adequada para um prognóstico confiável da resposta, em termos de vazões, de uma bacia que apresenta tempo de concentração sub-diário. A bacia do rio Piabanha está associada a chuvas intensas que ocasionam enchentes frequentes e aumentam a sua vulnerabilidade pela combinação de suas características de relevo íngreme, de solos pouco espessos e alta densidade demográfica. Nesse sentido, para verificar se é necessário um monitoramento hidrológico mais refinado, principalmente nos estudos de quantificação de vazões, foi aplicado um modelo hidrológico para simular o processo de chuva-vazão, com medições de chuvas tanto diárias quanto horárias, levando em consideração características físicas. Cabe destacar que na bacia do rio Piabanha, os modelos até então utilizados para quantificar vazões empregaram dados em escala de medição diária, sendo este um dos primeiros trabalhos que abordará uma escala temporal horária para tal representação. No que se refere à precipitação, foi feito um estudo do comportamento pluviométrico na região por meio de técnicas de agrupamento de dados (método de Ward), assim como, uma caracterização morfológica da bacia com o intuito de melhor entender a dinâmica dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. O modelo empregado foi o *HEC-HMS* com a metodologia de cálculo de volumes de vazões para processos contínuos usando o algoritmo do *SMA (Soil Moisture Accounting)*. Os resultados obtidos mostraram claramente, uma melhoria da aproximação da realidade, nos hidrogramas observados, fato que reforça a necessidade de se contar com uma rede de monitoramento em escala sub-diária como suporte ao planejamento e gestão de recursos hídricos na bacia do rio Piabanha.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF THE MONITORING SCALE AND THE HYDROLOGICAL
BEHAVIOUR IN THE PIABANHA RIVER BASIN/ RJ

Claudia Daza Andrade

December/2016

Advisor: José Paulo Soares de Azevedo

Department: Civil Engineering

The hydrological behaviour of a basin encompasses the integration of several processes which take place involving a wide spatial and temporal variability, requiring data of different hydrometeorological variables that are compatible with the scale of these processes. This thesis aims to assess whether the scale of measurement of variables considered in standard hydrological monitoring, such as precipitation and flow, is adequate for a reliable forecast of the response in terms of the flows for a basin which exhibits a subdaily concentration time. The Piabanha River watershed is associated with heavy rains which cause frequent floods and increase its vulnerability due to a combination of its characteristics of steep terrain, high population density, and shallow soils. In this regard, in order to verify if a more refined hydrological monitoring is necessary, especially in the studies of flow quantification, this work applied a hydrological model to simulate the rainfall-flow process with both daily and hourly rainfall measurements, taking into account local physical characteristics. It should be pointed out that in the Piabanha watershed, the models previously used to quantify flows adopted data measured on a daily measurement scale, and this is one of the first studies that will address a smaller temporal scale for this representation. As for the precipitation, a study of the pluviometric behaviour in the region was carried out using data mining techniques (Ward's method), as well as a morphological characterization of the basin in order to better understand the dynamics of the processes involved in the hydrological cycle. The model adopted for this study was HEC-HMS with the methodology of calculation of flow volumes for continuous processes with the SMA algorithm (Soil Moisture Accounting). Results obtained clearly show a closer match between model predictions and data from actual hydrographs and justify the need for a better monitoring network in order to support the water resources management in the Piabanha River Basin, particularly in implementing methods of subdaily measurement scales.

Resumen de Tesis presentada a la COPPE/UFRJ como parte de los requisitos necesarios para la obtención del grado de Doctor en Ciencias (D.Sc.)

EVALUACIÓN DE LA ESCALA DEL MONITOREO Y DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA BACIA DEL RIO PIABANHA/RJ

Claudia Daza Andrade

Diciembre/2016

Orientador: José Paulo Soares de Azevedo

Programa: Ingeniería Civil

El comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica implica la integración de diversos procesos que se manifiestan con gran variabilidad espacial y temporal, exigiendo datos de diferentes variables hidrometeorológicas compatibles con la escala de actuación de estos procesos. Esta tesis tiene como objetivo evaluar si la escala de medición de variables, consideradas en el monitoreo hidrológico convencional existente en la cuenca, como altura de lluvia y caudal, es adecuada para un pronóstico confiable de respuesta, en términos de caudales, de una cuenca que presenta un tiempo de concentración sub-diario. La cuenca del río Piabanha está asociada a lluvias intensas que ocasionan inundaciones y aumentan su vulnerabilidad por la combinación de sus características de relieve escarpado, suelos poco espesos y alta densidad demográfica. En este sentido, para verificar si es necesario un monitoreo hidrológico más refinado, principalmente en los estudios de cuantificación de caudales, fue aplicado un modelo hidrológico para simular el proceso de lluvia-escorrentía, con mediciones de lluvias tanto diarias como horarias, llevando en consideración características físicas. Cabe señalar que en la cuenca del río Piabanha, los modelos hasta ahora utilizados, emplearon datos en escala de medición diaria, siendo este uno de los primeros trabajos que abordará una escala temporal horaria. Con respecto a la precipitación, fue realizado un estudio de comportamiento pluviométrico mediante el uso de técnicas de agrupamiento de datos (método de Ward) y una caracterización morfológica de la cuenca con el fin de comprender mejor la dinámica de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico. El modelo utilizado fue el HEC-HMS, con la metodología para procesos continuos que usa el algoritmo SMA (Soil Moisture Accounting). Los resultados obtenidos mostraron claramente, una mayor aproximación de la realidad en los hidrogramas observados, lo que refuerza la necesidad de contar con una red de monitoreo con medición sub-diaria como soporte a la planificación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Piabanha.

SUMARIO

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO DA TESE	3
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL	7
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.4 ESTRUTURA DO TEXTO	8
CAPITULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 INCERTEZAS NO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	10
2.3 FATORES DA ESCALA	11
2.4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA	13
2.5 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	15
2.6 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	18
2.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	22
2.7.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	25
2.7.2 MODELOS CHUVA - VAZÃO.....	28
2.8 MODELO HEC-HMS	31
2.8.1 MODELOS INCORPORADOS NO HEC-HMS	33
2.8.2 COMPONENTES DO HEC-HMS.....	34
2.8.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO	36
2.8.4 APLICAÇÕES DO MODELO HEC-HMS.....	39
CAPITULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
3.1 ASPECTOS GERAIS E LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO PIABANHA.....	44
3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA.....	46
3.2.1 HIDROGRAFIA DA BACIA	46
3.2.2 GEOMORFOLOGIA.....	48
3.2.3 CLIMA.....	50
3.2.4 VEGETAÇÃO	51
3.2.5 USO DO SOLO E OCUPAÇÃO DA BACIA	54
3.3 ESTUDOS REALIZADOS NA ÁREA DA PESQUISA	57
CAPITULO 4 - METODOLOGIA.....	65
4.1 METODOLOGIA A SER APLICADA	65
4.2 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES SOBRE A BACIA DO RIO PIABANHA.....	65
4.2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO.....	66

4.2.2 LEVANTAMENTO DA BASE DE DADOS	68
4.3 ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS E O PROCESSO DE SELEÇÃO.....	69
4.3.1 DADOS HIDROLÓGICOS.....	69
4.3.2 DADOS CARTOGRÁFICOS E MAPAS TEMÁTICOS	72
4.4 ANÁLISE DOS DADOS HIDROLÓGICOS	73
4.5 DETERMINAÇÃO DE REGIÕES PLUVIOMETRICAMENTE HOMOGÊNEAS	75
4.5.1 MÉTODO DE AGRUPAMENTO DE DADOS WARD	76
4.6 PROCESSAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS PARA ENTRADA DO MODELO.	78
4.6.1 FERRAMENTA HEC-GEO-HMS.....	79
4.7 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA	83
4.7.1 CARACTERÍSTICAS DO RELEVO	84
4.7.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	85
4.8 APLICAÇÃO DO MODELO CHUVA – VAZÃO HEC-HMS	87
4.8.1 ÁREA DA MODELAGEM E PERÍODOS ESCOLHIDOS	88
4.8.2 DADOS DE ENTRADA	89
4.8.3 PARÂMETROS DO MODELO	90
4.8.4 SIMULAÇÃO DO MODELO HEC-HMS	107
4.8.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM	108
CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5.1. CAMPANHAS DE CAMPO.....	111
5.2. ESCOLHA DA BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS DA BACIA DO PIABANHA.....	121
5.2.1. ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS.....	122
5.2.2. ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	126
5.3. ANÁLISE DOS DADOS HIDROLÓGICOS – REGIME DE CHUVAS E VAZÕES	128
5.4. DETERMINAÇÃO DE REGIÕES PLUVIOMETRICAMENTE HOMOGÊNEAS NA BACIA DO RIO PIABANHA	135
5.5. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA.....	139
5.5.1. ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	139
5.5.2. DECLIVIDADE E PERFIL DO RIO	140
5.6. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-HMS	141
5.6.1. MODELAGEM DIÁRIA COM DADOS DIÁRIOS	141
5.6.2. MODELAGEM DIÁRIA COM DADOS HORÁRIOS	150
5.6.3. MODELAGEM HORARIA COM DADOS HORÁRIOS	154
5.6.4. MODELAGEM HORARIA COM DADOS HORÁRIOS COM ESTAÇÕES ESCOLHIDAS PELO MÉTODO DE AGRUPAMENTO DE DADOS WARD.....	157
CAPITULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	160
6.1 CONCLUSÕES.....	160
6.2 RECOMENDAÇÕES	161

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	163
APÉNDICE I	179
ANEXO 1	183

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A gestão sustentável dos recursos hídricos (incluindo o fornecimento de fontes seguras e confiáveis de água potável, irrigação, saneamento adequado, proteção dos ecossistemas e proteção contra inundações) coloca enormes desafios em muitas partes do mundo. Apesar da abundância global e o caráter essencial de recurso renovável, estima-se que 20% da população mundial viva em condições de escassez de água (FAO, 2015). Esta situação configura-se em função do resultado da distribuição heterogênea de água doce no espaço e no tempo, o que é agravado pelo incremento da população no mundo, por disparidades econômicas, conflitos entre países e cidades que compartilham recursos hídricos (OELKERS, HERING, ZHU, 2011; AYERS, 2011; HERING e INGOLD, 2012)

Por outro lado, o desenvolvimento econômico de um país está intimamente relacionado com a gestão sustentável dos recursos hídricos, pois o mesmo é influenciado pelo abastecimento de água, pela geração de energia elétrica, pela produção de alimentos, pelo lazer e pela extração de minerais. Nesse contexto, poder-se-ia afirmar que, para uma gestão adequada, o conhecimento da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica é de grande importância podendo, desta maneira, permitir planejamentos e evitar conflitos pelo uso da água entre os diferentes usuários.

A disponibilidade dos recursos hídricos é representada pelas vazões médias e mínimas da bacia hidrográfica, sendo que a vazão média é a maior vazão a ser regularizada no curso de água, sendo caracterizada como a máxima disponibilidade hídrica de uma bacia. O conhecimento desta vazão permite avaliar o limite do uso da água de um manancial para diferentes finalidades (TUCCI, 2002).

As vazões mínimas merecem especial atenção em estudos de disponibilidade hídrica, pois é nos períodos de ocorrência destas vazões, que a disponibilidade de água é considerada crítica para atender todas as demandas, principalmente nos rios que preservam as condições naturais, ou seja, que não possuem reservatórios de acumulação (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

Na quantificação de vazões, a ausência de dados suficientemente precisos na área de estudo pode influenciar de forma negativa esta estimativa, tanto subestimando quanto superestimando vazões. Dessa maneira, estudos amplos e detalhados do

impacto das chuvas, dos solos, da cobertura vegetal e do uso da terra são de grande importância para a determinação dessas vazões.

O monitoramento hidrológico nas bacias hidrográficas é por sua vez imprescindível para fornecer subsídios e permitir uma análise de forma adequada à disponibilidade dos recursos hídricos. Informações hidrológicas espacialmente bem distribuídas e com séries temporais adequadas que permitam realizar diferentes estudos hidrológicos são fundamentais. No entanto, em países em desenvolvimento esse cenário torna-se um grande desafio a ser conquistado. No Brasil, por exemplo, além de existir uma baixa densidade de postos de medição nas redes de monitoramento hidrométrico, devido à grande extensão do país, estas se mostram muitas vezes inadequadas quanto à manutenção e a operação.

Segundo Azevedo (2004), no Brasil, até aquela data, existia em média, uma estação fluviométrica para cada 2.013 km²¹ e a maioria dos postos fluviométricos estavam localizados em grandes bacias, onde geralmente, o potencial hidrelétrico é elevado. No caso de bacias hidrográficas de menor porte, até os dias de hoje, o monitoramento é deficiente ou inexistente.

A escassez de dados hidrológicos disponíveis torna necessária a busca por novas alternativas que levem ao conhecimento da disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas. Uma dessas alternativas é a regionalização hidrológica, uma técnica utilizada para suprir a carência de informações hidrológicas em locais com pouca disponibilidade de dados, sendo considerada uma ferramenta de grande importância no gerenciamento dos recursos hídricos.

A regionalização hidrológica, em um sentido mais amplo, pode ser entendida como qualquer processo de transferência de informações das estações pluviométricas e fluviométricas para outros locais com ou sem observações próprias que tenham características similares.

As transferências podem ser realizadas para séries de vazões, precipitações ou características relevantes destas variáveis (FILL 1987). No entanto, cabe destacar que uma bacia hidrográfica, dependendo das suas dimensões e sua localização, pode apresentar comportamentos hidrológicos diferentes em trechos distintos, dificultando ou impossibilitando a transferência de dados, sendo importante o conhecimento da

¹ A recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para estações fluviométricas é de uma estação a cada 300 a 1000 km² em regiões montanhosas (OMM, 1984)

homogeneidade hidrológica de uma determinada região para estudos de regionalização (ELESBON, 2011).

Outra alternativa para bacias hidrográficas que apresentam uma rede de monitoramento fluviométrico limitada é a aplicação de modelos de simulação hidrológica, permitindo que, a partir de dados históricos de precipitação, possam ser obtidas séries sintéticas de vazões. Esta alternativa tem uma crescente demanda. Muitos modelos chuva-vazão são utilizados e escolhidos dependendo das características das bacias e da sua concepção. Entretanto, na ausência de dados fluviométricos observados, o modelo de transformação de chuva em vazão não poderia ter seus parâmetros calibrados. Nesse sentido, métodos de transferência espacial de informações podem também ser aplicados, ou seja, compensar a insuficiente caracterização temporal de um determinado parâmetro por sua caracterização espacial, tal como preconizado nos princípios gerais da regionalização hidrológica (SARAIVA, 2010).

A modelagem hidrológica é uma ótima alternativa para a obtenção de séries de vazões, porém a escolha de um determinado modelo hidrológico que represente o comportamento de uma bacia hidrográfica é um processo importante que envolve a análise de quais dados são necessários e suficientes para obter resultados satisfatórios. Assim, quando existem limitações no monitoramento hidrológico, devem ser escolhidos modelos cujos dados de entrada sejam mínimos e que apresentem um número reduzido de parâmetros a serem estimados (KIM e KALUARACHCHI, 2008).

1.2 Motivação e contribuição da Tese

A bacia do rio Piabanha, escolhida como estudo de caso desta pesquisa está inserida no estado do Rio de Janeiro - região sudeste, uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil que é marcada pelo desenvolvimento industrial, econômico e pela alta densidade populacional. A região concentra aproximadamente 43% da população brasileira² porém detém apenas 7% dos recursos hídricos do país³ (CARVALHO e MAGRINI, 2006).

O Rio de Janeiro é o estado com maior densidade demográfica do Brasil (366 hab.km²) e, apesar de ser o terceiro menor em área, representa o segundo maior PIB do país. Por sua vez, a bacia do rio Piabanha, abarca um dos municípios mais

² População da Região Sudeste: 80.364.410 habitantes segundo dados do IBGE no Censo 2010.

³ A maioria dos Recursos Hídricos (68%) do país estão localizados nas bacias Amazônica e do rio Tocantins.

importantes do estado, o município de Petrópolis, destacado pelo alto índice de desenvolvimento humano (IDH = 0,804) e pela densidade demográfica elevada com aproximadamente 371,8 hab.km⁻² (IBGE, 2010).

Com as considerações anteriores, poder-se-ia dizer que a bacia do rio Piabanha encontra-se estrategicamente localizada em uma região importante do ponto de vista de desenvolvimento econômico tanto do estado quanto do país mas, ao mesmo tempo, está inserida em uma região não muito favorecida em termos de qualidade dos recursos hídricos. Além disso, a área ocupada pela bacia na região serrana do Rio de Janeiro é caracterizada por constantes problemas de enchentes e deslizamentos que, somados à rápida taxa de urbanização e concentração de população em periferias carentes de serviços básicos ou mesmo nas margens do rio principal da bacia, fazem com que a região apresente problemas de contaminação ambiental.

Embora a bacia do rio Piabanha faça parte de uma região desenvolvida e importante para o estado do Rio de Janeiro, constata-se que ainda existe carência de estudos relacionados aos seus recursos hídricos, havendo necessidade de um conhecimento maior da realidade da bacia hidrográfica. A quantificação dos recursos hídricos disponíveis para os diferentes usos, assim como a qualidade das águas, às vezes amplamente comprometidas principalmente por lançamentos de esgotos industriais e domésticos (Figura 1.1) sem tratamento adequado, bem como por fontes de poluição difusa devido a sedimentos finos e deficiências de coleta e disposição de resíduos sólidos, ou ainda produção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, precisam ser mais estudados e além disso, monitorados com maior frequência.

A carência do monitoramento adequado da rede existente na bacia representa um problema para os estudos hidrológicos que são desenvolvidos na região, pois apesar de existirem novos equipamentos instalados nos últimos anos, os dados das séries históricas existentes, além de apresentarem falhas e lacunas, muitas vezes são insuficientes.

Outro aspecto a ser levado em consideração é a escala temporal das medições, exigindo uma avaliação para saber se o monitoramento convencional da rede é suficiente para a bacia do rio Piabanha, já que diversos estudos mostram que o tempo de concentração na bacia é sub-diário (GONÇALVES, 2008; LOU, 2010; CARVALHO JUNIOR, 2013; COHN, 2014; MOLINARI, 2015).



Figura 1.1 - Lançamento de esgoto doméstico na cidade de Petrópolis

Nesse sentido, metodologias de regionalização hidrológica e aplicação de modelos chuva-vazão, são ferramentas que permitem estimar a disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas. O resultado destes estudos permitem a verificação da necessidade de instalação de novas estações ou realocação das existentes, além de fornecer um diagnóstico da distribuição de estações da rede de monitoramento.

Estudos relacionados à regionalização de vazões foram desenvolvidos para a bacia do rio Paraíba do Sul pela CPRM em 2002. Segundo o relatório técnico EIBEX⁴ (COPPE-UFRJ, 2010), nesses estudos, a sub-bacia hidrográfica do rio Piabanha, constituiu uma região hidrológicamente homogênea; no entanto, o mesmo estudo indicou uma possível divisão na sub-bacia do rio Fagundes, um dos principais afluentes do rio Piabanha.

⁴ Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro.

Devido à escala⁵ maior dos estudos realizados, essa possibilidade não foi verificada e ainda não existe um estudo detalhado publicado que aborde esse tema na bacia do rio Piabanha. Nesse sentido, considera-se que a identificação de regiões homogêneas é muito importante para um melhor entendimento do comportamento dos processos hidrológicos na bacia, assim, esse aspecto deve ser analisado mais detalhadamente.

Um ponto a favor para a problemática acima apresentada é que a bacia estudada conta com comitê de bacias próprio⁶, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha e Sub-Bacias Hidrográficas dos Rios Paquequer e Preto - CBH Piabanha⁷. Este CBH é bastante atuante e participativo, já tendo apoiado com recursos advindos da cobrança pelo uso da água, projeto de monitoramento de qualidade e vazões no rio Piabanha.

O CBH Piabanha é responsável pelo planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia, contando atualmente para o seu planejamento plurianual com caderno de ações do Plano de Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul, tendo realizado oficinas para desenvolvimento do plano de bacias em escala mais detalhada. Este plano deve incluir definição do monitoramento dos recursos hídricos visando permitir melhorar a oferta de água em quantidade e qualidade adequados para os diversos usos, bem como permitindo a prevenção contra eventos extremos (secas e enchentes) contribuindo para redução de possíveis conflitos. Além disso, mais estudos e pesquisas poderão ser desenvolvidos na região, contando com parcerias do Comitê com universidades e órgãos governamentais, como CPRM, INEA, entre outros, em benefício da população que habita a região.

Nesse contexto, por meio do estudo integrado e avaliação dos fatores que afetam direta ou indiretamente o comportamento do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, tais como o relevo, tipo de solo, uso do solo e cobertura vegetal, geomorfologia, padrões pluviométricos, características morfométricas, evapotranspiração, entre outros aspectos, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento efetivo referente à disponibilidade hídrica, ao comportamento hidrológico e à verificação da suficiência ou não da escala temporal na medição de dados diários normalmente encontrados em

⁵ Referida à comparação de áreas entre a bacia Paraíba do Sul (55.500 km²) e a bacia do Piabanha (2065 km²).

⁶ O território do estado do Rio está inteiramente dividido em 9 regiões hidrográficas.

⁷ Criado pelo [Decreto nº 38.235, de 14/09/2005](#), é um órgão colegiado vinculado ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERHI, com atribuições consultivas, normativas e deliberativas, de nível regional, integrante do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SEGRHI, nos termos da Lei Estadual nº 3.239/99.

redes de monitoramento convencional, dados que fazem parte de metodologias de quantificação de vazões.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

Determinar a partir de uma análise integrada de fatores que intervêm no ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piabanha, quão adequados são os dados obtidos do monitoramento hidrológico convencional, se referidos à escala temporal, isto é, se dados diários fornecidos são suficientes para a quantificação de vazões.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantar informações de estudos publicados na bacia do rio Piabanha e regiões vizinhas, criando um registro das pesquisas encontradas, de maneira a facilitar a busca para trabalhos futuros na bacia experimental.
- Analisar a base de dados hidrológicos existente na bacia, a distribuição espacial e temporal das estações pluviométricas e fluviométricas, além de outras estações automáticas instaladas na bacia.
- Escolha do Modelo Digital de Elevação mais adequado a partir de fontes de dados oferecidas pelos órgãos competentes, para a delimitação da bacia e sub-bacias e extração das características físicas via processamento do MDE.
- Caracterizar a bacia hidrográfica quanto às propriedades físicas com visitas a campo, com o intuito de melhor observar o comportamento hidrológico na bacia e no rio principal, além do entorno da região
- Analisar a distribuição espacial das chuvas e identificar regiões pluviometricamente homogêneas na bacia por meio de técnicas de mineração de dados (*Data Mining*), utilizando o método de agrupamento de dados WARD.
- Selecionar e empregar um modelo chuva-vazão adequado à bacia hidrográfica, levando em consideração os dados disponíveis e as características físicas que farão parte da simulação, calibração e validação do modelo.
- Analisar os resultados obtidos a partir da modelagem, comparando-os com dados de medições de vazão observados em campo.

1.4 Estrutura do Texto

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos.

O primeiro capítulo, introdução, apresenta uma descrição geral da problemática na área de estudo, a motivação para a escolha da região e do tema, além dos objetivos propostos.

O segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica relacionada ao estudo de bacias hidrográficas, envolvendo as incertezas existentes nas medições de variáveis hidrológicas além do monitoramento hidrológico em geral. São abordados temas relacionados à quantificação de vazões por meio de diferentes técnicas como a modelagem chuva-vazão e regionalização de vazões. No mesmo capítulo, apresenta-se ainda, o modelo que é aplicado neste estudo, com uma descrição da conceptualização do modelo, seus métodos e suas aplicações no Brasil e no mundo.

O terceiro capítulo aborda uma revisão bibliográfica da área de estudo, apresentando caracterização física e climatológica da área, além de aspectos socioeconômicos da região. Além disso, é apresentado um levantamento de estudos relacionados ao meio ambiente e recursos hídricos desenvolvidos na bacia do rio Piabanha.

O capítulo quarto apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho; nesse capítulo ainda são descritas de algumas ferramentas e metodologias utilizadas na pesquisa.

O quinto capítulo é dedicado aos resultados obtidos, sendo apresentados e discutidos os resultados da modelagem, da análise pluviométrica e todas as análises feitas, além disso, o capítulo apresenta um relatório resumido das características físicas da bacia do Piabanha, fruto dos trabalhos de campo realizados.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e recomendações do trabalho em geral.

CAPITULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

A água representa um insumo fundamental à vida, configurando um elemento insubstituível em diversas atividades humanas, além de manter o equilíbrio do meio ambiente. O acelerado crescimento populacional no mundo tem conduzido ao aumento da demanda de água, o que vem ocasionando, em várias regiões, problemas de escassez desse recurso. Atualmente, mais de um bilhão de pessoas vivem em condições insuficientes de disponibilidade de água. Quando se analisa o problema de maneira global, observa-se que existe quantidade de água suficiente para o atendimento de toda a população. No entanto, a distribuição não uniforme dos recursos hídricos e da população sobre o planeta acaba por gerar cenários adversos quanto à disponibilidade hídrica em diferentes regiões (SETTI *et al.*, 2001)

Estima-se que o Brasil possui cerca de 14 % do total de água doce renovável do mundo e menos de 3% da população mundial, e mesmo assim apresenta problemas de escassez em algumas áreas do país (VIOLA, 2008). Dessa maneira, representa uma contradição, um país caracterizado pela fartura de água, em situação privilegiada perante quase totalidade dos demais no planeta, discutir o acesso e o uso da água. Isso só demonstra que diante da abundância existente do recurso no Brasil, existe má distribuição geográfica e social (FELICIDADE *et al.*, 2001).

O potencial hídrico do estado do Rio de Janeiro, segundo Rebouças *et al.* (2006) citado por Francisco (2004) era de $30 \text{ km}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, o que resulta em uma disponibilidade per capita de $2,2 \text{ mil m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Este valor corresponde a cerca de duas vezes a quantidade mínima considerada como razoável pela ONU, e coloca o estado em sétimo lugar entre os de menor disponibilidade no país. A demanda hídrica representa 70% da disponibilidade, e é agravada pela poluição do rio Paraíba do Sul (FRANCISCO e CARVALHO, 2004).

Na gestão de recursos hídricos, a informação sobre a quantidade e qualidade da água, é importante e decisiva, já que, só conhecendo a quantidade de recursos disponíveis, poder-se-ia estabelecer as prioridades do seu uso, conforme o parágrafo 18.8 da Agenda-21 no seu capítulo 18, que diz: “O manejo integrado dos recursos hídricos baseia-se na percepção da água como parte integrante do ecossistema, um recurso natural e bem econômico e social cuja quantidade e qualidade determinam a natureza de sua utilização”.

2.2 Incertezas no monitoramento hidrológico

A época em que vivemos é cheia de incertezas, são incertezas ambientais, sobre o futuro do clima no planeta, incertezas econômicas, incertezas políticas e sociais sobre governos, regimes e sistemas monetários, entre outras, e ao mesmo tempo, esta-se vivendo um período sem precedentes, onde a informação disponível sobre os mais diversos assuntos permite que se conheçam temas que antigamente eram restritos apenas à área acadêmica (MANZIONE, 2014).

Incertezas estão presentes em todas as áreas de conhecimento, mesmo na vida diária. Diferentes autores tratam sobre as incertezas. Entre eles, Morgan e Henrion (1990) apresentam um trabalho bem detalhado sobre a classificação de incertezas. Quando se fala em informações, as incertezas aparecem em vários níveis, como por exemplo, incertezas pelas fontes da informação, incertezas pelo tipo de informação, confiabilidade, qualidade, entre outras.

A qualidade da informação disponível nas diversas fontes existentes é, muitas vezes duvidosa e incerta, o que torna o seu uso uma tarefa criteriosa e detalhada, além de exigir do avaliador não só experiência sobre o assunto abordado quanto perspicácia para reconhecer falhas. Possuir ou obter informação sobre determinado assunto é fundamental para uma boa análise de qualquer matéria (MANZIONE, 2014).

No que concerne à gestão de recursos hídricos, principalmente em países em desenvolvimento, a informação muitas vezes, não se encontra organizada ou não está disponível facilmente. Cabe ao analista visitar diferentes sítios eletrônicos, constatar diferentes agências ou instituições e realizar trabalhos de campo para que possa realizar o seu trabalho da melhor maneira possível tentando reduzir as incertezas encontradas (MANZIONE, 2014).

Manzione (2014) observa ainda que, não sendo isso suficiente, o pesquisador/cientista precisa escolher uma estrutura metodológica que dê suporte a suas análises, ajustando-se aos seus dados e gerando novas informações que, por vezes, podem ou não refletir a realidade, gerando diferentes graus de incertezas, seja nos próprios dados, no modelo escolhido, nas hipóteses levantadas ou mesmo por uma conjunção de tudo isso.

Incertezas também são encontradas no monitoramento hidrológico das bacias hidrográficas seja no tipo de monitoramento ou na escala temporal das medições ou mesmo na distribuição espacial das estações. Saber se o monitoramento é ou não o

apropriado para determinados estudos na gestão dos recursos hídricos é uma questão a ser levada em consideração.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) coordena o monitoramento hidrológico em todo o território, sendo responsável por cerca de 4.540 das 14.822 estações da rede hidrometeorológica nacional (ANA, 2016). Estas estações classificam-se em pluviométricas (precipitação), fluviométricas (nível e vazão de rios), sedimentométricas (carga de sedimentos) e de qualidade de água.

Apesar de tratar-se de uma rede hidrológica de grande porte, o monitoramento ainda precisa ser ampliado e melhorado. Problemas como a baixa densidade de estações em algumas regiões, baixa frequência de coleta, pequeno número de parâmetros de qualidade de água monitorados, alto custo de instalação e manutenção das estações e grande extensão territorial do país são desafios para as instituições públicas e privadas que trabalham com recursos hídricos no Brasil (CARVALHO et al., 2015).

Dessa maneira, em função do acima exposto poder-se-ia dizer que considerar as incertezas que podem aparecer por diferentes condições, é uma questão ética cujos cientistas, pesquisadores e estudantes em geral, tem de saber lidar. Como indicado por Mazione (2014), modelar incertezas pode fazer com que elas sejam compreendidas e reduzidas, negligenciar sua existência pode propagar erros e gerar previsões e previsões irreais.

2.3 Fatores da escala

Segundo Santos (2004), “os planejamentos ambientais classificam e ordenam o meio utilizando-se de métodos que dividem ou integram, um dado espaço. Trabalham as informações em diferentes graus de organização e complexidade, que devem ser estudados como um sistema em si mesmo”. Dessa maneira, cada abordagem tem um aprofundamento e uma integração com seus componentes e fenômenos atuantes e corresponde a uma representação da dimensão espacial e temporal das informações sobre o meio, ou seja, tem uma escala.

O conceito de escala é complexo, autores revelam a problemática que envolve este conceito, Gibson et al. (2000), por exemplo, explicam que no contexto atual, escala e nível devem ser incluídas nas análises dos pesquisadores afirmando que:

Utilizamos o termo escala para nos referirmos às dimensões espaciais, temporais, quantitativas ou analíticas usadas pelos cientistas para

medir e estudar objetos e processos. Níveis, por outro lado, referem-se a localizações ao longo de uma escala, mais frequentemente, um nível refere-se a uma região ao longo de uma dimensão de medida. Os níveis micro, meso e macro referem-se amplamente às regiões em escalas espaciais referentes a fenômenos de pequeno, médio e grande porte. Os níveis relacionados ao tempo, por exemplo, podem envolver curta, média e longa duração (GIBSON et al, 2000, p.3).

No mesmo contexto, os autores afirmam que problemas de escala podem estar relacionados a questões de escala e/ou nível e que as escalas também têm extensão⁸ e resolução⁹, embora estas não possam ser explicitamente observadas em um estudo particular.

Menezes e Coelho Neto (1999) afirmam que a escala é de fundamental importância em pesquisas que se realizam em espaços físicos de atuação de fenômenos, espacializando a sua representação, sendo dessa maneira, considerada como fator determinante para a delimitação do espaço físico, grau de detalhamento de uma representação ou identificação de feições geográficas, os mesmos autores ainda afirmam que:

A escala pode ser abordada dentro de um contexto espacial ou em um contexto temporal. A escala temporal é importante para o estudo de uma grande quantidade de fenômenos, sendo muitas vezes aplicada em conjunto com a escala espacial, principalmente para a indicação de elementos ligados à fatores evolutivos e ambientais, como seus períodos de ocorrência e atuação (MENEZES E COELHO NETO, 1999 p.2)

No que concerne à escala temporal, Steyaert (1993) explica que a grande maioria dos processos que ocorrem na superfície terrestre é caracterizada por escalas de tempo da ordem de segundos a dias. No entanto, existem condições e mudanças ambientais que se tornam perceptíveis em escalas muito maiores.

Tucci (2009) menciona que a escala temporal é dependente da ação antrópica e das condições de variabilidade climática, as quais podem ser observadas dentro da percepção humana ou apenas com base em medidas de sua ocorrência.

Na hidrologia o conceito de escala deve ser analisado, principalmente, para o campo de espaço (mm, cm, m, km) e tempo (s, min, dia, mês, ano). Nesse contexto,

⁸ Extensão refere-se à magnitude de uma dimensão usada na medição de um fenômeno. Em relação ao tempo, a extensão pode envolver um dia, uma semana, um ano, uma década, um século, um milênio ou muitos milênios. Em relação ao espaço, a extensão pode variar de um metro a milhões de metros quadrados ou mais.

⁹ A resolução refere-se à precisão utilizada na medição

Tucci (2009) explica que para a escala espacial nos modelos hidrológicos, existem cinco níveis diferentes: micro ($< 10^{-4}$ km²), transição γ ($10^{-4} - 10$ km²), meso ($10 - 10^3$ km²), transição α ($10^3 - 10^4$ km²) e macro ($> 10^4$ km²).

Santana (2003) afirma que a componente escalar espacial quando se refere ao tamanho de bacias hidrográficas torna-se um fator relativo, pois uma bacia hidrográfica desmembra-se em um número qualquer de sub-bacias, onde cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. Em contrapartida, Melo Neto (2012) afirma a inexistência de hierarquização das bacias hidrográficas em relação ao seu tamanho, visto que essa temática não é um consenso do meio científico no sentido de que se definam os limites dimensionais para o enquadramento em categorias.

Além disso, Mendiondo e Tucci (1997) demonstram que os principais desafios associados à análise escalar são: (a) representatividade dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais; (b) empirismo de modelos e parâmetros na representação de processos hidrológicos na bacia hidrográfica; e (c) a integração dos modelos meteorológicos e hidrológicos, os quais atuam em escalas distintas.

Nesse sentido, a síntese simples feita por Bergström e Graham (1998) vai ao encontro com os objetivos deste trabalho. O autor menciona que a escolha da escala espacial e temporal do modelo deve ser feita em termos de um nível apropriado de conceitualização dos processos hidrológicos que seja compatível, como um todo, com o fenômeno observado.

2.4 Disponibilidade hídrica

A água é essencial para o abastecimento de alimentos do mundo, para a produção de energia, incluindo a bioenergia e a energia hidrelétrica. A água já é escassa em muitas regiões do mundo e poderia apresentar uma restrição ainda maior. Numerosos estudos apontaram crescentes pressões sobre a escassez dos recursos hídricos de água doce no mundo, o crescimento populacional e econômico e as mudanças climáticas contribuem para este fato (KIM et al., 2016).

A disponibilidade hídrica natural em uma bacia hidrográfica é representada pelas vazões médias e mínimas, sendo o conhecimento destas de grande importância para um adequado planejamento do uso e da gestão compartilhada dos recursos hídricos, minimizando assim os conflitos pelo uso da água entre os diversos usuários (NOVAES, 2005; TUCCI, 2002).

As vazões mínimas merecem especial atenção em estudos de disponibilidade hídrica, pois é nos períodos de ocorrência destas vazões em que a disponibilidade de água é considerada crítica para atender todas as demandas, principalmente nos rios que preservam as condições naturais, ou seja, que não possuem reservatórios de acumulação (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

A vazão mínima é um fenômeno sazonal e uma componente integral do regime de vazões, normalmente alimentada pela descarga de águas subterrâneas. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (1974) citado por *Veza et al.* (2010), uma possível definição de vazão mínima é "*o fluxo de água em um córrego durante o tempo de seca prolongado*". A capacidade de estimar os fluxos de baixa magnitude e frequência nos rios é uma questão importante para o planejamento de abastecimento de água, para projetos de armazenamento em reservatórios, para a manutenção da quantidade e qualidade da água, para irrigação, recreação e outras atividades (VEZZA et al., 2010).

Funkhouser et al. (2008) afirmam que informações detalhadas sobre as características das vazões mínimas são essenciais para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica. Seu regime de escoamento depende da interação da topografia, da geologia, do clima e do uso da terra, ou seja, está diretamente relacionado com as propriedades físicas da bacia hidrográfica, sendo que em muitas situações, a área de contribuição é o fator predominante para explicar a magnitude das vazões mínimas, com substancial influência das precipitações, da cobertura vegetal, da declividade da bacia e do uso do solo.

Dessa maneira, os processos que caracterizam a variabilidade da vazão ou suas estatísticas no espaço dependem de fatores como: condições climáticas que caracterizam o balanço do escoamento médio; condições de relevo, solo e cobertura que definem o escoamento superficial e os volumes infiltrados; geologia que define as condições do escoamento subterrâneo e as vazões de estiagem. A vazão média identifica o balanço de longo período, enquanto a máxima caracteriza os condicionantes de inundação onde o escoamento superficial é o componente principal, e a vazão mínima caracteriza o comportamento do aquífero. Cada uma destas variáveis ou funções dependerá de um conjunto dos condicionantes citados anteriormente que existem numa bacia hidrográfica (SILVA JUNIOR et al. 2003).

Nesse sentido, a determinação da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica depende principalmente da existência de redes de monitoramentos

apropriadas nas bacias hidrográficas, entretanto a disponibilidade de informações hidrológicas com séries históricas adequadas em países em desenvolvimento é um dos maiores desafios para os estudos dos recursos hídricos.

No Brasil, além de existir uma baixa densidade de estações de monitoramento hidrométrico devido à grande extensão do país, ditas estações apresentam deficiências tanto na operação quanto na manutenção dos seus dispositivos de medição. Dessa maneira, conclui-se que a falta de dados hidrométricos, em quantidade e cobertura adequada, tanto na escala espacial quanto temporal, é uma realidade, traduzindo-se numa das principais dificuldades para a gestão dos recursos hídricos.

Nesse contexto, a estimativa da disponibilidade hídrica que requer informações de monitoramento nas escalas de espaço e tempo adequadas, nem sempre disponíveis, fica comprometida, sendo necessário o uso de metodologias de regionalização hidrológica ou modelagem para suprir a deficiência de dados (SANTOS, 2009).

2.5 Regionalização hidrológica

Para o aproveitamento adequado dos recursos hídricos disponíveis é fundamental, conhecer o comportamento dos rios e seus regimes de variação de vazões, assim como os regimes pluviométricos das diversas bacias hidrográficas, considerando as suas distribuições espaciais e temporais, o que exige um trabalho permanente de coleta e interpretação de dados, uma vez que a confiabilidade torna-se maior à medida em que as séries históricas ficam mais extensas (IBIAPINA et. al.1999) citado por Amorim (2005).

Uma rede hidrométrica dificilmente cobre todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Existirão sempre lacunas temporais e espaciais que precisarão ser preenchidas com base em técnicas ou metodologias apropriadas para o desenvolvimento dos diferentes estudos e projetos (TUCCI 2002).

Para suprir a insuficiência ou carência dos dados da rede hidrométrica, metodologias de regionalização hidrológica são utilizadas permitindo, aos hidrólogos, empregar dados medidos em um determinado lugar para aplicações em outros locais sem dados ou com dados de má qualidade. No entanto, é essencial levar em consideração a qualidade dos dados a serem usados na regionalização, sendo importante realizar uma análise destes.

Para Fill (1987), a regionalização hidrológica, em um sentido mais amplo, pode ser entendida como qualquer processo de transferência de informações das estações pluviométricas e fluviométricas para outros locais com ou sem observações próprias. As transferências podem ser realizadas para séries de vazões, precipitações ou características relevantes destas variáveis, como a média, variância, máximos e mínimos, equações e parâmetros. Em uma definição mais restrita, regionalização hidrológica pode ser entendida somente como a transferência de equações ou parâmetros.

Segundo Tucci (1993), a regionalização, ou análise regional, consiste em um conjunto de ferramentas de análise das séries históricas numa bacia hidrográfica, que visam a estimativa das variáveis em locais sem dados ou com insuficiência de dados, do ponto de vista da qualidade ou curta extensão da série histórica. A regionalização pode também ser usada para verificar a consistência da série hidrológica e identificar a necessidade de instalação de um posto fluviométrico em um determinado local, dentro da bacia hidrográfica.

Entre outras finalidades, a regionalização pode ser empregada para obter:

- funções estatísticas de variáveis hidrológicas: curvas de probabilidade de vazões e/ou precipitações máximas, médias ou mínimas entre outras;
- funções específicas que relacionam variáveis: curva de permanência, curva de regularização e curva de infiltração; e,
- parâmetros de modelos hidrológicos: características do hidrograma unitário e de outros modelos hidrológicos;

O princípio da regionalização baseia-se na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitam a transferência de dados. Um benefício adicional da análise regional da informação é o de permitir o aprimoramento da rede de coleta de dados hidrológicos, à medida em que a metodologia explora melhor as informações disponíveis e identifica lacunas (TUCCI, 2002).

Numa regionalização hidrológica, a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta hidrológica de cada região. Assim, a regionalização é usada para identificar zonas que apresentem um comportamento semelhante, e respostas hidrológicas podem ser comparadas, facilitando desta maneira, a transferência de informações entre regiões (TUCCI, 1993). Segundo Andrade (1999), a definição de região hidrológica homogênea não implica a existência de uma continuidade geográfica

entre elas, e regiões contínuas não expressam, necessariamente, respostas hidrológicas análogas.

Franchini e Suppo (1996) afirmam que a regionalização deve ser feita com base nas características físicas e climáticas. Duas regiões distintas podem ser consideradas homogêneas quanto a uma variável, mas não serem em relação às outras, o que, associado à escassez de dados observados, inviabiliza, muitas vezes, a análise direta sobre a variável em estudo, implicando a necessidade de encontrar relações físicas entre a variável a regionalizar e outras mais facilmente determinadas.

Realizar análises em grandes áreas que apresentam heterogeneidade no que diz respeito aos processos hidrológicos é possível por meio da regionalização. Dividir a região de interesse em sub-regiões a fim de agrupar as bacias que apresentam comportamento hidrológico homogêneo tem sido estudado por diversos autores e com diversas variáveis hidrológicas (GALÉA; MIC; GHIOCA, 2007; MAMUN; HASHIM; DAOUD, 2010; TRAMBLAY et al., 2010)

A regionalização hidrológica é um instrumento eficaz em estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos, possibilitando a obtenção de variáveis hidrológicas em locais em que não existem estas observações. Por outro lado, a quantidade e qualidade de dados usados nos estudos de regionalização são essências e determinantes. Devido a isso, uma análise criteriosa deve ser realizada antes da regionalização. Estações não adequadas são, geralmente, eliminadas, e testes estatísticos podem ser aplicados com o objetivo de encontrar dados atípicos que possam prejudicar o estudo.

A utilização de métodos de regionalização teve início na década dos 60. Inicialmente utilizavam-se fórmulas empíricas e, na medida em que os pesquisadores adquiriam maior conhecimento dos fundamentos que regem os processos físicos do ciclo hidrológico, juntamente com o incremento na velocidade dos recursos computacionais e o aumento de dados hidrológicos, foram desenvolvidos métodos mais complexos e confiáveis (BRUSA, 2004). Entre os métodos mais usuais de regionalização hidrológica encontrados na literatura, pode-se citar: os métodos empíricos, métodos por delimitação geográfica, métodos gráficos, o método índice de cheia (index-flow), os métodos baseados em técnicas matemáticas e estatísticas e métodos baseados em redes neurais.

2.6 Regionalização de vazões

Frequentemente, nos estudos de aproveitamento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, o hidrólogo é convocado para avaliar a disponibilidade hídrica superficial em locais onde não existe série histórica de vazões, ou, se existe, a extensão da série observada é pequena.

Modelos de regionalização, buscam a estimativa das vazões em seções que não possuem medições fluviométricas, não sendo recomendada a utilização destes modelos em seções que possuem medições, pois os mesmos não substituem as informações reais (SILVA JÚNIOR et al., 2003).

Existem várias técnicas matemáticas e estatísticas que permitem associar os dados hidrológicos. Estas técnicas são utilizadas buscando identificar relações empíricas ou conceituais do comportamento hidrológico, visando o prognóstico nos locais onde inexistem dados históricos, explorando, assim, de forma eficiente as informações existentes (TUCCI, 2002).

Dos diversos métodos existentes em regionalização de vazões, os mais empregados são os que utilizam a transferência de equações e parâmetros relacionados com as estatísticas. Entre estes métodos destaca-se o método tradicional, ou seja, o mesmo que, segundo Nerc (1970) citado por Rodrigues (2008), foi desenvolvido pelo *National Environmental Research Center* da Inglaterra na década de 70 a partir de uma ampla revisão sobre métodos estatísticos aplicados à hidrologia.

O método tradicional baseia-se no ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das áreas de drenagem das estações fluviométricas. Este método precisa da identificação de regiões hidrologicamente homogêneas. Um dos fatores limitantes à aplicação do método tradicional é a disponibilidade de um número mínimo de estações para aplicar o modelo de regressão. Como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras possui escassez de informações, o uso deste método de regionalização pode se tornar não recomendável. Por outro lado, quando as informações são suficientes e confiáveis, este método torna-se bastante confiável e muito utilizado (RODRIGUES, 2008).

Na busca constante por metodologias que se apliquem a diferentes bacias brasileiras, outros métodos foram desenvolvidos, como por exemplo, o método baseado na interpolação linear (ELETROBRÁS 1985b). Este método não precisa da identificação de regiões hidrologicamente homogêneas. A obtenção das vazões na seção de

interesse é realizada com base nas vazões correspondentes às estações fluviométricas mais próximas. Nesta metodologia, é realizada a ponderação no cálculo das vazões, tendo como base, as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e a jusante do local onde se deseja estimar a vazão, entretanto recomenda-se aplicar esta metodologia somente quando a diferença das áreas de drenagem das duas seções analisadas é inferior a três vezes uma em relação à outra.

Chaves et al. (2002) propuseram uma metodologia baseada em técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente SIG para vazões mínimas (denominado método de Chaves). As variáveis usadas para o cálculo da vazão são a área de drenagem e as distâncias entre a seção de interesse e o posto fluviométrico considerado. A metodologia desenvolvida teve como referência o método de razão de área de drenagem de Stedinger (1992), tendo sido testada com dados reais de vazões na bacia Itapicuru, na Bahia. Os resultados obtidos foram melhores do que os resultados obtidos com o método tradicional (regressão regional).

Com o intuito de inserir a precipitação média como variável nas duas metodologias anteriores, Novaes (2005) propôs a modificação para o método de interpolação linear e de Chaves, dessa maneira, a vazão na seção de interesse é também proporcional à relação entre os volumes precipitados. Os métodos foram denominados interpolação linear modificada e Chaves modificado.

No mesmo estudo descrito acima, Novaes (2005) desenvolveu uma metodologia baseada no procedimento proposto por Pereira (2004), que estabelece um ajuste de equações de regressão às séries de dados calculados para cada, estação fluviométrica individualmente. Fundamenta-se na ideia de que a vazão obtida pela equação de ajuste e que considera as informações de todas as estações fluviométricas situadas no rio, é mais representativa que a vazão obtida pontualmente para a seção considerada. Assim, a metodologia proposta para a representação das vazões mínimas em função da área de drenagem no rio principal permitiu obter as vazões na foz de cada rio afluente direto do rio principal, garantindo a continuidade das vazões ao longo de toda a rede hidrográfica e foi denominado como método de conservação de massa ou continuidade de vazões.

Silveira (1997) desenvolveu um método aplicável a pequenas bacias hidrográficas, o método baseia-se na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado com uma amostragem reduzida de vazões. O autor caracteriza o método como uma solução alternativa para a obtenção de séries contínuas de vazões que é

feita por um monitoramento convencional. O método proposto considera que uma rápida interação com o meio por meio de algumas medições locais conduz a uma boa avaliação da disponibilidade hídrica por um modelo chuva-vazão com dois parâmetros. Os resultados alcançados são promissores, e sua extensão a outras regiões do Rio Grande do Sul podem diminuir a incerteza das estimativas de outros métodos disponíveis.

Contudo, verifica-se que estudos de regionalização foram desenvolvidos baseados nas metodologias descritas. Algumas metodologias foram modificadas com o objetivo de encontrar a que melhor se adéqua às diferentes características das regiões estudadas.

Avaliações e comparações de diferentes metodologias também foram realizadas, por exemplo, em um trabalho de avaliação do desempenho de equações de regionalização realizado por Fioreze et al. (2008). Foram testadas as equações de regionalização ajustadas em 1987 e 2004 (diferentes autores) para a bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara em Goiás. Foram realizadas comparações das vazões resultantes dos modelos de regionalização existentes com as vazões observadas em um dos postos fluviométricos da bacia. As equações de regionalização avaliadas foram consideradas satisfatórias para a estimação de vazões médias, mas apresentaram alguns problemas para os eventos extremos (máxima e mínima). O modelo que estimou a Q95% teve um erro aceitável, produzindo resultados confiáveis.

Ribeiro et al., (2005) avaliaram três metodologias de regionalização para vazões mínimas de referencia (Q_{7-10} , Q_{90} , Q_{95}) na bacia do rio Doce (83.400 km²). O período selecionado para o estudo foi de 1975 a 2001. Os métodos utilizados foram; o método tradicional, o método de Chaves e o método da interpolação linear, foram utilizadas 56 estações pluviométricas e 57 estações fluviométricas para a regionalização. Os resultados indicaram que o método mais preciso para a bacia foi o método Tradicional, sendo a área de drenagem a característica física que melhor explicou o comportamento das vazões mínimas na bacia. As outras metodologias foram eficientes na estimativa de vazões em situações em que a seção onde se deseja determinar a vazão estava localizada entre dois postos de vazão conhecida.

Veza et al. (2010) aplicaram no noroeste da Itália, equações de regressões múltiplas, levando em consideração as características morfo-climáticas da região com o objetivo de estimar vazões mínimas. Antes da regionalização de vazões propriamente dita, o trabalho concentrou-se na classificação das regiões homogêneas. As sub-regiões encontradas foram delimitadas com base em quatro metodologias de

classificação de dados; índice de sazonalidade, árvores de classificação e regressão, aproximação de padrões e agrupamento de dados. Todos os métodos fizeram delimitações parecidas, porém o escolhido foi o método árvore de classificação e regressão. Os autores concluíram que, enquanto mais métodos testados para a classificação de regiões hidrologicamente homogêneas, melhor será a análise crítica nos resultados para a regionalização.

Com o objetivo de quantificar as características das vazões mínimas, em particular no que diz respeito ao escoamento de base, Mehaiguen et al. (2012), utilizaram, para a regionalização, modelos de regressão linear múltipla regional e global. A identificação de regiões homogêneas foi realizada com base em dados fisiográficos e climáticos de uma região extensa no norte da Argélia, região que possui uma área de 130.000 km² e é caracterizada por apresentar uma permeabilidade moderada, em que, 41% do território é considerado como permeável. Os métodos usados para a classificação de regiões foram; agrupamento de dados e análise de componentes principais. Três áreas bem diferentes foram identificadas na região. Posteriormente, modelos de regressão linear múltipla regional e global foram aplicados e comparados, apresentando grandes diferenças nas porcentagens das variâncias explicadas em cada área. Isto mostra a importância da definição das regiões homogêneas, já que os modelos de regressão regional, apresentaram melhores resultados que os modelos de regressão global.

Baena et al. (2004) fizeram um estudo de regionalização de vazões máximas, mínimas e médias de longo período para a bacia do Rio Paraíba do Sul. Utilizaram como ferramenta um modelo digital de elevação hidrologicamente condicionado, que determinou as características físicas da bacia. Foram identificadas quatro regiões hidrologicamente homogêneas. As características físicas utilizadas na regionalização foram a área de drenagem, o comprimento principal do rio, a densidade de drenagem de cada estação e as declividades médias da bacia e do rio principal. As equações de regressão obtidas mostraram que a área de drenagem e o comprimento do curso de água principal foram as variáveis que melhor se ajustaram na regionalização.

Veiga et.al. (2011) utilizaram quatro metodologias de regionalização de vazões em cotas baixas de referência para o rio Teles Pires na bacia Amazônica: interpolação linear, Chaves, interpolação linear modificado e Chaves modificado. Os métodos foram aplicados para 33 anos de série histórica de duas estações fluviométricas localizadas uma a montante e outra a jusante da seção de interesse, chegando à conclusão de que os métodos de interpolação linear (incluindo interpolação linear modificado) e os métodos de Chaves (incluindo Chaves modificado) apresentaram uma diferença de 2%

em relação a curva de permanência de 95% das estações de montante e jusante. No entanto, os métodos de interpolação linear e interpolação linear modificado que não tiveram qualquer diferença entre eles foram os mais adequados para a bacia em questão.

Rameh et al. (2003) aplicaram o método tradicional de vazões em quatro sub-bacias do rio São Francisco, utilizando, além das variáveis físicas e climáticas normalmente aplicadas, a variável que representa a permeabilidade do solo, obtida por meio de mapas temáticos. Os modelos obtidos mostraram uma melhora expressiva no seu desempenho, concluindo assim, que a inclusão de variáveis explicativas relacionadas com o processo de formação das vazões nos cursos de água é muito importante em processos de regionalização.

Por outro lado, Agra et al. (2003) realizaram uma discussão para o uso de técnicas simplificadas de transferência de informação hidrológica, compararam resultados obtidos para séries históricas e curva de permanência de três metodologias simplificadas: vazão específica, equações de regionalização e coeficiente de escoamento como parâmetro regional. As metodologias utilizadas foram calibradas em uma estação com área de drenagem de 1829 km², escolhida por ser a estação com melhor disponibilidade de dados hidrológicos. Logo, os resultados da calibração foram aplicados em uma bacia com área menor (1250 km²). Foram geradas curvas de permanência com os valores obtidos por meio das três metodologias, sendo que o método da vazão específica apresentou melhores resultados. O método de coeficiente de escoamento apresentou grande sensibilidade à variação de precipitação.

No caso de comparação de metodologias de regionalização de vazões, Moreira (2010) realizou um estudo cujo objetivo foi a comparação de vazões mínimas e médias estimadas no trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*¹⁰ com vazões estimadas por meio dos métodos tradicional, proporcionalidade de vazões e conservação de massas, na bacia do rio Paraopeba. Os resultados mostraram que o método tradicional foi o mais adequado na estimativa de vazões Q_{7-10} e Q_{mld} para essa bacia.

2.7 Modelagem hidrológica

Um modelo, de forma geral, pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, que auxilia no entendimento dos processos que envolvem

¹⁰ Trabalho, "Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais" desenvolvido em 1993 (MOREIRA, 2010)

essa realidade. Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos, não existindo um modelo único que seja o melhor e sim aquele modelo que melhor descreve um fenômeno (RENNÓ e SOARES, 2000).

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e de seus constituintes numa bacia hidrográfica. Para melhor entender um modelo hidrológico, é necessário analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico (Figura 2.1). Para Chow et al. (1994), um modelo do sistema hidrológico é uma aproximação do sistema real; as suas entradas e saídas são variáveis hidrológicas mensuráveis e a estrutura é um conjunto de equações que conectam essas entradas e saídas, ligada à estrutura do modelo, encontra-se o conceito de transformação do sistema.

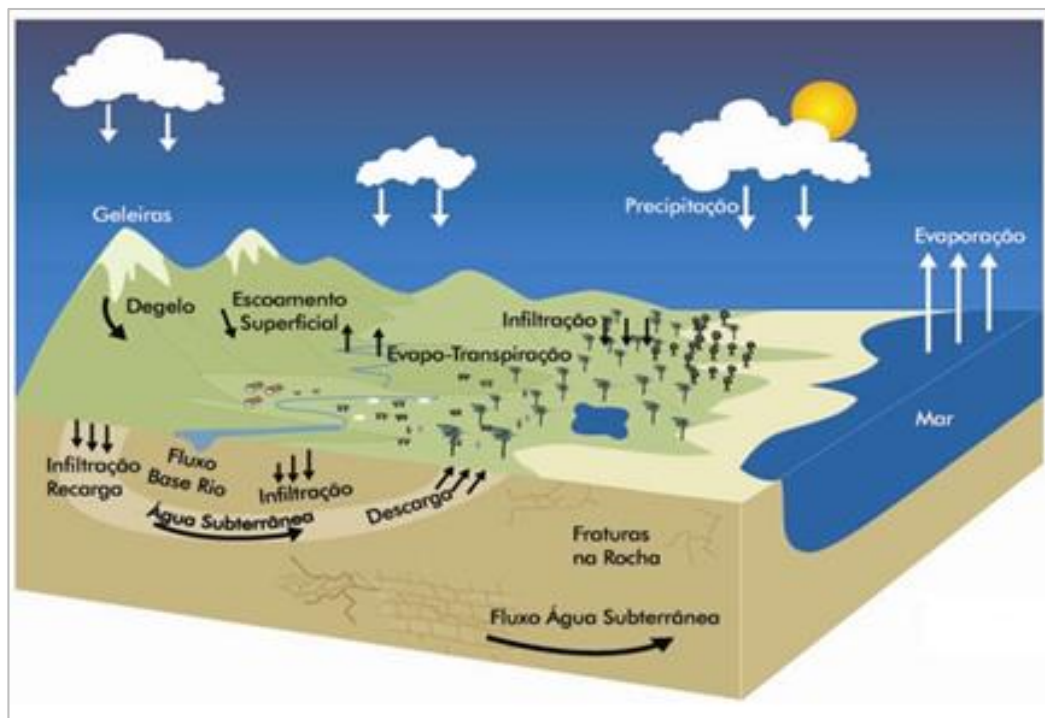


Figura 2.1 - Esquema dos principais componentes envolvidos no ciclo hidrológico

Fonte: MMA (2015)

Tucci (1998) define os modelos hidrológicos como ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento das bacias hidrográficas e prever condições diferentes das observadas. Esses modelos descrevem, no geral, a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação e evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração e a percolação, a entrada e saída

de água subterrânea, e o escoamento superficial, subsuperficial e nos canais de escoamento.

Segundo Raudkivi (1979), citado por Sousa (2011), um dos principais problemas da hidrologia aplicada é a determinação das vazões de um rio, a qual sofre influência, entre outros fatores das precipitações, temperatura, vento e parâmetros da bacia hidrográfica. Os processos que ligam as chuvas às vazões são em sua essência determinísticos, comandados por leis físicas que são, em parte, conhecidas. Porém as condições de entorno, como a fisiografia, fazem com que soluções baseadas na aplicação direta das leis físicas de alta complexidade, constituam ainda um desafio atual que requer atenção.

Como consequência do acima exposto, os hidrólogos desenvolveram modelos de bacias hidrográficas. Esses modelos são utilizados para uma extensa lista de objetivos, tais como: prever a frequência de eventos; fazer previsões de curto prazo; extensão de séries; previsão do comportamento hidrológico da bacia; previsão dos efeitos de mudanças físicas na bacia; otimização do planejamento e procedimentos operacionais de projetos de recursos hídricos.

A modelagem hidrológica permite verificar a consistência das informações disponíveis (dados observados), que são, em geral, muito curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas. Com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados, permitindo, por exemplo, a geração de séries sintéticas e a utilização dos modelos como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas (SANTOS, 2009).

Beven (1993) ressalta que todos os modelos e teorias são apenas aproximações à realidade e contêm parâmetros 'livres' que devem ser calibrados para uma situação particular em que o modelo é aplicado, não sendo difícil obter previsões que imitem o comportamento das variáveis observadas em um grau razoável, pelo menos em alguma faixa de comportamento. Ressalta também num trecho do seu texto o seguinte parágrafo:

Sabemos também, que os erros de previsão não refletem somente erros estruturais do modelo, mas também erros associados com as especificações da entrada de dados e condições de contorno e erros de medição das variáveis observadas que, normalmente, são observadas indiretamente e localmente (BEVEN, 1993 p. 3)

Contudo, para que um modelo seja utilizado adequadamente, é necessária a compreensão da estrutura do modelo e suas limitações. Além disso, como citado por Beven (1993) os modelos precisam ser calibrados para que reproduzam o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surgem os parâmetros que representam as características e os processos físicos da bacia (SANTOS, 2009).

Nesse sentido, Kim e Kaluarachchi (2008) afirmam que, quando existe limitação de monitoramento hidrológico, deve-se ter preferência por modelos cujos dados de entrada sejam mínimos e que apresentam um reduzido número de parâmetros a serem estimados, enquadrando-se no denominado princípio da parcimônia na abordagem estatística.

Segundo Tucci (1998), a parcimônia refere-se à capacidade de explicar um processo com o menor número de parâmetros possíveis. Beven (1989), afirma que, há um grande perigo em utilizar muitos parâmetros na tentativa de simular todos os processos considerados relevantes num modelo, verificando-se que entre 3 a 5 parâmetros deveriam ser suficientes para reproduzir a maior parte da informação do registro hidrológico. Limbrunner et al. (2005) concluem que um modelo parcimonioso possui a vantagem de facilitar a calibração e a análise de incertezas.

2.7.1 Classificação dos modelos hidrológicos

Existem diferentes tipos de modelos desenvolvidos para diferentes propósitos. Ao mesmo tempo em que podem ser agrupados em uma mesma classe por similaridades estruturais, distinguem-se por outros critérios de classificação (TUCCI, 1998).

Chow et al. (1994) afirmam que os modelos podem ser divididos em duas categorias, modelos físicos e abstratos. Os primeiros incluem; modelos em escala que representam o sistema em escala reduzida e modelos análogos que utilizam outro sistema físico com propriedades similares às do protótipo. Os modelos abstratos representam o sistema em forma matemática. A operação do sistema é descrita por meio de um conjunto de equações que relacionam as variáveis de entrada e saída. Essas variáveis podem ser funções do espaço e do tempo e podem também ser variáveis probabilísticas ou aleatórias que não tem um valor fixo num ponto particular do espaço e do tempo, mas que estão descritas por meio de distribuições de probabilidade.

Por conseguinte, de acordo com o tipo de variáveis, os modelos hidrológicos podem também ser divididos em estocásticos e determinísticos, sendo que, o modelo estocástico utiliza o conceito de probabilidade, ou seja, considera a chance de ocorrência das variáveis e o modelo determinístico não considera a aleatoriedade; uma entrada sempre produz a mesma saída.

Os modelos determinísticos, por sua vez, podem ser classificados em conceituais e empíricos. Um modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos que ocorrem na natureza. Os modelos empíricos, chamados muitas vezes de “caixa preta”, são aqueles em que se ajusta uma relação causa – efeito entre as variáveis de entrada e de saída, por meio de funções que não têm relação com os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2002).

No entanto, a distinção acima explicada é extremamente difícil em vista de que alguns modelos, classificados e reconhecidos como conceituais, apresentam na verdade, determinadas equações empíricas para exprimir um determinado processo físico. Isso justifica a tendência de classificar os modelos hidrológicos atuais como semi-conceituais e quase-empíricos, ainda que todos os modelos possam ser considerados como construções conceituais (ROTUNNO FILHO, 2001).

Por outro lado, os modelos determinísticos conceituais são ainda classificados em modelos concentrados e distribuídos, sendo que os primeiros utilizam informações médias da bacia ou do trecho em análise, enquanto que os distribuídos discretizam as informações no espaço em unidades de resposta hidrológica como células e pixels. Os modelos distribuídos não garantem necessariamente melhores resultados do que os modelos concentrados mas, quando agregados às técnicas associadas aos sistemas de informações geográficas, tem propiciado melhor representatividade espacial e temporal do comportamento dos processos hidrológicos (NOVAES, 2005). Uma categoria adicional seria a dos modelos semi-distribuídos, de forma a preencher o espaço entre os modelos concentrados e modelos distribuídos com base física (ROTUNNO FILHO, 2001).

Dessa maneira, é importante lembrar que a classificação não é necessariamente exclusiva, sendo que um modelo pode possuir diferentes classificações para cada discretização de fenômeno, variável e ou parâmetro (SILVA, 2005). Alguns autores classificam os modelos de diferentes formas. Por exemplo, Chow et al. (1994) classificaram os modelos considerando a aleatoriedade e as variáveis temporal e espacial dos fenômenos hidrológicos como se observa na Figura 2.2

Segundo Abbott e Refsgaard (1996), os modelos determinísticos são classificados de acordo com o processo hidrológico, podendo ser empíricos, conceituais ou distribuídos como mostrado na Figura 2.3. Os modelos empíricos ou de caixa – preta, são desenvolvidos usando as séries históricas medidas, em vez de utilizar a expressão matemática que descreve o processo físico na bacia. Um exemplo desse tipo de modelos são os baseados em redes neurais. Nos modelos concentrados conceituais, os parâmetros e variáveis representam os valores médios de toda a bacia. Como resultado, as equações são semi-empíricas, mas com uma base física. Os parâmetros do modelo não podem apenas ser avaliados com dados de campo, mas tem que ser obtidos com a ajuda da calibração. Nos modelos distribuídos com base física, os processos são representados por equações diferenciais parciais e as equações e parâmetros são distribuídos no espaço. Esses modelos são aplicados a bacias com rede de drenagem complexas, que variam na distribuição espacial do uso do solo, tipo de solo e cobertura vegetal, entre outros.

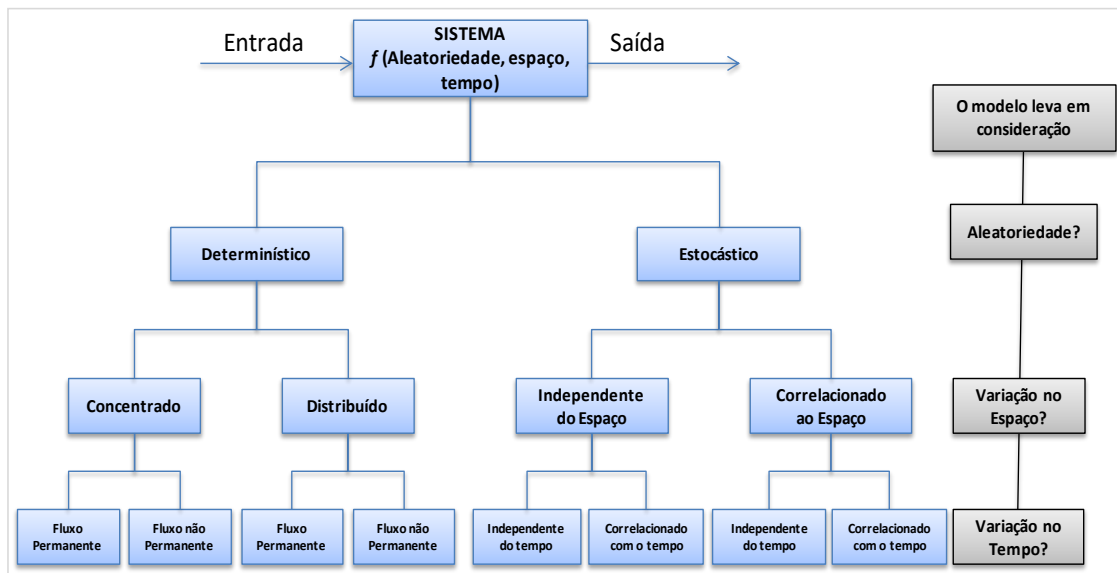


Figura 2.2 – Classificação de modelos hidrológicos de acordo com a forma, aleatoriedade, e variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos

Fonte: adaptado de Chow et al. (1994)

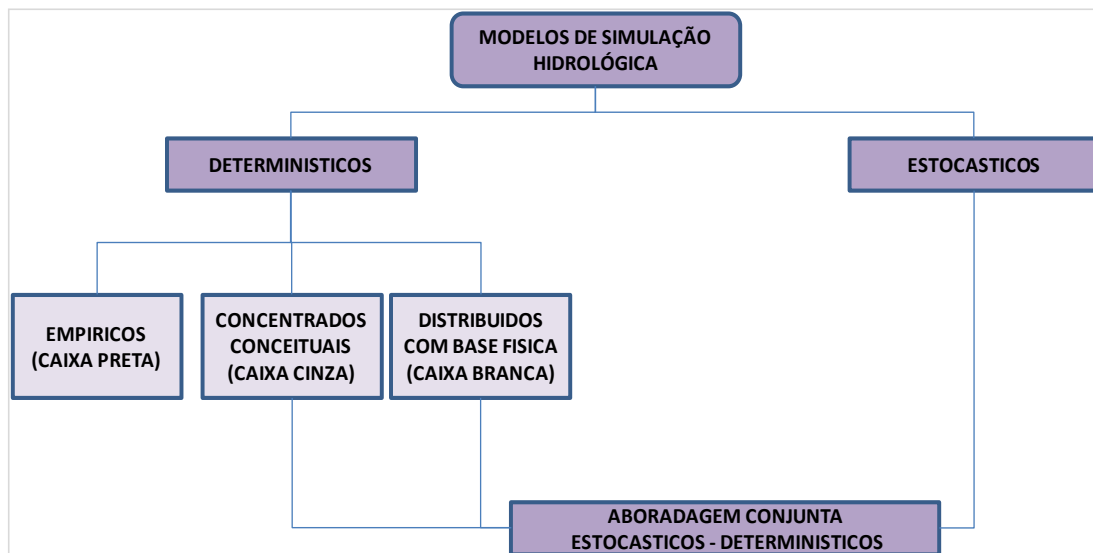


Figura 2.3 - Classificação dos Modelos

Fonte: adaptado de Abbott e Refsgaard (1996)

2.7.2 Modelos chuva - vazão

Os primeiros modelos chuva – vazão surgiram logo após a segunda guerra mundial, como consequência do uso dos computadores na engenharia de recursos hídricos. Um dos primeiros modelos chuva - vazão é o chamado SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*), um modelo conceitual desenvolvido pela *U.S. Army Corps Engineers* em 1958, com o objetivo de simular o ciclo hidrológico e regularizar vazões (MACHADO, 2005).

Em 1966, os pesquisadores Crawford e Linsley (SINGH e WOOLHISER, 2002 citado por SARAIVA, 2010), criaram o modelo *Stanford Watershed Model* – SWM (atual HSPF), sendo considerado um dos mais completos para simular o ciclo hidrológico integrando vários processos hidrológicos. Depois do modelo Stanford, houve uma grande difusão de modelos hidrológicos. Entre eles, destacam-se os fisicamente fundamentados: SWMM, PRMS, NWS, SHE, TOPMODEL e IHDM entre outros.

Na escolha de um modelo chuva – vazão deve-se levar em consideração aspectos como: os objetivos para os quais o modelo será utilizado, as limitações do modelo e qualidade e quantidade de dados (TUCCI, 1998). O uso de um modelo chuva – vazão geralmente apresenta os seguintes tópicos; escolha, calibração validação e aplicação.

O problema a ser enfrentado por muitos hidrólogos é a seleção de um modelo apropriado para uma particular bacia hidrográfica. Por modelo apropriado, entende-se

a capacidade do modelo em reproduzir adequadamente os vários aspectos dos hidrogramas de saída que são de interesse para o hidrólogo (ROTUNNO FILHO, 2001).

Segundo Canedo (1989), qualquer modelo hidrológico, mesmo quando se trata de um modelo adequado e aplicado nas melhores condições, fornecerá resultados com incertezas devido às imprecisões no registro dos dados hidrometeorológicos da bacia hidrográfica e calibração dos parâmetros do modelo.

Existe uma grande variabilidade de modelos que apresentam significativas diferenças em suas respectivas estruturas, refletindo os diferentes propósitos para os quais foram construídos. Dessa maneira, a seguir são descritos brevemente alguns modelos amplamente utilizados.

O modelo TOPMODEL (Topography-based Hydrological Model), é um modelo chuva-vazão considerado semi-distribuído, já que somente os parâmetros relacionados à topografia são distribuídos, enquanto os demais parâmetros como precipitação e transmissividade são constantes para toda a bacia. Uma definição do TOPMODEL pode ser descrita pelas palavras de seus autores: "...o modelo aqui proposto é um compromisso entre as vantagens da modelagem simplificada, a complexa variabilidade espacial da resposta hidrológica da bacia e a limitação econômica da medição de parâmetros em campo..." (BEVEN e KIRKBY, 1979). O modelo é baseado no armazenamento e é constituído em uma série de reservatórios interligados com diferentes tempos de armazenamento. Esta série de reservatórios de armazenamento representa a resposta média da saturação do solo em uma sub-bacia homogênea.

O Modelo SMAP (Soil moisture accounting procedure), desenvolvido por - Lopes, Braga e Conejo em 1981- é um modelo de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. O modelo apresenta estrutura simples para séries contínuas, e utiliza a separação do escoamento baseada nos parâmetros do Departamento de Conservação do Solo Norte-Americano. É um modelo determinístico, conceitual e agregado. O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência da aplicação do modelo Stanford Watershed IV e o modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e, posteriormente, apresentado em versão horária e mensal (DI BELLO, 2005). O modelo simula o balanço da umidade do solo, continuamente atualizado a partir das condições iniciais fornecidas como dados de entrada, fundamentado em três reservatórios fictícios não lineares que representam a superfície e as zonas não saturada e saturada do solo (SARAIVA, 2010).

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático de domínio público desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* e incorpora grande parte dos avanços obtidos em modelos anteriores. O modelo tem por objetivo prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. É distribuído, ou seja, tem as suas variáveis e parâmetros dependendo do espaço e do tempo. A principal qualidade deste tipo de modelo, conforme Tucci (1998), é a capacidade em representar melhor a variação espacial do sistema sendo que o SWAT realiza a simulação de vazões considerando, além das séries temporais, diversos fatores espaciais, como relevo, hidrografia, uso e tipo do solo.

O modelo hidrológico MGB-IPH é um modelo distribuído desenvolvido para aplicações em grandes bacias, isto é, com áreas superiores a, aproximadamente, 10.000 km². Foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) ao longo dos últimos 10 anos. O modelo subdivide a bacia em células regulares (geralmente quadradas), com tamanhos na ordem de 0,1 x 0,1 graus, o que equivale a, aproximadamente, 11 x 11 km. O tipo de vegetação e uso da terra dentro de cada célula é categorizada dentro de uma ou mais classes de acordo com a escolha do usuário.

O modelo NAVMO - Niederschlag, Abfluss, Verdunstungs Modell (modelo de precipitação, vazão, evaporação), foi desenvolvido no Instituto de Recursos Hídricos da Universidade de Bundeswehr, Munique, Alemanha, para simular o escoamento em uma bacia hidrográfica. Este modelo é diário, determinístico, conceitual e distribuído, permitindo que as variabilidades tanto de fatores climáticos (precipitação e evaporação) quanto do sistema da bacia sejam consideradas.

O NAVMO divide a bacia hidrográfica em sub-bacias, na sua estrutura o modelo é capaz de transformar a precipitação efetiva em escoamento superficial utilizando a equação do balanço hídrico que é aplicada à bacia por meio de dois reservatórios hipotéticos, um superficial e outro sub-superficial, e uma função de recessão, para representar o escoamento subterrâneo. O modelo necessita dos seguintes dados de entrada: dados de precipitação, evaporação, vazões observadas e características físicas das sub-bacias (área, cotas, declividades, uso do solo, entre outras). Fornece como resultado vazões diárias, vazões máximas, volumes anuais, valores dos desvios médios e hidrológicos, centróides dos hidrogramas e as diferenças entre as vazões máximas observadas e calculadas (RANGEL, 2009).

Alguns modelos já foram aplicados na bacia do rio Piabanha, como exemplo, indica-se o modelo TOPMODEL e SMAP que já foram aplicados por Gonçalves (2008) na sub-bacia Pedro do Rio. Lou (2010) e Brito (2014) aplicaram o modelo distribuído MODCEL na mesma sub-bacia, Silva (2013) aplicou o modelo HEC-RAS no seu estudo com traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão na bacia do rio Piabanha, Fintelman (2014) aplicou o MGB (modelo de grandes bacias) e Molinari (2015) aplicou o modelo HSPF (*Hydrological Simulation Program – FORTRAN*) na bacia do rio Piabanha.

O modelo HEC-HMS aplicado em este trabalho será descrito a seguir e com maior detalhe.

2.8 Modelo HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System*, é um modelo desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*USACE – U.S. Army Corps of Engineers*). É utilizado para modelar processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas (HEC, 2013)¹¹. O modelo encontra-se disponibilizado na internet de forma gratuita junto com o manual para o usuário e manual técnico, além de algumas outras ferramentas que fazem parte da família HEC.

O HEC-HMS é um modelo matemático, concentrado, conceitual/empírico, e determinístico. É capaz de simular eventos isolados ou processos contínuos i.e. por vários meses ou anos. A família HEC, assim denominada, passou por várias melhorias, os algoritmos do HEC-1 (HEC, 1988), HEC-1F (HEC, 1989), Máxima (HEC, 1989), e HEC-IFH (HEC, 1992), que foram modernizados e combinados com novos algoritmos para melhorar as rotinas de simulação.

A versão inicial do programa foi chamada Versão 1.0 e incluía a maioria das capacidades de simulação de eventos do programa HEC-1. A simulação de processos contínuos ou de longo termo no HEC-HMS foi implementada mais tarde por meio do algoritmo SMA (*Soil Moisture Accounting*). Cabe ressaltar que existe um outro método mais simples implementado no modelo, que pode ser utilizado em processos contínuos,

¹¹ Este texto está baseado principalmente no Manual do Usuário e Manual Técnico da U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2000,2013), eventualmente podem aparecer outras fontes que serão mencionadas no próprio corpo do texto.

no entanto, como o manual indica é um algoritmo mais simples, fato pelo qual pode não prever bem o volume de perdas.

O programa tem uma ampla gama de capacidades para a realização de simulação hidrológica. A representação de uma bacia hidrográfica é realizada por um modelo de bacia, onde elementos hidrológicos estão conectados em uma rede de drenagem para simular os processos de escoamento. Esta representação fica condicionada ao número de sub-bacias existentes na bacia e à rede de drenagem delimitada. O HEC-HMS inclui um conjunto lógico de passos para o ciclo hidrológico como é observado na Figura 2.4.

O processo começa com a precipitação, a chuva cai e distribui-se pela vegetação da bacia hidrográfica, na superfície da terra e nos corpos de água presentes (rios e lagos). No entanto, deve-se levar em consideração que uma parte importante da precipitação, segundo a época do ano, pode retornar a atmosfera pela evaporação que se produz da vegetação, da superfície, e das massas de água e por meio da transpiração vegetal.

Durante um evento de tormenta a evaporação e a transpiração são limitadas. Parte da água interceptada pela vegetação escorre pelas folhas até atingir a superfície do terreno onde se junta com a água precipitada durante a chuva. Uma parcela da água que se encontra na superfície poderá infiltrar. Esse fato dependerá das características e condições do solo.

A água procedente da infiltração será primeiro armazenada na camada superior do solo, desde onde se movimentará em diferentes direções, podendo assim ter uma ascensão por capilaridade, um movimento horizontal como fluxo hipodérmico, ou percolar verticalmente para camadas de solo mais profundas.

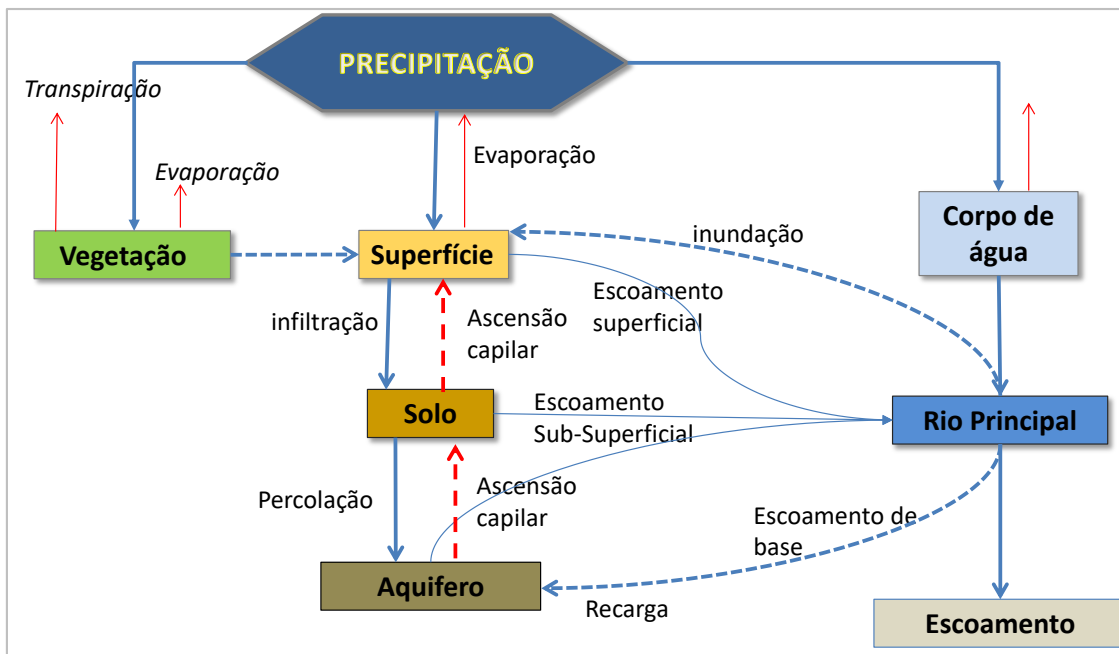


Figura 2.4 - Diagrama do processo do escoamento
Fonte: adaptado do Manual Técnico HEC (2000)

2.8.1 Modelos incorporados no HEC-HMS

Para a representação dos processos de escoamento mencionados anteriormente, o programa *HEC-HMS* usa modelos/métodos separados, listados a seguir e apresentados no Quadro 2.1:

- modelos que calculam o volume de escoamento;
- modelos de escoamento direto;
- modelos de vazão de base;
- modelos de escoamento em canais

A escolha de cada modelo para o cálculo dos diferentes processos dependerá dos objetivos do estudo e dos dados que o usuário tiver disponíveis, a escolha também estará baseada no tipo de simulação a ser feita, sendo as escolhas diferentes quando a modelagem representa um evento pontual ou um processo contínuo.

No HEC-HMS alguns dos modelos mencionados foram desenvolvidos apenas para simulação de eventos, na descrição de cada método no manual técnico do programa, é possível verificar para que tipo de simulação cada um deles é mais adequado. Neste estudo, a descrição dos modelos escolhidos para esta pesquisa, será apresentada no capítulo correspondente à Metodologia.

Quadro 2.1 - Modelos disponíveis no HEC-HMS

Modelos que calculam o volume de escoamento	
1	Taxa Constante de Perdas
2	Curva Número (CN) do SCS
3	Green e Ampt
4	Taxa de Deficit Constante
5	Modelo SMA (Soil Mixture Accounting)
Modelos de Escoamento Direto	
1	Hidrograma Unitário (do Usuário)
2	Hidrograma Unitário de Clark
3	Hidrograma Unitário de Snyder
4	Hidrograma Unitário SCS
5	Modelo de Clark Modificado (ModClark)
6	Modelo da Onda Cinemática
Modelos de Escoamento de Base	
1	Modelo Mensal
2	Modelo de Recessão Exponencial
3	Modelo do Reservatório Linear
Modelos de Escoamento em Canais	
1	Modelo da onda cinemática
2	Lag (modelo de retardamento)
3	Modelo de Pulz
4	Modelo de Muskingum
5	Modelo Muskingum Cunge
6	Modelo de Confluência
7	Modelo de Bifurcação

Fonte: adaptado do manual HEC (2013)

2.8.2 Componentes do HEC-HMS

Para realizar o processo da modelagem hidrológica, o programa HEC-HMS se divide em três componentes importantes descritos a seguir; O modelo da bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle.

- **O modelo de Bacia**

O modelo de bacia representa a parte física da bacia hidrográfica, o usuário terá acesso à representação da mesma, e dos seus elementos hidrológicos por meio de ferramentas que traduzem esses componentes, o número desses componentes dependerá da quantidade de sub-bacias que o usuário determinar para o estudo. Cabe destacar que, para este processo pode ser utilizada a ferramenta HEC-GeoHMS¹²,

¹² *Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS)* ferramenta usada na plataforma de ArcGIS (HEC, 2013) que será descrita no capítulo da metodologia.

ferramenta que realiza um processamento para obter as características físicas da bacia a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), tendo como resultados as delimitações das sub-bacias, rede de drenagem, cálculos de declividades, longitudes centroides, entre outros, de acordo com os objetivos que o usuário definir. Dessa maneira, o modelo de bacia obtido do HEC-Geo-HMS, pode ser exportado com a linguagem própria para o programa HEC-HMS para dar início à modelagem hidrológica (Figura 2.5).

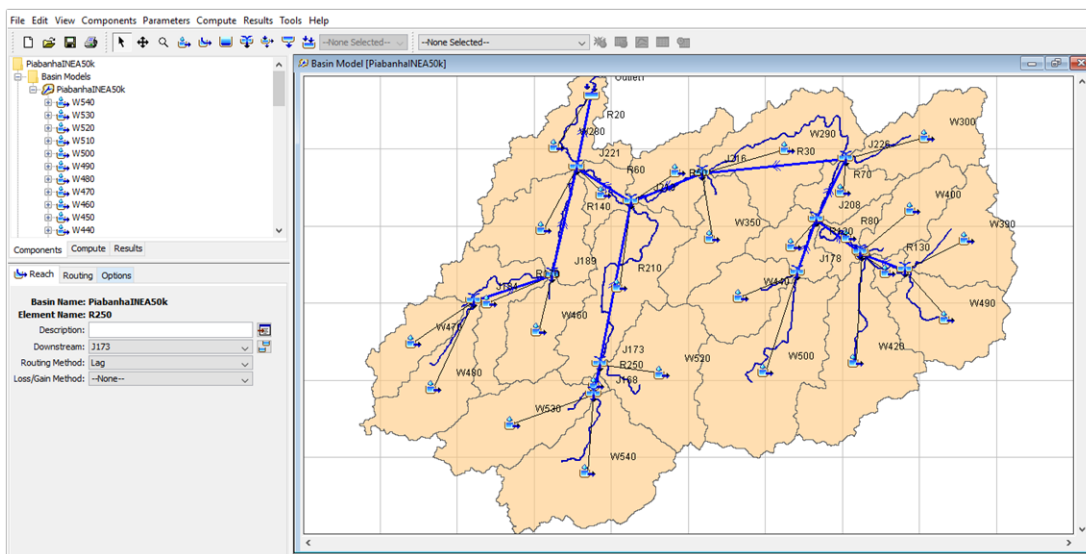


Figura 2.5 - Representação do modelo de bacia no HEC-HMS

Fonte: a partir da delimitação de bacias com a ferramenta HEC-GeoHMS

- **O modelo meteorológico:**

O modelo meteorológico é o encarregado de calcular a precipitação requerida numa sub-bacia de acordo ao método utilizado pelo usuário (e.g. Thiessen). Podem ser utilizados dados de estações pluviométricas pontuais ou de grelhas, o modelo meteorológico também inclui cálculos de neve e evapotranspiração. Os métodos para cálculo de evapotranspiração existentes no modelo meteorológico incluem a média mensal da evapotranspiração (um dos mais utilizados no HEC-HMS), o método de grelhas, e o método de Priestley Taylor.

- **Especificações de Controle:**

As especificações de controle são as que fixam o tempo de duração de cada simulação, nesta seção, o usuário especifica a data e hora de início e fim de cada simulação, além do intervalo de tempo requerido.

Uma vez escolhidos todos os modelos a serem utilizados, além da entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como os dados hidrometeorológicos, podem ser calculados e estimados os parâmetros necessários para os diferentes métodos selecionados. Esta tarefa pode resultar demorada e dependerá principalmente dos dados existentes na área em estudo.

Uma das vantagens do modelo HEC-HMS, é que podem ser escolhidas diferentes metodologias de cálculo para cada sub-bacia, i.e., se a área de estudo estiver dividida em várias sub-bacias, cada uma delas poderá escolher diferentes métodos para o cálculo do volume de escoamento, escoamento direto e para o cálculo de escoamento de base, dependendo dos dados disponíveis, dessa maneira, alguns autores caracterizam o modelo como semi-distribuído por apresentar esta vantagem (ZHANG et al., 2013; GAUTAM, 2014).

2.8.3 Calibração do Modelo

O processo de calibração no HEC-HMS está baseado principalmente nos parâmetros iniciais que correspondem em geral às características da bacia, e consiste na busca sistêmica dos valores dos parâmetros que proporcionam um melhor ajuste entre o hidrograma simulado e o observado. O processo recebe também o nome de otimização dos parâmetros.

A calibração no HEC-HMS pode ser manual ou automática, a manual, consiste nas modificações dos valores que podem ser realizadas em qualquer momento a critério do usuário, exigindo dele um conhecimento tanto das características da bacia quanto do funcionamento do programa, assim como da sensibilidade das respostas às modificações feitas. A calibração automática é baseada em funções objetivo e nos algoritmos de ajuste que podem ser escolhidos pelo usuário.

No HEC-HMS, a busca sistemática dos melhores (ótimos) valores dos parâmetros segue o procedimento ilustrado na Figura 2.6. Este procedimento começa com a coleta de dados. Para os modelos chuva-vazão, os dados necessários são séries de tempo de precipitação e vazão, para os modelos de propagação, as observações do fluxo de entrada e saída são necessários. O próximo passo é selecionar as estimativas iniciais dos parâmetros, como acontece com qualquer pesquisa, quanto melhor essas estimativas iniciais (o ponto de partida da pesquisa), mais rápida a pesquisa resultará em uma solução.

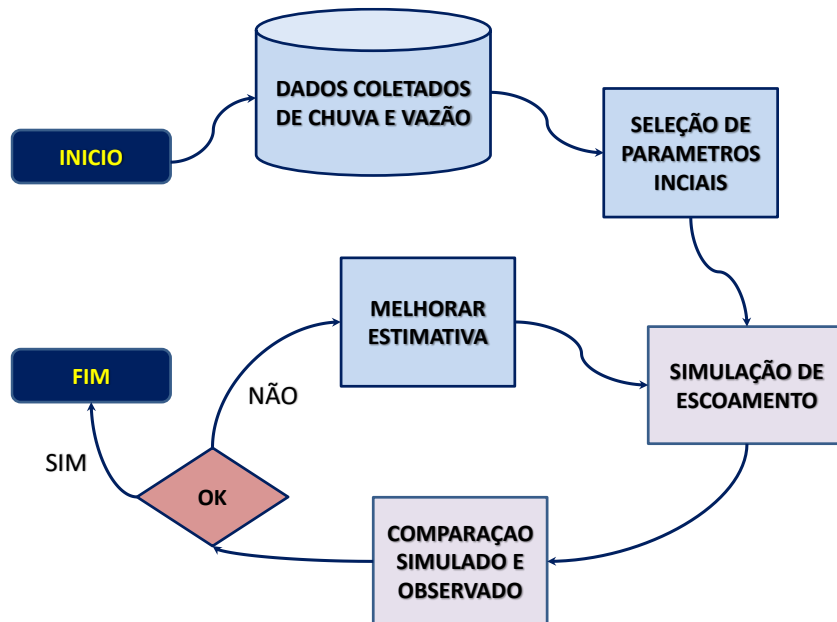


Figura 2.6 - Processo de calibração HEC-HMS

Fonte: adaptado do manual técnico HEC (2000)

Função Objetivo: As funções objetivo são expressões matemáticas ou métricas, que servem para determinar o maior ou menor ajuste entre o hidrograma simulado e o observado. O HEC-HMS descreve algumas funções objetivo, com a particularidade de algumas serem mais adequadas que outras nos diferentes tipos de situações que se apresentam.

- **Suma de Erros Absolutos:** Esta função objetivo compara cada ordenada do hidrograma simulado com a correspondente do hidrograma observado, designando como erro a diferença existente entre as mesmas. Entretanto, como as diferenças podem ser positivas ou negativas, uma soma simples permitiria que diferenças positivas e negativas se compensassem. Na modelagem hidrológica, tanto as diferenças positivas quanto as negativas são indesejáveis. Dessa maneira a função soma as diferenças absolutas, assim, esta função é implicitamente uma medida de ajuste das magnitudes dos picos, volumes e tempos de pico dos dois hidrogramas. Se o valor desta função é igual a zero, o ajuste é perfeito: todas as ordenadas do gráfico hidrográfico calculadas equivalem exatamente aos valores observados, é claro que isso raramente acontece. A função é apresentada na equação 2.1 a seguir.

$$Z = \sum_{i=1}^n |(q_o)(i) - q_s(i)| \quad (2.1)$$

em que:

Z: Função Objetivo;

n: Número de vezes em que é calculada a diferença das ordenadas;

qo(i): Vazão observada no instante i; e

qs(i) Vazão calculadas no instante i.

- **Soma dos resíduos quadráticos:** Esta função objetivo é comumente usada para a calibração, também compara todas as ordenadas dos hidrogramas, simulado e observado, porém usa as diferenças quadráticas como a medida de ajuste. Esta função também é uma medida da comparação das magnitudes dos picos, volumes e tempos de pico dos dois hidrogramas. A equação 2.2 apresenta o cálculo de esta função.

$$Z = \sum_{i=1}^n [(q_o)(i) - q_s(i)]^2 \quad (2.2)$$

em que:

Z: Função Objetivo;

n: Número de vezes em que é calculado o quadrado da diferença das ordenadas;

qo(i): Vazão observada no instante i; e

qs(i): Vazão calculadas no instante i.

- **Erro porcentual de pico:** Esta função objetivo mede o ajuste do pico do hidrograma calculado para o pico observado, essa função quantifica o ajuste como o valor absoluto da diferença expressada em porcentagem, dessa maneira, superestimar e subestimar são igualmente indesejáveis. A função não reflete erros de volume ou tempo de pico. Esta função objetivo é uma escolha lógica se a informação necessária para a concepção ou planejamento estiver limitada ao pico de vazão ou às fases de pico. A função é apresentada na equação 2.3.

$$Z = 100 \left| \frac{q_{sp} - q_{op}}{q_{op}} \right| \quad (2.3)$$

em que:

Z: Função Objetivo;

q_{op} : Vazão de pico observada; e

q_{sp} : Vazão de pico calculada.

- **Erro quadrático médio ponderado:** Esta função objetivo considera o quadrado da diferença das ordenadas em cada um dos instantes (i) usados para definir o hidrograma, posteriormente multiplica cada um desses valores por um coeficiente de ponderação. O coeficiente de ponderação assignado a cada ponto é proporcional à magnitude da ordenada, i.e., à magnitude da vazão, de maneira que, para vazões maiores à média das vazões observadas, o coeficiente é maior a um (1), caso contrário, será menor que um (1). Posteriormente, somam-se os valores quadráticos ponderados e se dividem pelo número de pontos utilizados para definir o hidrograma e finalmente se aplica a raiz quadrada. A equação desta função é apresentada como equação 2.4

$$Z = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(q_o)(i) - q_s(i)]^2 \left(\frac{q_o(i) + q_{om}}{2q_{om}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

em que:

Z: Função Objetivo;

n: Número de vezes em que é calculada a diferença das ordenadas;

$q_o(i)$: Vazão observada no instante i;

$q_s(i)$ Vazão calculada no instante i; e

q_{om} : Vazão média das vazões observadas nos diferentes instantes.

2.8.4 Aplicações do modelo HEC-HMS

Na literatura existem vários trabalhos com aplicação do modelo HEC-HMS em bacias de diferentes características no mundo inteiro. A distribuição gratuita do software faz com que este seja amplamente utilizado, no entanto, a maioria dos trabalhos existentes, são para simulações de eventos isolados, ou seja, simulações de poucas horas ou de poucos dias, a modelagem de processos contínuos ou de longo termo com HEC-HMS, como a proposta neste trabalho, é mais limitada.

O programa HEC-HMS foi criado inicialmente para a modelagem de eventos, a modelagem contínua veio depois e tem sido mais desenvolvida nos últimos anos. No Brasil o modelo para processos contínuos é pouco aplicado se comparado com outros países, na América Latina, Peru, Colômbia, México e Cuba apresentaram aplicações, países da Ásia, da Europa e dos Estados Unidos, apresentam também diversos estudos com o HEC-HMS.

É interessante mencionar que o modelo já foi utilizado em bacias de países tropicais, Silva, Weerakoon e Herath (2014), aplicaram o modelo de forma contínua e também pontual na bacia do rio Kelani em Sri Lanka, o rio nasce aproximadamente numa altitude de 2250 m acima do nível médio do mar. A calibração dos parâmetros foi feita para um evento de alta pluviosidade e validada com outros eventos de precipitação similar. Os parâmetros de escoamento direto e vazão de base inicialmente calibrados foram utilizados também na modelagem contínua. Os resultados mostraram a capacidade de HEC-HMS para reproduzir vazões na bacia com elevada precisão, que foi verificada com o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe¹³ (NSE) de 0,91 para simulações baseadas em eventos e 0,88 para simulações contínuas. O estudo demonstrou potencial na aplicação do HEC-HMS no controle de enchentes e gestão de águas em bacias hidrográficas de médio porte.

Na mesma região tropical, na bacia do rio Attanagalu Oya, Halwatura e Najim (2013) utilizaram o HEC-HMS com dados de precipitação diária e evapotranspiração mensal de cinco estações com série histórica de vinte anos. O modelo foi calibrado com métodos diferentes, tais como; o método Curva Número do *Soil Conservation Service* (SCS) e Taxa de déficit constante, apesar do primeiro não ser considerado no Manual técnico do programa como método para modelagem de processos contínuos. Para escoamento direto, foram usados os métodos de hidrograma unitário de Snyder (HU Snyder) e o hidrograma unitário de Clark (HU Clark). Os métodos foram testados estatisticamente sendo o HU Snyder apresentou um melhor desempenho do que o HU Clark. Da mesma maneira o método de perdas Taxa de déficit constante, se adequou mais a realidade do que o método da Curva Número SCS, confirmando que este último não é adequado para processos contínuos.

Azmat et al. (2016), comparam o modelo HEC-HMS e o modelo SRM (*Snowmelt-Runoff*) para realizar simulação contínua de chuva e neve na bacia do rio Jhelum em Paquistão, a bacia varia desde os 300 m até 6189 m, acima do nível médio do mar.

¹³ Nash Sutcliffe (NSE): Coeficiente de eficiência estatística (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

Foram utilizados dados de precipitação do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e dados de neve adquiridos a partir do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Para a calibração, foram usados cinco anos de dados observados de vazão e para a validação foi utilizada uma série de três anos. O método para cálculo de volumes de escoamento, foi o método da Taxa de déficit constante, junto com o hidrograma unitário do *Soil Conservation Service* (HU SCS) para o cálculo de transformação de chuva em vazão, a vazão de base foi calculada com o método de vazão constante mensal. Ambos modelos apresentaram resultados similares aos dados observados, no entanto, o SRM precisou de menos parâmetros do que o HEC-HMS.

Verma, Jha e Mahana (2009), aplicaram dois modelos chuva-vazão diferentes para a bacia alta do rio Baitarani ao leste da Índia usando dados diários de chuvas nos meses de Julho a Outubro com uma série histórica de seis anos (1999-2005) nos mesmos meses (monção). Os modelos utilizados foram o HEC-HMS e o Modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), no HEC-HMS foram escolhidos para o cálculo de volume de escoamento, o método de Curva Número do SCS, para escoamento direto o HU do SCS e para escoamento base o método de recessão. O estudo concluiu que o modelo HEC-HMS foi superior ao modelo WEPP para simulação de vazão diária na bacia.

Bashar, e Zaki (2005) buscaram avaliar a performance do algoritmo SMA (*Soil Moisture Accounting*) no HEC-HMS por meio da simulação contínua com dados de chuvas e vazões diárias, no período 1990 a 1996 na bacia do Nilo Azul, a calibração foi para o período de 1990 até 1994 e a validação até 1996. As conclusões do estudo foram positivas, apesar do modelo ser concentrado, apresentou um desempenho muito bom segundo os autores, com índice de eficiência de 90%. Os autores também recomendaram o uso da ferramenta HEC-GeoHms para os cálculos das características da bacia, além de uso de imagens de satélite para confirmar alguns parâmetros.

Singh e Jain (2015) utilizaram o modelo HEC-HMS com o método de cálculo de volume de escoamento de processos contínuos SMA (*Soil Moisture Accounting*) para a bacia do rio Vamsadhara na Índia. A espacialização das sub-bacias foi a mais reduzida possível por tratar-se de uma bacia com muita heterogeneidade em termos de topografia, uso e tipo de solo. O modelo foi calibrado para dados desde 1984 até 1989 e foi validado para o período de 1990 até 1993. Para a entrada do modelo usou-se evapotranspiração média mensal para toda a bacia, para o método de escoamento direto foi utilizado o método do HU de Clark e o fluxo base foi calculado com o método de recessão. Para o período de calibração, o desempenho do modelo apresentou um

coeficiente NSE de 0,701, já no período da validação, o coeficiente de eficiência NSE foi de 0,762. Os resultados na modelagem da bacia foram considerados bons.

Outra aplicação com o modelo SMA do HEC HMS foi a de Supe, Taley e Kale (2015) que modelaram uma bacia na Índia, a bacia do rio Wan, como método de transformação utilizaram o HU de Clark e para vazão de base, o modelo do reservatório linear. Para a simulação foram utilizados dados de 2000 a 2013, o período da calibração foi de junho de 2004 até Maio de 2007 e o período da validação foi de Junho de 2012 até dezembro de 2013 Os resultados foram considerados muito bons, apresentando um coeficiente de eficiência NSE de 0,93.

Razmkhah et al. (2016) usaram o HEC-HMS para modelar fluxos diários de uma sub-bacia pertencente à bacia Karoon (Karoon III), uma das mais importantes do Golfo Persico. A bacia tem uma variação de altitudes de 700 m até 4409 m acima do nível do mar, sendo que aproximadamente 50% da bacia está acima dos 2500m. A modelagem foi feita com o Algoritmo SMA e o modelo mostrou um desempenho satisfatório medido pelo coeficiente de NSE, tendo como valores 0,76 e 0,64 para a calibração e verificação respectivamente.

García et al. (2008) analisaram vazões de doze pequenas bacias pouco monitoradas no norte da Espanha em Cantabria utilizando o modelo HEC-HMS. O modelo escolhido para o cálculo do volume de escoamento foi o SMA por ser modelagem contínua, também foi utilizado o HU de Clark e o método LAG para o cálculo do escoamento direto e a vazão de base foi calculada usando o modelo de reservatório linear. Os resultados da modelagem se mostraram bons, o coeficiente de eficiência NSE teve resultados maiores 0,54 em na maioria das bacias.

Dariane, Javadianzadeh e James (2016) desenvolveram por meio de algoritmos genéticos (GA) uma nova metodologia para calibração automática de neve no modelo HEC-HMS (HMS-GA), devido ao mesmo não apresentar muita eficiência nas metodologias de calibração automática disponíveis, principalmente para modelagem de processos contínuos de neve. A metodologia foi avaliada usando dados diários em bacias de Ajichai ao noroeste de Iran. Os resultados apresentaram uma melhoria significativa na calibração automática aplicando o HMS-GA, no entanto chegaram à conclusão de que a calibração manual continua sendo tendo melhores resultados.

Gautam (2014) aplicou o HEC-HMS para calcular a descarga no rio Nayarani na bacia Gandaki em Nepal. O trabalho teve como objetivo a verificação da vazão de pico além da propagação da onda de cheia, as metodologias utilizadas foram, muskigum

cunge e o método da onda cinemática. Para a obtenção dos parâmetros do canal e delimitação de sub-bacias o autor fez uso das ferramentas; HEC-GeoRAS e HEC-Geo-HMS respectivamente, na plataforma de ArcGIS. Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que o coeficiente de eficiência de NSE foi acima de 0,8 para todos os casos.

Estudos realizados com o modelo HEC-HMS no Brasil, em sua maioria, referem-se à simulação de eventos de cheias de horas ou de alguns dias. Poucos estudos foram identificados para processos de chuva-vazão de longo termo, entre eles, destaca-se o trabalho de Ribeiro Neto et al. (2015), estudo em que foi feita uma comparação de uso do modelo contínuo para reproduzir uma cheia que aconteceu em Pernambuco no ano 2010. Os autores constataram, nesta comparação, que a simulação contínua em HEC-HMS não apresenta uma boa calibração dos parâmetros tanto para períodos chuvosos como secos, tendo que ser realizada em dois processos.

Cabral et al. (2015) aplicaram o modelo HEC-HMS de forma contínua para o semiárido brasileiro. O método utilizado foi o SMA na série histórica de 1979 a 2010 em escala mensal obtendo coeficiente de NSE de 0,89 e 0,69 nas fases de calibração e validação concluindo que houve um bom desempenho para dados mensais.

CAPITULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização física da bacia hidrográfica e do sistema de drenagem constitui uma das etapas iniciais, para a maioria dos estudos hidrológicos. Tradicionalmente, tais informações eram preparadas manualmente a partir de mapas topográficos impressos. Atualmente, ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido empregadas para obter as mesmas informações a partir do processamento automático de dados de elevação do terreno.

3.1 Aspectos gerais e localização da bacia do rio Piabanha

A bacia do rio Piabanha, encontra-se inserida na bacia do rio Paraíba do Sul pertencente à região hidrográfica Atlântico Sudeste (divisão hidrográfica nacional estabelecida pela Resolução n° 32, de 15 de outubro de 2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos CNRH). A região hidrográfica Atlântico Sudeste é conhecida nacionalmente pelo elevado contingente populacional e pela importância econômica de sua indústria. No entanto, o grande desenvolvimento da região é motivo de problemas em relação à disponibilidade de água, já que, apesar de ser uma das regiões com maior demanda hídrica do país, possui uma das menores disponibilidades relativas (LOU, 2010).

Fazendo parte integral do estado do Rio de Janeiro (Figura 3.1), estado com o segundo maior PIB do país¹⁴, a bacia do rio Piabanha abarca também um dos municípios mais importantes da Região Serrana, o município de Petrópolis, este por sua vez, destacado pelo alto Índice de desenvolvimento Humano IDH = 0,804 e pela densidade demográfica elevada, aproximadamente 371,8 hab.km⁻² (IBGE, 2010). A bacia do rio Piabanha, abrange também os municípios de Teresópolis, Areal, São Jose do Vale do rio Preto, Paraíba do Sul, Paty do Alferes e Três Rios (Figura 3.2), sumarizando uma área total de 2065 km² com uma população aproximada de 625 mil habitantes (DE PAULA, 2011).

Na Tabela 3.1 são apresentados alguns dados relativos à população tanto do estado do Rio de Janeiro quanto dos municípios que se encontram totalmente ou quase totalmente inseridos na bacia em estudo¹⁵.

¹⁴ Sendo São Paulo o estado que apresenta o maior PIB do Brasil.

¹⁵ O Município de São Jose do Vale do Rio Preto tem uma pequena porção fora da área da bacia.

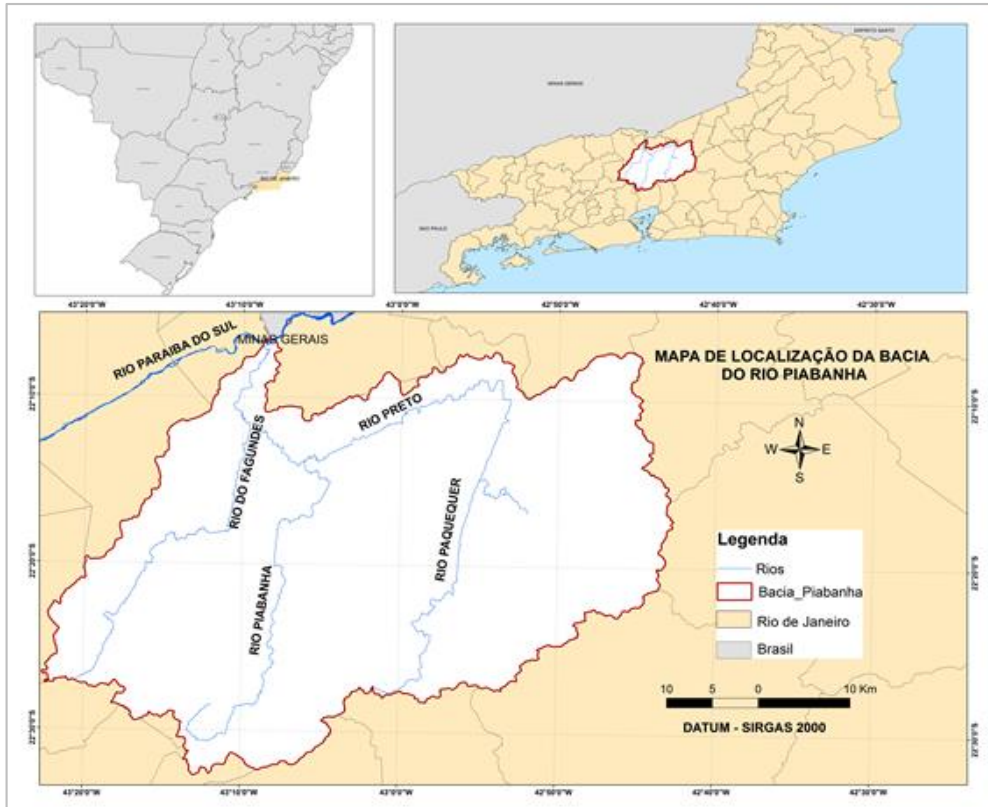


Figura 3.1– Localização da bacia do rio Paraíba do Sul e Piabanha

Fonte: a partir de dados do IBGE

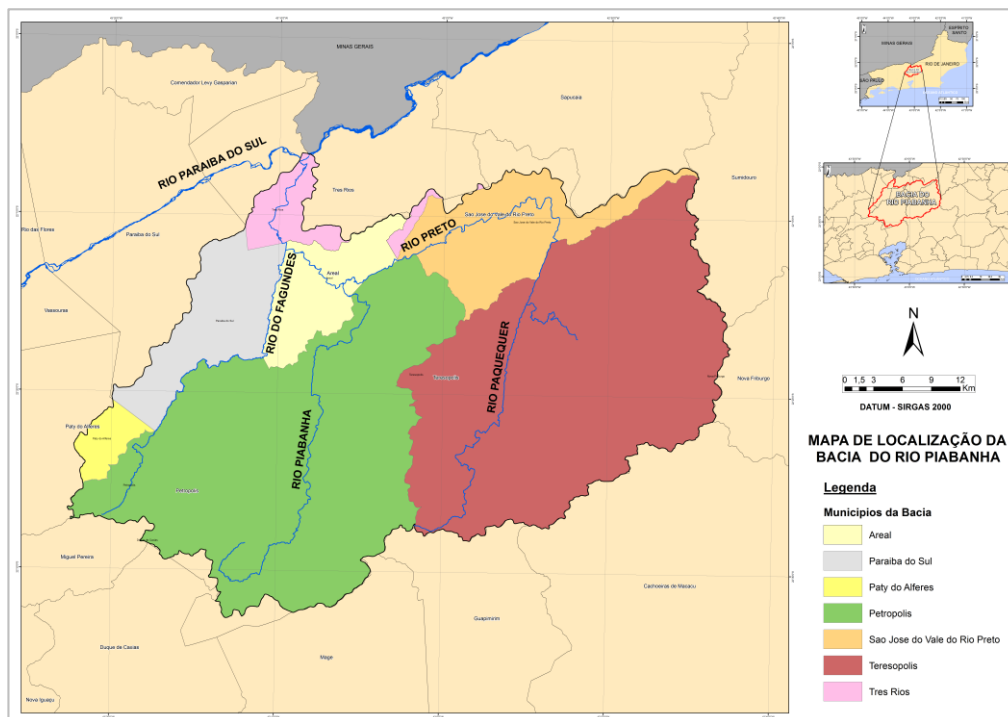


Figura 3.2 – Mapa de municípios que conformam a bacia do rio Piabanha

Fonte: elaborado a partir de dados e bases do IBGE

Tabela 3.1 – População e Produto Interno Bruto per capita

	População 2010	PIB Per capita ¹⁶ (R\$)-2010	PIB Per capita (R\$)-2013
RIO DE JANEIRO	15.989.929	28.127	38.262
Municípios mais importantes do Piabanha			
Petrópolis	295.917	24.442,12	31.753,67
Teresópolis	163.746	17.792,18	23.446,27
Areal	11.423	26.311,03	20.635,01
São José do Vale do Rio Preto	20.251	29.558,67	16.499,12

Fonte: adaptado de IBGE (2011)

3.2 Características físicas da bacia

A bacia do rio Piabanha está inserida na Mata Atlântica com peculiar vegetação formada por montanhas, vales, rios e variadas espécies de fauna e flora. Nos últimos anos a bacia apresentou uma degradação ambiental devido ao modelo de desenvolvimento urbano e rural adotado, a ocupação desordenada potencializa as limitações naturais, o desmatamento promove constantes mudanças na paisagem, alterando a biodiversidade da bacia e provocando constantes problemas ambientais.

3.2.1 Hidrografia da bacia

O rio principal da bacia é o rio Piabanha que nasce na Serra do Mar a aproximadamente 1.546 metros de altitude na Pedra do Retiro em Petrópolis (Figura 3.3). O rio Piabanha tem uma extensão aproximada de 80 km e percorre Petrópolis cuja população se concentra nas margens e estreitos vales ao longo do rio e seus primeiros afluentes (DE PAULA, 2011).

Os principais afluentes do rio Piabanha são os rios Paquequer e Preto pela margem direita, e Fagundes pela margem esquerda. O rio Paquequer com 37 km de extensão, banha Teresópolis em seu trecho inicial, e é o formador do rio Preto, considerado o maior afluente do rio Piabanha, o rio Preto com 54 km de curso, nasce na Serra dos Órgãos e percorre a cidade de Teresópolis e São José do Vale do Rio Preto (KLING, 2005).

As principais sub-bacias da bacia do rio Piabanha são constituídas pelas bacias dos rios tributários; Preto, Quitandinha, Itamarati, Poço Ferreira e Santo Antônio, pela margem direita, e Araras e Fagundes pela margem esquerda.

¹⁶ Os dados do Produto Interno Bruto dos Municípios para o período de 2010 a 2013 (série revisada) têm como referência o ano de 2010, seguindo, portanto, a nova referência das Contas Nacionais (IBGE, 2010)



Figura 3.3– Ponto aproximadamente a 500 m das nascentes do rio

A bacia do rio Preto constitui a maior entre as sub-bacias do rio Piabanha, abrangendo a totalidade do município de Teresópolis. Com uma área de drenagem de 1.053 km², o rio Preto apresenta vazões, no ponto de confluência com o rio Piabanha, da mesma ordem de grandeza das vazões do próprio Piabanha, especialmente no período de estiagem. A sub-bacia do rio Preto sofre grande influência de áreas urbanas e atividades industriais diversas, o que reflete diretamente na qualidade de suas águas. A presença de aproveitamentos hidrelétricos, como a UHE Morro Grande (20 MW), no município de Areal interfere fortemente no regime de vazões do rio, por conta do represamento de suas águas.

A sub-bacia do rio do Fagundes que possui 364 km² de área fica em segundo lugar em termos de área de drenagem. O rio Fagundes conflui com o rio Piabanha próximo de sua foz, no município de Três Rios. Suas vazões são da mesma ordem de grandeza que as do Piabanha. A ocupação da bacia do rio do Fagundes é predominantemente rural, com presença de pastagens e pequenos núcleos urbanos. Neste rio existe uma usina hidrelétrica, a poucos quilômetros de sua confluência com o rio Piabanha, denominada UHE Coronel Fagundes (6MW). Esta UHE é do tipo fio d'água e, apesar de dispensar o represamento das águas, ocasiona uma expressiva redução das vazões do rio do Fagundes.

As sub-bacias do rio Poço do Ferreira, e Santo Antônio (Figura 3.4) são fortemente caracterizadas pela ocupação rural. A sub-bacia do rio das Araras, com 111 km² de área de drenagem, é constituída predominantemente por áreas de preservação da cobertura vegetal, como a Reserva Biológica de Araras que abriga a nascente do rio das Araras. Por estar em uma bacia protegida e em função da sua área de drenagem, este rio contribui com vazões expressivas que influenciam positivamente na qualidade da água

do rio Piabanha, no ponto de sua confluência em Petrópolis. As sub-bacias dos rios, Quitandinha e Itamarati, são predominantemente urbanas. Estes rios, localizados no município de Petrópolis, drenam áreas de elevada ocupação populacional que contam com precária infraestrutura de saneamento (DE PAULA, 2011).



Figura 3.4 – Obras no rio Santo Antônio

3.2.2 Geomorfologia

A área de estudo se insere na Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos. Esta região apresenta um quadro morfológico relacionado aos efeitos de um tectonismo regional e de sucessivas fases erosionais com áreas resultantes de desdobramentos, reativações de falhas e remobilização de blocos. A topografia na parte superior da bacia reflete esses condicionamentos geológicos predominantes e são registrados vales alongados, segmentos de drenagem retilíneos, maciços graníticos, linhas de cristas e cumeadas paralelas, relevos com grandes desníveis altimétricos, escarpas íngremes e alveolos intermontanos (GUERRA et al., 2007).

Os Reversos da Serra do Mar, pela sua localização, extensão e posição geográfica, apresentam formas de uso e ocupação inadequadas como desmatamentos e desenvolvimento de atividades agropecuárias e urbanas em núcleos intermontanos, expandindo-se às vertentes íngremes. O ambiente de Formação Montana se estende sobre litologia pré-cambriana, em formação de Latossolos, Podzólicos, Cambissolos e subordinadamente Litossolos com afloramentos rochosos nas vertentes mais íngremes, normalmente ocupando locais de difícil acesso, quase sempre constituindo áreas de preservação ambiental (COPPE-UFRJ 2010).

A bacia apresenta de modo geral relevo montanhoso (Figura 3.5) e muito acidentado no curso superior e médio, com afloramentos rochosos e altitudes que ultrapassam os 2.000 m. O domínio Montanhoso ocupa cerca de 50% da bacia,

enquanto o domínio de Pães de Açúcar e Morros elevados ocupa mais 17,8% da área, na porção leste, totalizando mais de 67% de áreas montanhosas (GONÇALVES, 2008).

Quanto a declividade na parte superior da bacia, Petrópolis, Guerra et al., (2007) obtiveram as seguintes porcentagens para a área: 3-8% (3,84%), 8-20% (9,72%), 20-45% (22,9%), 45-75% (35,7%) e superiores a 75% (26,53%), mostrando o predomínio do relevo montanhoso e escarpado.

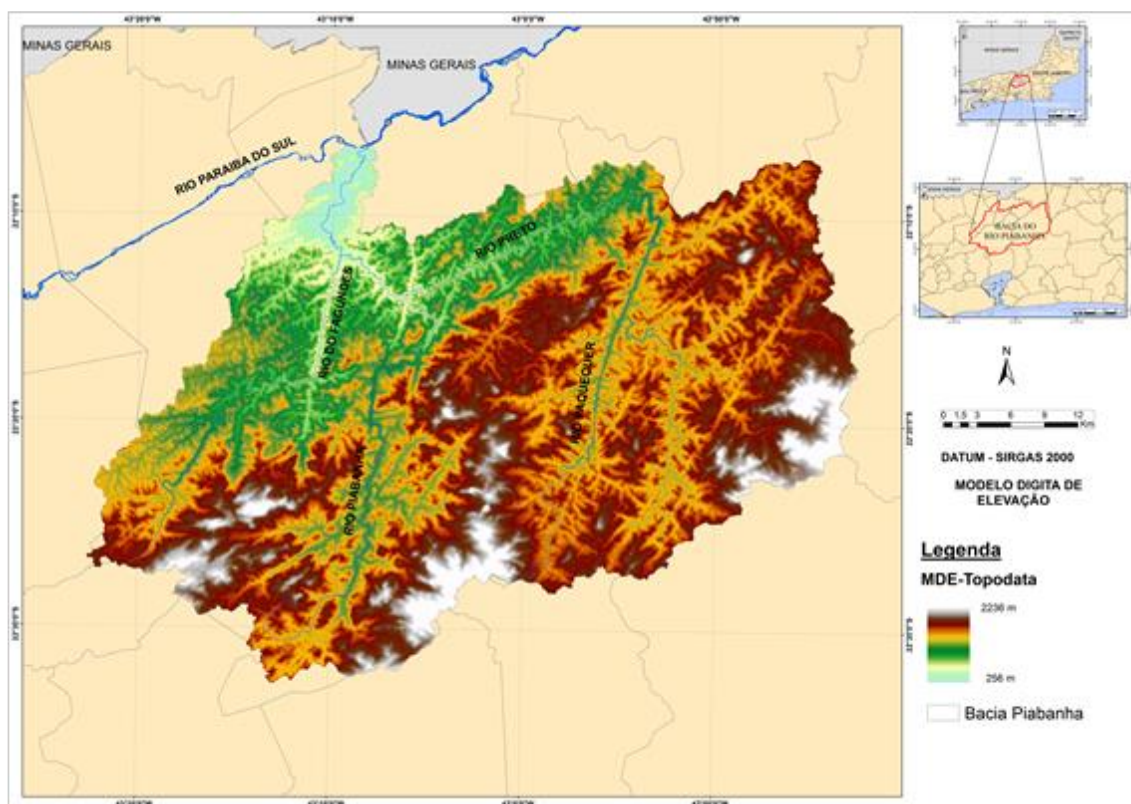


Figura 3.5 – Modelo Digital de Elevação - MDE

Fonte: elaborado a partir do MDE do INPE (2011)

As fortes restrições à ocupação dadas pelo relevo são a principal razão do nível relativamente alto de cobertura florestal natural da bacia do Piabanha (mais de 30%), se comparado com a média das sub-bacias do Paraíba do Sul (11%). Apesar da expressiva cobertura florestal, as condições de relevo e solos e a elevada pluviosidade resultam em alta vulnerabilidade à erosão na maior parte da bacia do Piabanha.

Os intensos processos erosivos da sub-bacia do rio Preto se refletem no assoreamento do reservatório situado entre Areal e São José do Rio Preto, Morro Grande, utilizado para abastecimento de água e geração de energia pela Ampla S/A (Figura 3.6). Estudos realizados há 10 anos atrás pelo DRM-RJ (Departamento de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro) indicavam que o

reservatório (na época com cerca de 40 anos de existência) já havia perdido mais de 50% de sua capacidade de armazenamento (GONÇALVES, 2008).

3.2.3 Clima

A localização da bacia em estudo, nas proximidades do trópico, confere-lhe uma forte radiação solar criando, dessa maneira, melhores condições à evaporação. Entretanto, a posição tropical e a proximidade da superfície oceânica não explicam por si só a elevada pluviosidade da região (NIMER, 1989).

A esses fatores que criam pré-condições à precipitação, estão associados, mecanismos dinâmicos de massas de ar polares, oceânicas, linhas de instabilidade e fatores estáticos orográficos proporcionados pela orientação SO/NE da Serra do Mar. Esse posicionamento expõe a região ao fluxo meridional de ar frio, oriundo do Pólo Sul sobre as águas quentes oceânicas, assegurando-lhe ainda maior frequência de invasão de frentes frias e de linhas de instabilidade tropical. A sua topografia bastante acidentada, que é proporcionada por rochas cristalinas do Escudo Brasileiro, aumenta a turbulência do ar pela ascendência orográfica, favorecendo as precipitações.

Nas encostas íngremes, a pluviosidade média anual ultrapassa os 2.000 mm, como nas cidades de Petrópolis e Teresópolis. Nas proximidades dos municípios de Areal e São José do Vale do Rio Preto, a média pluviométrica decresce abruptamente para 1.300 mm, com períodos secos e déficits hídricos bastante pronunciados (COPPE- UFRJ, 2010).

A distribuição das precipitações ao longo do ano identifica um período chuvoso de novembro a março, sendo o mês mais úmido janeiro e o mês mais seco julho, as chuvas voltam a ocorrer no início do mês de agosto (DE PAULA, 2011, LOU, 2010 e GONÇALVES, 2008).

Nos verões muito chuvosos, o trimestre de dezembro-janeiro-fevereiro ou janeiro-fevereiro-março exprimem um grande volume de água precipitado que, muitas vezes é acompanhado de inúmeras consequências físicas e sociais. Tais verões são caracterizados não apenas por um elevado número de ocorrência diária de chuvas, mas ainda por intensos aguaceiros de notável concentração/hora (NIMER, 1989).

Os fatores dinâmicos e estáticos determinam para a região um clima tropical de altitude do tipo Cwb¹⁷, com altos índices pluviométricos, umidade relativa de 80%, e com uma temperatura média anual que oscila entre 18°C e 24°C, quente e úmido, com

¹⁷ Segundo a classificação de Köppen, clima Cwb: clima temperado úmido com Inverno seco e Verão temperado

variações determinadas pelas diferenças de altitude e entradas de ventos marinhos (KLING, 2005). A região mais baixa, tanto pelo efeito adiabático como pela continentalidade, está condicionada a amplitudes térmicas distintas de inverno e verão de um clima sub-úmido (COPPE-UFRJ, 2010).

3.2.4 Vegetação

Entre as grandes sub-bacias formadoras do rio Paraíba do Sul, a bacia do rio Piabanha, inserida no bioma Mata Atlântica¹⁸ é a que apresenta a maior cobertura florestal, estimada em mais de 20% de suas terras (COPPE-UFRJ, 2010). Este aspecto é evidenciado pela existência de inúmeras unidades de conservação dentro da bacia, tanto de uso sustentável quanto de proteção integral, na Tabela 3.2 são apresentadas as unidades de conservação que se fazem parte da bacia do rio Piabanha.

Tabela 3.2 - Unidades de conservação

UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE USO SUSTENTÁVEL		
AREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (A.P.A.)	AREA (ha)	MUNICÍPIO (RJ)
A.P.A. Floresta do Jacarandá	2.700	Teresópolis
A.P.A. Rio dos Frades	7.500	Teresópolis
A.P.A. de Petrópolis	59.049	Petrópolis, Duque de Caxias, Magé
UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE PROTEÇÃO INTEGRAL		
PARQUES NACIONAIS	AREA (ha)	MUNICÍPIO (RJ)
Parque Nacional da Serra dos Orgãos	20.024*	Petrópolis, Teresópolis, Magé
RESERVAS BIOLÓGICAS	AREA (ha)	MUNICÍPIO (RJ)
Reserva Biológica de Araras	-	Petrópolis
Reserva Biológica do Tinguá	26.000	Petrópolis, Nova Iguaçu, Miguel Pereira, Duque de Caxias
RESERVAS DA BIOSFERA	AREA (ha)	
Reserva da Biosfera	-	Remanescentes de Mata Atlântica, o "corredor de florestas" da Serra do Mar

* Área ampliada através do Decreto Federal em dezembro de 2008 (Pereira, 2009)

Fonte: adaptado e atualizado de: De Paula (2011) e Kling (2005)

A seguir será feita uma breve descrição da A.P.A de Petrópolis e do Parque Nacional da serra dos Orgãos, importantes Unidades de Conservação que ocupam a parte superior da bacia do rio Piabanha.

¹⁸ A Mata Atlântica abriga mais de 20 mil espécies de plantas, das quais 50% são endêmicas, ou seja, espécies que não existem em nenhum outro lugar do mundo. É a floresta mais rica do mundo em espécies de árvores por unidade de área, com 454 espécies identificadas em um único hectare no sul da Bahia (KLING, 2005).

A.P.A. Petrópolis

Petrópolis é uma das quatro glebas disjuntas que constituem a APA Petrópolis, criada em 1982, pelo Decreto Federal 87.561, de 13/09/82 e oficializada em 1992. É a primeira APA federal criada no país, abrange parte dos municípios de Petrópolis, Magé, Duque de Caxias e Guapimirim, num total de 59.049 hectares. Na prática, funciona como um tampão que impede a degradação dos recursos naturais, uma vez que, 50% de sua área está coberta por Mata Atlântica. A Floresta Ombrófila Densa, com suas formações Submontana, Montana e Alto Montana, é a cobertura vegetal clímax da região, em estágios inicial, intermediário e avançado de sucessão secundária nas áreas antropizadas. Nos solos rasos e/ou junto aos afloramentos rochosos, a vegetação gramíneo-herbácea, arbustiva em alguns trechos, é identificada como vegetação rupestre (FNMA/INSTITUTO ECOTEMA, 2001).

Em função da Serra dos Órgãos, a APA Petrópolis tem sua hidrografia dividida em dois sistemas principais de drenagem: o primeiro, situado na encosta atlântica, é formado por cursos d'água pequenos e jovens, que nascem nos locais mais altos da Serra dos Órgãos e correm para a Baía de Guanabara. O segundo sistema localiza-se na encosta interna da Serra dos Órgãos e é constituído por rios que atravessavam grande extensão da APA, correndo para o rio Paraíba do Sul. Na vertente interna encontram-se os principais rios, com destaque para o principal deles, o Piabanha (BAPTISTA, 2005).

Parque Nacional da Serra dos Órgãos

O Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) abrange parte dos municípios de Teresópolis, Petrópolis, Guapimirim e Magé. Recentemente a área do Parque foi ampliada 11.000 ha para aproximadamente 20.024 ha, por meio do Decreto Federal assinado pelo atual Presidente Luís Inácio Lula da Silva em 13 de dezembro de 2008. É o terceiro parque mais antigo do Brasil, criado em 30 de novembro de 1939.

O Parque é contemplado por um generoso regime de chuvas, em torno de 2.000 a 2.500 mm anuais, um dos fatores decisivos para a perene exuberância de sua vegetação e para a riqueza das espécies que abriga. A temperatura no Parque, na Sede Teresópolis, varia entre 13 a 23° C, e temperaturas negativas nos pontos mais elevados do Parque. O relevo é fortemente montanhoso, sendo o trecho mais elevado da Serra do Mar, com altitudes variando de 200 até 2.263 metros. A cobertura florestal no PARNASO está bem conservada e é classificada como Floresta Ombrófila Densa. As formações florestais encontradas correspondem, em sua maioria, à florestas

secundárias em estado avançado de regeneração e algumas áreas de floresta primária (DIAS, 2009).

Desta maneira, pode-se constatar que os municípios de Petrópolis e Teresópolis apresentam o maior percentual relativo de território protegido (Figura 3.6), este aspecto é bastante positivo no sentido de proteção das nascentes do rio Piabanha e de alguns afluentes, que se encontram inseridos em áreas protegidas. No entanto, os outros municípios não possuem nenhum percentual de terras preservadas em seus territórios, evidenciando grande heterogeneidade espacial no que diz respeito à cobertura florestal conservada na bacia (DE PAULA, 2011).

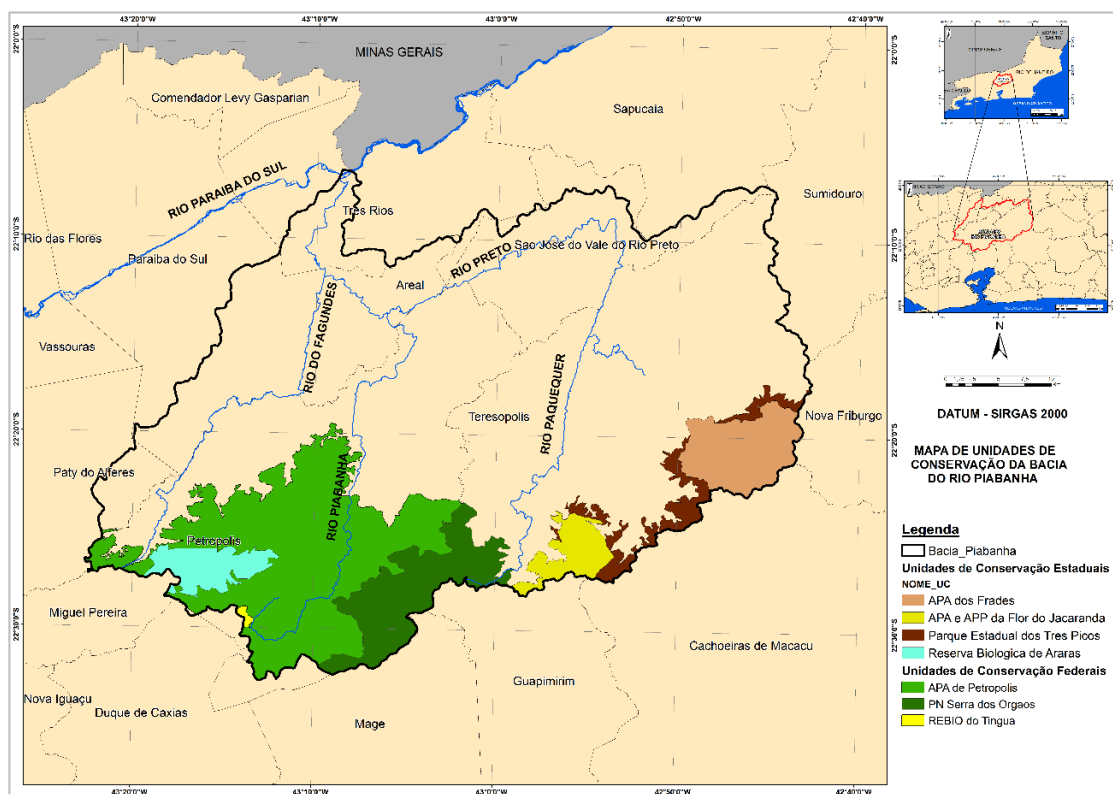


Figura 3.6 – Unidades de conservação

Fonte: elaborado a partir dos dados do INEA

Em relação à tipologia florestal na bacia do rio Piabanha, Kling (2005) mostra os tipos de vegetação predominantes nos municípios pertencentes à bacia do rio Piabanha apresentados na Tabela 3.3. Os municípios de Petrópolis e Teresópolis destacam-se por possuir as maiores áreas de remanescentes florestais.

Tabela 3.3 - Cobertura vegetal e uso do solo (ha)

MUNICIPIO	Floresta Ombrófila	Floresta Estacional	Vegetação Secundaria	Campo / Pastagem	Área agrícola	Reflorestamento	Área urbana	Outros
Petrópolis	23.564	-	17.692	11.812	-	72	3.732	16.948
Teresópolis	30.180	-	34.424	8.788	1.336	-	1.832	2.408
São José do Vale do Rio Preto	5.084	-	7.552	8.780	-	-	68	2.500
Areal	112	-	5.576	5.220	-	-	58	184
Paraíba do Sul	-	800	19.924	33.684	152	-	36	3.388
Paty dos Alferes	1.284	40	9.944	17.596	24	2.600	104	256
Três Rios	20	-	8.500	21.932	16	-	892	972
Total	60.244	840	103.612	107.812	1.528	2.672	6.722	26.656
Porcentual	19,4	0,3	33,4	34,8	0,5	0,9	2,2	8,6

Fonte: adaptado de Kling (2005).

3.2.5 Uso do solo e ocupação da bacia

A bacia hidrográfica do rio Piabanha, reflete hoje, todo o processo histórico de ocupação, caracterizado pela descontinuidade dos ciclos econômicos, pelos desníveis sócio-econômicos regionais e pela degradação ambiental, com efluentes domésticos e industriais sem tratamento adequado, lixões, desmatamento e erosão, uso indevido e não controlado de agrotóxicos e falta de consciência ambiental (KLING, 2005). Os principais núcleos urbanos, Petrópolis e Teresópolis instalaram-se em regiões intermontanas, em fundo de vales nos exíguos terraços fluviais, por vezes atingindo as encostas íngremes expandindo-se pelos vales dos rios Piabanha e Preto, respectivamente.

Atualmente a proximidade com o Rio de Janeiro induz a um crescimento urbano acentuado e inadequado para as condições ambientais da bacia. O crescimento urbano faz com que além dos problemas de erosão das encostas e de inundação na calha dos rios, a qualidade dos recursos hídricos seja prejudicada pelo lançamento de esgotos in natura (GONÇALVES, 2008).

A concentração de populações de baixo poder aquisitivo em periferias carentes de serviços essenciais de saneamento contribuem para gerar poluição concentrada e problemas de drenagem agravados pela inadequada deposição de lixo, assoreamento dos corpos d'água e conseqüente diminuição das velocidades de escoamento das águas (KLING, 2005). Dessa maneira as contaminações constantes e excessivas dos recursos naturais causados por ações antrópicas comprometem a saúde dos ecossistemas e a qualidade de vida humana, deteriorando a capacidade natural de recuperação ambiental.

O uso Industrial é característico da bacia do rio Piabanha (mais de 50 indústrias de alto potencial poluidor) assim como, o uso agrícola e urbano coresponsáveis pela

erosão dos solos e degradação das águas. Predominam as culturas de ciclo curto (verduras e legumes) e não se verifica o uso de técnicas de conservação de solo, como terraceamento e plantio em curva de nível, apesar das fortes declividades e do potencial de erosão hídrica da região.

O nível de ocupação e a intensidade de uso das terras e das águas da bacia do rio Piabanha, representa, entre as sub-bacias do Paraíba do Sul, alta prioridade para a realização de ações de proteção e recuperação de florestas, solos e águas. Recomendam-se medidas rigorosas de restrição de uso, especialmente no curso superior do rio Piabanha e de seu afluente Preto, devendo receber prioridade máxima para a proteção das florestas, recuperação de áreas degradadas, planejamento e controle do parcelamento do solo urbano e dos usos da água, em geral, e do uso agrícola em especial (COPPE/UFRJ, 2002).

O mapa de uso e ocupação do solo cedido pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) elaborado pela SEA (Secretaria de Meio Ambiente) por meio do projeto Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Rio de Janeiro é apresentado na Figura 3.7, seguido do mapa de uso e cobertura de solos bacia do rio Piabanha, elaborado no âmbito do projeto EIBEIX (Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro) apresentado na Figura 3.8

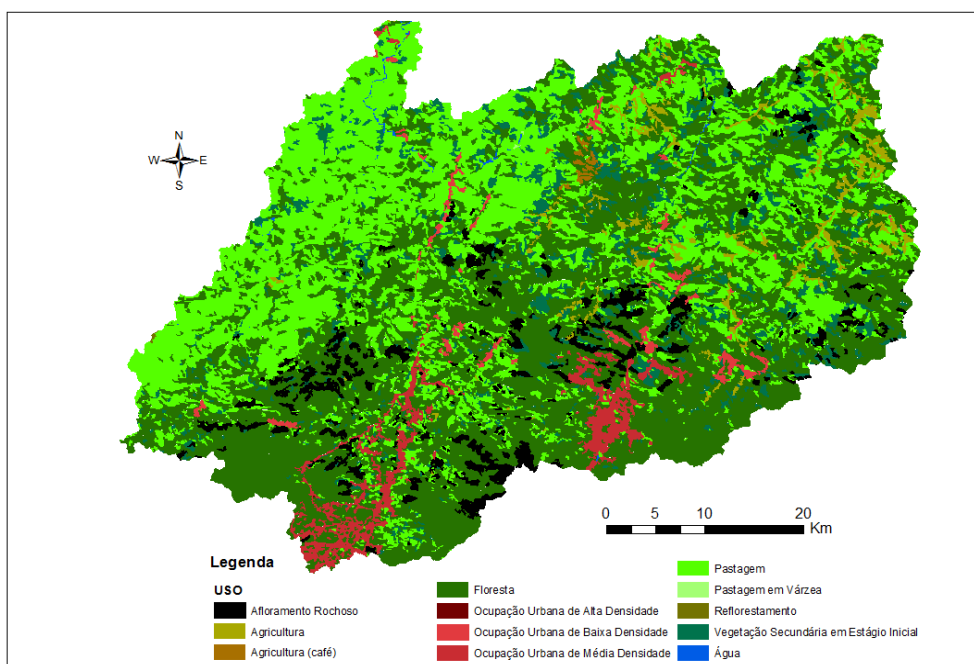


Figura 3.7 – Classes de ocupação e uso do solo da bacia rio Piabanha

Fonte: INEA/SEA (2011)

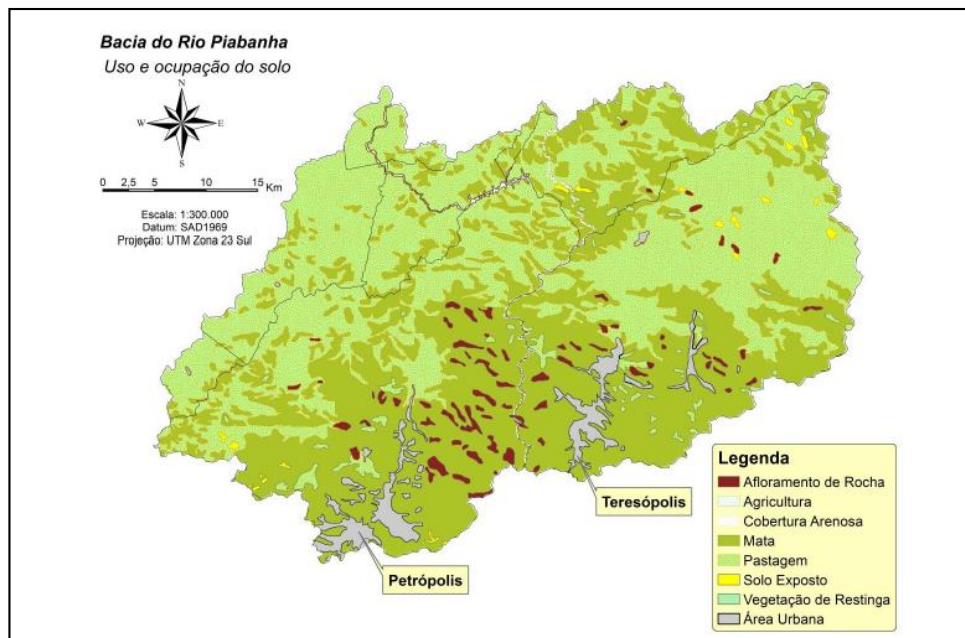


Figura 3.8 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Piabanha

Fonte: adaptado de COPPE (2010), elaborado por De Paula (2011).

A classificação de ambos os mapas é diferente, mas observa-se que, de acordo com os resultados obtidos no ZEERJ, as formações florestais são equivalentes à classe de uso Mata na Figura 3.8 que são as predominantes.

O estudo realizado por Baptista (2005), relacionado à A.P.A. de Petrópolis apresenta a classificação de imagens para os anos de 1985, 2001 e 2004, mostrando o processo de alterações no uso e ocupação do solo no período 1985–2004 (Figura 3.9), concluindo que mais do 50% da área de proteção ambiental se encontra ainda com cobertura vegetal natural, composta em sua maioria por extensos fragmentos florestais, correspondentes à classe “Formações Florestais”.

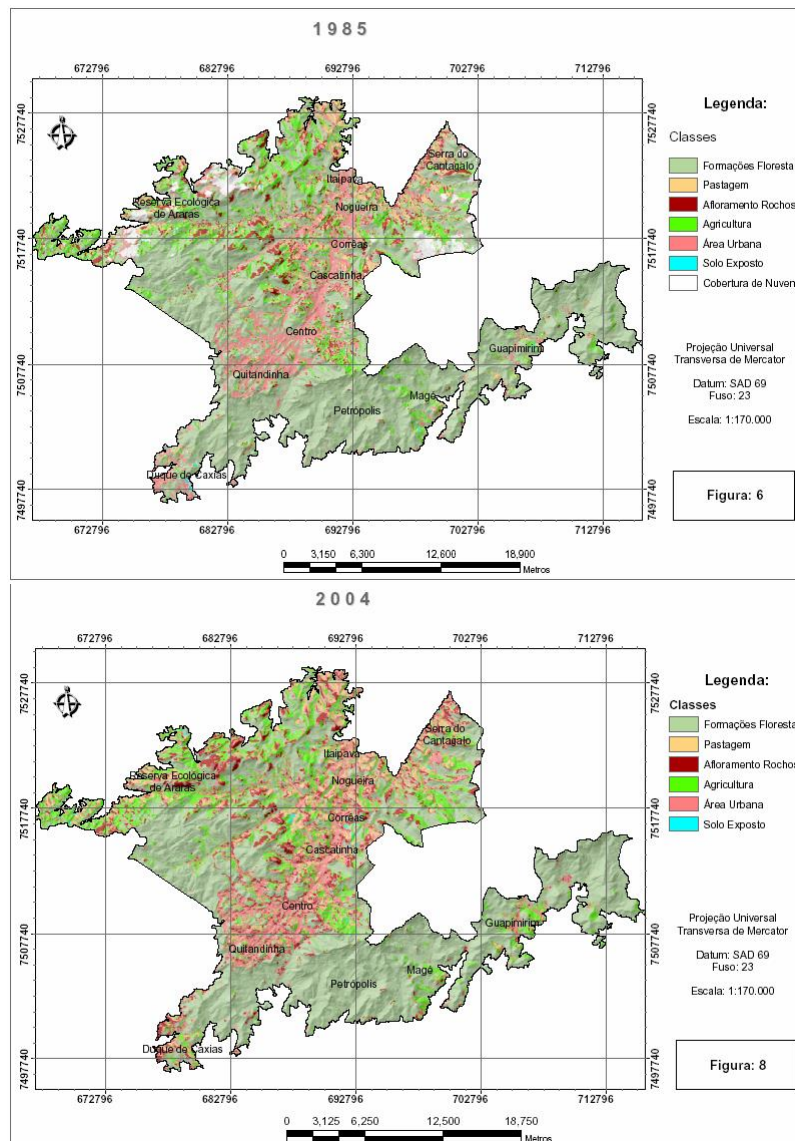


Figura 3.9 - Alterações no uso e ocupação do solo no período 1985–2004.

Fonte: Baptista (2005)

3.3 Estudos realizados na área da pesquisa

Os estudos existentes relacionados com a bacia do rio Piabanha, estão vinculados a alguns órgãos gestores dos recursos hídricos, dentre os quais se destaca o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul (COPPE/UFRJ, 2006), aprovado pelo CEIVAP (Comitê de Integração da Bacia do Paraíba do Sul). Diferentes estudos, principalmente de cunho acadêmico e com diferentes objetivos foram desenvolvidos na área da bacia experimental do rio Piabanha, Araújo (2016) descreve a finalidade da bacia experimental no seguinte parágrafo:

A finalidade da bacia experimental do Piabanha é funcionar como um laboratório de pesquisas, em escala de bacia hidrográfica, para teste de equipamentos e métodos de aquisição de dados, e experimentação de modelos hidrológicos e metodologias de análise hidrológica para a Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE e IGEO/UFRJ), a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – Serviço Geológico do Brasil (SGB), a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), o Instituto Estadual do Ambiente (INEA/RJ), e, mais recentemente também, para a Escola Politécnica, o Instituto de Biofísica, o Museu Nacional, e o Programa de Ecologia, todos da UFRJ, e para o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), a Universidade Federal Fluminense (UFF) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (ARAUJO, 2016 p.11)

O monitoramento da bacia do rio Piabanha como mencionado por Araújo (2016), teve início em dezembro de 2006 com o Projeto EIBEX-I - Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro, apoiado pela Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO - Bacias Representativas 04/2005, que teve, como executora, a COPPETEC-COPPEUFRJ e, como colaboradores, IGEO/UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA).

Nesse contexto, a partir da data (2006), vários estudos vêm sendo realizados na bacia, fato que constitui uma vantagem para pesquisadores que desejam desenvolver projetos na área. Desse modo, e com o intuito de fazer um levantamento da maioria dos trabalhos realizados na bacia, foi elaborado o Quadro 3.1, no qual, é apresentado um detalhamento dos tipos de estudos, autores e datas correspondentes.

Quadro 3.1 - Estudos realizados na bacia do rio Piabanha

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
1	MAR.1986	Determinação do coeficiente de dispersão em rios através de traçadores radioativos e fluorescentes. Bacia do rio Piabanha	Theresa Cristina de Almeida Rosso/ UFRJ-COPPE	Dissertação de Mestrado
2	2002	Regionalização de vazões da Sub-Bacia 58 - Rio Paraíba do Sul	CPRM	Estudo
3	FEV.2003	Relatório - Síntese do trabalho de regionalização de vazões da Sub-bacia 58 (Paraíba do Sul)	CPRM	Relatório
4	MAR.2005	Aplicação do método Battelle na avaliação do impacto ambiental na bacia hidrográfica do rio Piabanha	Kling, Ana Silva Mendes / Fundação Oswaldo Cruz - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca	Dissertação de Mestrado

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
5	FEV. 2005	Análise da paisagem e identificação de áreas suscetíveis a Movimentos de massa na APA Petrópolis – RJ: subsídio ao planejamento urbano	Alessandra Carreiro Baptista Universidade Federal de Viçosa UFV	Dissertação de Mestrado
6	NOV.2007	Apoio cartográfico a estudos hidrológicos utilizando ferramentas de Geoprocessamento	Daniel Medeiros Moreira, Ligia Maria N. de Araújo & Ivete Souza de Almeida	Artigo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Cidade: São Paulo
7	NOV.2007	Estudos integrados de bacias experimentais, parametrização hidrológica na gestão de recursos hídricos da bacia do rio Piabanha.	Ligia Maria N. de Araújo, Amanda Morais, Mariana D. V. Boas Et. Al.	Artigo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Cidade: São Paulo
8	2007	EVOLUÇÃO HISTÓRICO-GEOGRÁFICA DA OCUPAÇÃO DESORDENADA E MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS, NAS ÚLTIMAS DÉCADAS	Antônio José Teixeira Guerra, Luiz Fernando Hansen Gonçalves, Patrícia Batista Melo Lopes / UFRJ	Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 8, nº 1 (2007)
9	2007-2010	Atualização do plano elaborado (2002-2006) - Plano da bacia do rio Paraíba do Sul (2007-2010)- Novos cadernos de ações -Caderno 4 - Comitê Piabanha.	COPPETEC-ANA	Plano-Relatórios-Cadernos
10	OUT.2008	Recuperação é interpretação de dados pluviométricos registrados por estações automáticas-Estudo de caso: Bacia do Piabanha	Irving da Silva Badolato, Rafael Alves de Aguiar, Lígia Maria N. de Araújo, Et. Al.	Artigo. Evento: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste
11	OUT.2008	Caracterização da condutividade hidráulica saturada do solo em uma vertente submetida a diferentes usos e coberturas de solo: Uma análise preliminar na região serrana do Rio de Janeiro. Bacia do Bonfim.	Sarah Lawall; Lúcia Maria da Silva; Ana Carolina Ferraz; et.al.	Artigo. Evento: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste
12	OUT.2008	Análise do desempenho dos modelos hidrológicos SMAP e TOPMODEL na bacia experimental do rio Piabanha.	Rodrigo Costa Gonçalves; Daniel Medeiros Moreira ,Otto Corrêa Rotunno Filho e Adilson Elias Xavier/UFRJ-COPPE	Artigo. Evento: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste
13	NOV.2008	Modelagem hidrológica do tipo chuva - vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de caso: Bacia do Rio Piabanha.	Rodrigo Costa Gonçalves. Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho /UFRJ-COPPE	Dissertação de Mestrado

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
14	DEZ.2008	Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma micro-bacia urbana. Petrópolis	Leonardo Marini Pereira. Orientador: Drs. Camilo Daleles Renn o e Leila Maria Garcia Fonseca/ INPE - São José dos Campos	Dissertação de Mestrado
15	DEZ.2009	Estudos para um diagnóstico quali-quantitativo em bacias experimentais - Estudo de caso Bacia do rio Piabanha	Amanda Morais, Mariana Dias Villas-Boas, Anderson Oliveira Bastos, Achiles Eduardo Guerra de Castro Monteiro, Ligia Maria Nascimento de Araújo/CPRM.	Artigo - II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade.
16	2009	Criação de um Sistema de Previsão e Alerta de Riscos a deslizamentos e enchentes, visando minimizar os impactos sócio-ambientais no bairro Quitandinha, bacia do rio Piabanha (afluente do Paraíba do Sul), município de Petrópolis-RJ.	Antônio José Teixeira Guerra, Marcos Barreto de Mendonça, Patrícia Batista Melo Lopes, Fabio da Silva Lima, Maria do Carmo Oliveira Jorge e Bruno da Rocha Mendes /UFRJ	Anais II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade, Taubaté, Brasil, 09-11 dezembro 2009, IPABHi, p. 785-824.
17	2010	Projeto EIBEX-1 - Estudos integrados de bacias experimentais - Parametrização hidrológica na gestão de recursos hídricos das bacias da região serrana do Rio de Janeiro. Bacia do rio Piabanha	COPPETEC - COPPE -UFRJ Colaboração: IGEO-UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA)	Relatório Técnico Parcial 2
18	ABR.2010	Modelagem hidrológica chuva - vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha.	Rodrigo Furtado Lou. Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho-Marcelo Gomes Miguez/ UFRJ-COPPE	Dissertação de Mestrado
19	MAI.2010	Modificações na hidrologia dos solos em resposta as alterações de uso e cobertura na bacia hidrográfica do Bonfim, região serrana do Rio de Janeiro.	Sarah Lawall; Nelson Ferreira Fernandes (orientador) / IGEO-UFRJ	Dissertação de mestrado
20	JUL.2010	Processos geomorfológicos em uma nova territorialidade: Caso Araras, Petrópolis RJ.	Daniel Taboada Placido Carlos Gustavo Carlos Gustavo Moraes Corrêa Marcelle Fonseca Sabrina Félix de Oliveira Laís Lima Ambrosio	Artigo nos Anais XVI - Encontro Nacional dos Geógrafos.

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
21	ABR.2011	Avaliação da poluição difusa na bacia urbana do córrego Quitandinha, município de Petrópolis/RJ	Selena Lopes Carvalho Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho e Jorge Henrique Alves Prodanoff - UFRJ -COPPE	Dissertação de Mestrado
22	SET. 2011	Avaliação da vazão ecológica do ponto de vista da qualidade das águas na bacia do rio Piabanha/RJ.	Bianca Santos Molinari /UFRJ-COPPE	Projeto de Graduação
23	OUT.2011	Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ.	Thiago Pires de Paula /UFRJ-COPPE	Dissertação de Mestrado UFRJ-COPPE
24	NOV.2011	Validação e recalibração da modelagem hidrológica via TOPMODEL na bacia Pedro do Rio - rio Piabanha.	Rodrigo Gonçalves , Lude Quiêto Viana, Otto Corrêa Rotunno Filho/UFRJ-COPPE	Artigo - XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Maceió-Alagoas
25	2011	Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas (Áreas de estudo: APA de Petrópolis e Amazônia)	Bruna Santos Miceli , Filipe de Meireles Dias, Fernanda Moraes Seabra, Paulo Roberto Alves dos Santos, Manoel do Couto Fernandes / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ Centro de Ciências da Matemática e da Natureza Instituto de Geociências e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais - CREN-RJ	Revista Brasileira de Cartografia No 63/01, 2011. (ISSN 0560-4613)
26	2011	Distribuição de mercúrio, cobre, chumbo, zinco e níquel em sedimentos de corrente da bacia do rio Piabanha, Estado do Rio de Janeiro	Ricardo Cesar , Juan Colonese, Marianna Silva, Silvia Egler, Edison Bidone, Zuleica Castilhos e Helena Polivanov / Universidade Federal Fluminense, UFF. Instituto de Química, Departamento de Geoquímica Ambiental, Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCT. Serviço de Desenvolvimento Sustentável, Laboratório de Ecotoxicologia Aplicada à Indústria Mineral - Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza	Artigo - Geochimica Brasiliensis, Ouro Preto.

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
27	MAR.2012	Avaliação da evapotranspiração utilizando o algoritmo Sebal e Imagens LANSAT5-TM - Estudo de caso: Bacia do rio Piabanha/RJ.	Vinicius Rios Barros/UFRJ-COPPE	Dissertação de Mestrado UFRJ-COPPE
28	MAI.2012	Mapeamento fotogramétrico digital: Um estudo comparativo da bacia hidrográfica do rio Piabanha nos ambientes E - Foto - e LPS	Roberta Muniz Laranja Natasha Da Silva Correa Jorge Luís Nunes e Silva Brito /Universidade do Estado do Rio de Janeiro o - UERJ	IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação
29	2012	Relatório de situação região hidrográfica rio Piabanha.	AGEVAP	Relatório AGEVAP.
30	2012	Uso de metodologias simplificadas para determinação do hidrograma ecológico na bacia do rio PIABANHA/RJ	Valéria Santana da Silva / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
31	2012	Avaliação do potencial de regionalização hidrológica do modelo chuva-vazão SMAP na bacia do rio Preto usando NDVI	Lude Quiêto Vianna / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.	Dissertação de Mestrado
32	2013	Mapeamento de cobertura e uso da terra utilizando a análise baseada em objeto: estudo de caso da bacia do rio Piabanha, região serrana do RJ, escala 1:25.000	Luana Santos do Rosário, Carla Bernadete Madureira Cruz, Ana Carolina de Almeida Tavares, Maíra Vieira Zani, Thiago Silva da Conceição e Otto Corrêa Rotunno Filho / Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ Instituto de Pós-graduação em Engenharia - COPPE Instituto de Geociências Faculdade Politécnica em Engenharia	Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
33	2013	Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no rio Piabanha/RJ	Paulo Vitor Ribeiro Marques da Silva / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
34	2013	Evolução temporal do NDVI na bacia do Rio Piabanha/RJ	Alline Gomes Lamenha e Silva , Rodrigo Sondermann Muniz e Otto Corrêa Rotunno Filho / Programa de Engenharia Civil – COPPE, UFRJ – Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – LABH2O	Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
35	2013	Metodologia para determinação das áreas de preservação permanente das margens de cursos d'água: um estudo de caso na bacia do rio Piabanha	Mauro Medeiros de Carvalho Junior / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
36	2014	Gestão Integrada dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Paraíba do Sul: Desenvolvimento De Ferramenta de Apoio ¹	Verônica Silveira de Andrade , Celso Bandeira de Melo Ribeiro / UFJF	II Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.
37	2014	Modelagem de escoamento superficial com base no hidrograma tempo-área geoprocessado	Julia de Menezes Cohn / Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
38	2014	Incorporação de incertezas associadas às predições de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em recursos hídricos	Rodrigo Lilla Manzione / Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Ourinhos.	Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.36, Volume Especial, p. 215-227, 2014
39	2014	Subsídios para o enquadramento do rio Piabanha respaldado por modelagem matemática de qualidade da água	Marcos Leandro Alves Nunes / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
40	2014	Desenvolvimento do módulo para representação de escoamento de base no modelo Modcel	Pedro Lucas Cosmo de Brito / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
41	2014	Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB) em uma bacia de médio porte: estudo de caso bacia do rio Piabanha	Luiz Claudio Fintelman / Centro universitário Geraldo di Biase Fundação educacional Rosemar Pimentel Instituto de ciências exatas e da terra, e engenharias	Trabalho de Conclusão de Curso
42	2015	Avaliação da geração de energia elétrica na bacia do rio Piabanha em relação aos usos múltiplos crescentes da água	Diego Vannucci Chiappori Universidade Federal de Rio de Janeiro UFRJ	Dissertação de Mestrado.

No	ANO	NOME DO DOCUMENTO	AUTOR/INSTITUIÇÃO	TIPO DE DOCUMENTO
43	2015	Modelagem espacial da qualidade de água na bacia do rio Piabanha/RJ	Bianca Santos Molinari / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Dissertação de Mestrado
44	2016	Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ	Lígia Maria Nascimento de Araujo / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ	Tese de Doutorado

Fonte: elaboração própria a partir de levantamento de informação

CAPITULO 4 - METODOLOGIA

4.1 Metodologia a ser aplicada

Neste capítulo, será apresentada e descrita a metodologia desenvolvida no trabalho, as tarefas realizadas, as ferramentas utilizadas como softwares, metodologias de cálculo e análise referentes à área de estudo. Cabe ressaltar que, a quantidade e qualidade de dados levantados são determinantes para o correto desenvolvimento da pesquisa no entanto, a obtenção de informações nem sempre representa uma tarefa simples e rápida, muitas vezes depende da disponibilidade dos dados e da facilidade ou dificuldade em obtê-los. Além disso, a análise e processamento dos dados pode representar um tempo considerável¹⁹ nos trabalhos de hidrologia.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma representativo das atividades que conformam a metodologia deste trabalho.

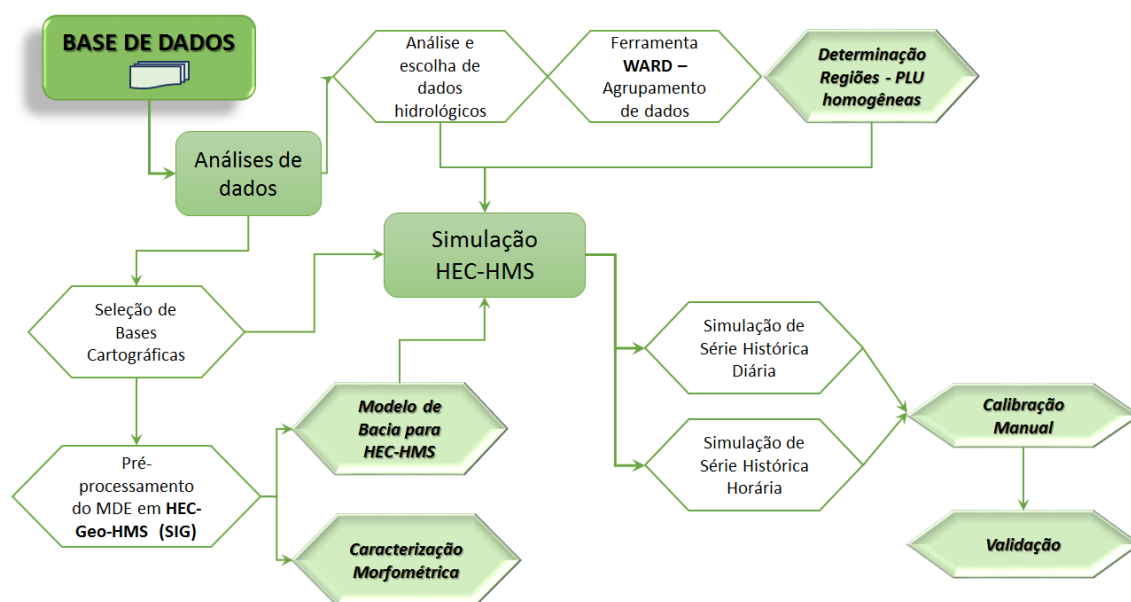


Figura 4.1 - Diagrama da metodologia geral

4.2 Levantamento de informações sobre a bacia do rio Piabanha

Foi feito um levantamento bibliográfico sistêmico a partir de uma varredura em bancos de dados de teses, dissertações, artigos, e trabalhos científicos relacionadas com a bacia de estudo. Este levantamento foi realizado com o objetivo de fornecer um panorama geral da produção científica existente sobre a bacia do rio Piabanha, tanto

¹⁹ Em hidrologia é gasto aproximadamente 70% do tempo preparando a base de dados (conversa com o professor Demetrius David da Silva da UFV, 2013)

em termos descritivos das suas características ambientais, quanto em relação à aplicação de modelos hidrológicos realizados na referida bacia.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram levantadas e processadas informações referentes à região de estudo, tais como: Informações hidrometeorológicas, dados cartográficos, mapas temáticos, e outras informações relevantes (Figura 4.2). Estas informações foram obtidas junto aos órgãos competentes e outros trabalhos realizados na bacia.

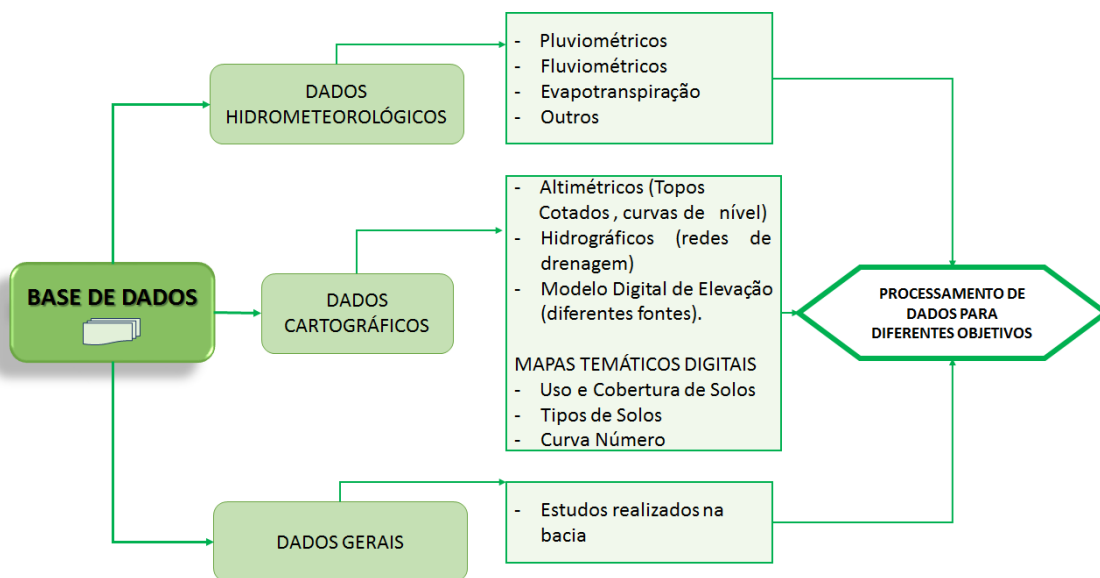


Figura 4.2 – Bases de dados

4.2.1 Levantamento de dados em campo

Outras informações foram obtidas de campanhas e visitas a campo realizadas no âmbito do projeto, Hidrograma Ecológico e Modelagem Quali-quantitativa de bacias (HIDROECO)²⁰. Das campanhas e visitas realizadas são mencionadas a seguir aquelas que forneceram dados para esta pesquisa, descritas brevemente a seguir:

A primeira campanha foi realizada no âmbito do projeto de traçadores, foram feitas coletas após o lançamento de traçadores fluorescentes (Figura 4.3) com objetivo de determinar características de dispersão e transporte no rio Piabanha.

²⁰ Projeto em rede FINEP Convênio 01.11.0101.00 da Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO 01/2010



Figura 4.3 - Primeira visita a área de estudo – Projeto HIDROECO

A segunda campanha de campo de campo realizada na bacia no mês de Julho de 2012, foi a de levantamento das características morfológicas da bacia, foi feito o percurso do rio desde um ponto próximo às nascentes até o encontro com o rio Paraíba do Sul em Três Rios.

Foram feitos levantamentos dos nomes dos rios afluentes quando era possível, medição da largura do rio, profundidade em diferentes pontos, localização de estações, entre outros, além disso, observou-se a proximidade das moradias nas margens do rio Piabanha, o que contribui notadamente com a quantidade de lixo que por vezes era encontrado no leito do rio. Esta visita faz parte de esta pesquisa e será melhor descrita no item 5.1 no capítulo dos resultados.

Uma nova visita a campo foi realizada com o objetivo de verificar a localização de duas estações cadastradas na ANA que apresentam praticamente a mesma área de drenagem, porém, quando são verificadas as vazões os dados apresentam grandes diferenças, o que chamou a atenção na hora da realização da análise de continuidade na bacia, a primeira uma régua linimétrica de responsabilidade da ANA/CPRM (Moura Brasil) e a outra, um línimetro pertencente à LIGHT Eletricidade (Fazenda Barreira).

A localização foi determinada com GPS e observou-se que estavam a aproximadamente 450 metros uma da outra (Figura 4.4), no entanto como mencionado anteriormente, os dados das duas estações são diferentes, isto foi comprovado ao plotar os dados de ambas estações.



Figura 4.4 - Régua linimétrica Moura Brasil/Línímetro F. Barreira

4.2.2 Levantamento da Base de dados

Dados Hidrometeorológicos: Os dados hidrometeorológicos foram obtidos das instituições competentes descritas a seguir:

- Agência Nacional de Águas (ANA) que inclui registros de estações pluviométricas e fluviométricas da bacia, além de dados correspondentes à bacia hidrográfica como localização, rios, região hidrográfica, entre outros. Os dados obtidos da ANA são dados oficiais, em escala de medição diária.
- O Projeto de Pesquisa Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – EIBEX-I. Foram levantados dados pluviométricos e fluviométricos do projeto.
- Instituto Estadual do Ambiente ²¹ (INEA/RJ) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), base de dados do sistema alerta que apresentam dados de chuvas de estações telemétricas na região serrana do Rio de Janeiro.
- A base obtida do Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres Naturais (CEMADEN) implementada no ano 2013. Dados com registros com uma escala temporal de dez em dez minutos. Cabe ressaltar que por diferenças de banco de dados e por ter início apenas em 2013, este banco apesar de ter sido levantado, não foi utilizado neste estudo.

²¹ Operação da rede hidrometeorológica e programa de Alerta INEA

- Dados de estudos anteriores forneceram as bases de evapotranspiração, estudos de Gonçalves (2008) e Araújo (2016) com a metodologia de cálculo de evapotranspiração do Balanço Hidrológico Sazonal (BHS) e a metodologia de Camargo (1971) respectivamente, os dados do trabalho de Barros (2012) não foram utilizados neste trabalho por diferenças na série histórica escolhida.

Dados cartográficos e mapas temáticos: As bases referidas a Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do rio Piabanha, dados de uso e cobertura dos solos, dados de tipos de solos existentes na bacia, curva número, entre outros, foram obtidos das seguintes instituições:

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Instituto Estadual do Ambiente (INEA);
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- CT Hidro RHIMA²² parceria com a EMBRAPA.

Outros dados disponíveis para a pesquisa de estudos anteriores referidos à bacia em questão, bem como teses de doutorado e dissertações de mestrado, foram também utilizados neste estudo.

4.3 Organização da base de dados e o processo de seleção

Uma vez obtidas as informações acima descritas, estas foram organizadas de acordo com a necessidade do estudo. Este processo representa uma preparação dos dados hidrológicos e cartográficos para seu posterior uso, esta fase envolve tarefas importantes e trabalhosas, pois os dados devem ser relevantes para o alcance dos objetivos.

4.3.1 Dados hidrológicos

A avaliação dos dados hidrológicos foi realizada a partir da análise das redes de monitoramento hidrológico existentes na bacia com ajuda do programa HIDRO²³ e do programa HIDROCAL²⁴. A quantidade de postos fluviométricos e pluviométricos, assim como a qualidade das suas series históricas nas diferentes escalas temporais usadas

²² Rede de pesquisa em monitoramento e modelagem de processos hidrossedimentológicos em bacias representativas rurais e urbanas do bioma Mata Atlântica – Chamada pública MCT/Finep CT Hidro 01/2010 (Ressaltando que os dados adquiridos são dados iniciais, não são publicados pois o projeto está em andamento)

²³ Programa Hidro versão 1.2 (Sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos. ANA,2010)

²⁴ HIDROCAL: Software desenvolvido por Ottoni e Alvarez (2012) com apoio da CPRM, ainda não publicado.

neste trabalho, foram analisadas e comparadas com a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008).

Na Tabela 4.1, observa-se que em relação às estações pluviométricas para áreas montanhosas a onduladas a WMO (2008) recomenda uma estação a cada 575 km². Sendo a área da bacia de estudo, aproximadamente 2065 km², poder-se-ia dizer sem reflexão alguma, que a rede da Agencia Nacional de Águas já seria suficiente para o monitoramento pluviométrico da bacia, pois a mesma apresenta 12 estações com dados diários de chuvas disponíveis.

Tabela 4.1 - Recomendação da densidade mínima de estações, para rede hidrometeorológica

Unidades Fisiográficas	Pluviômetro	Pluviógrafo	Evaporação	Vazão	Sedimentos	Qualidade da Água
	km ² .(estação) ⁻¹					
Litoral / Região Costeira	900	9.000	50.000	2.750	18.300	55.000
Montanhas	250	2.500	50.000	1.000	6.700	20.000
Planícies Interioranas	575	5.750	5.000	1.875	12.500	37.500
Ondulada / Montanhosa	575	5.750	50.000	1.875	12.500	47.500
Pequenas Ilhas (< 500 km ²)	25	250	50.000	300	2.000	6.000
Áreas Urbanas	-	10 a 20	-	-	-	-
Polar / Árida	10.000	100.000	100.000	20.000	200.000	200.000

Fonte: WMO (2008) apud Marcuzzo e Melati (2015)

No entanto, não é possível afirmar essa questão sem refletir na realidade da bacia, nas suas características geomorfológicas e climáticas, sociais e econômicas. Desse modo, não só a questão da quantidade de estações na bacia seria suficiente para um bom monitoramento hidrológico e sim a distribuição espacial das mesmas segundo as características da região.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1994) também indica que, a representatividade de um pluviômetro depende da topografia das regiões, no caso de uma topografia marcante, com acidentes geográficos significativos, com grandes elevações ou mesmo vales profundos, sem uma boa representatividade de pluviômetros, os dados poderiam ficar comprometidos.

De tal modo, ainda não é possível afirmar com precisão qual o padrão a adotar em termos de densidade pluviométrica. Apenas é claro que todo lugar terá densidades diferentes, dependendo principalmente de sua geografia, da complexidade dos sistemas atmosféricos atuantes e principalmente dos objetivos propostos.

Para a leitura de níveis d'água na bacia estão as tradicionais réguas linimétricas instaladas (Figura 4.5), lidas diariamente por observadores às 7:00h e às 17:00h. Foram

também instalados em maior número, a partir dos anos 2011 e 2013, os linígrafos automáticos digitais de registro contínuo, muitas vezes com transmissão telemétrica, como os que existem da Rede de Alerta INEA e na rede do CEMADEN, com sensores de pressão.



Figura 4.5 – Réguas instaladas para leitura de nível na estação Pedro do Rio

No âmbito do Projeto EIBEX, foram instalados vários destes linígrafos, com sensor de pressão, sendo quatro com transmissão telemétrica, e um sob uma ponte com o princípio de funcionamento por radar. Os equipamentos de registro contínuo são especialmente importantes para bacias de pequenas dimensões e resposta rápida, como é o caso da bacia do rio Piabanha, para os alertas hidrológicos e também para o correto registro dos picos atingidos nos estudos de cheias (ARAUJO, 2016).

Na rede da ANA no que diz respeito aos dados fluviométricos na bacia do rio Piabanha, são encontrados dados de vazão para seis estações com dados diários consistidos até o ano 2005, lembrando que uma das estações pertence a LIGHT Energia. Outras entidades, apresentam dados de vazão, porém as series históricas são insuficientes ou simplesmente não há acesso a esses dados. Cabe ressaltar que estes dados de vazão apresentados no site da ANA, são obtidos de dados de níveis, medidos nas réguas linimétricas existentes na bacia, que passam por uma curva chave para serem transformados em vazão.

No capítulo dos resultados no Item 5.2, podem ser observados os gráficos e tabelas das estações existentes tanto fluviométricas quanto pluviométricas e no Apêndice I é observada uma estatística em gráficos da quantidade de estações existentes cadastradas no site da ANA e suas séries históricas realizadas com o programa HIDROCAL.

As avaliações de dados para as diferentes tarefas foram feitas em escala temporal diária, com uso das estações da rede de monitoramento da ANA, e em escala temporal horária, com uso de estações telemétricas da rede Alerta INEA e EIBEX. Para a modelagem foram usadas duas estações que apresentam dados de nível transformados em vazão pelo método da curva chave, Pedro do Rio e a estação Parque (projeto EIBEX).

4.3.2 Dados cartográficos e mapas temáticos

Modelo Digital de Elevação: Modelos digitais de elevação (MDEs) são matrizes de valores de elevação em pontos igualmente espaçados do terreno. Devido à sua natureza de matriz, os MDEs são armazenados em formato GRID ou Raster, que é uma estrutura de dados composta de células quadradas ou pixels de igual tamanho dispostos em linhas e colunas (OLIVERA, 2001).

Um modelo digital de elevação (MDE) fornece informações espaciais de grande importância para a modelagem e análise da superfície terrestre. Segundo Fernandes (2004) os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) possuem uma grande variedade de instrumentos disponíveis para trabalhar com a dimensionalidade dos dados, mas podem apresentar limitações, como a de não considerar as irregularidades topográficas da distribuição dos fenômenos no espaço. Devido à esta limitação na análise baseada em observações em superfícies planimétricas, torna-se necessária, a utilização dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs), que permitam a obtenção de informações de distâncias, áreas e volumes por meio de uma modelagem tridimensional.

Oliveira (2006) também lembra que apesar da vasta disponibilidade de MDEs no mundo e a flexibilidade que um MDE proporciona para delinear rios, bacias hidrográficas, calcular áreas de drenagem e comprimentos de escoamento, ainda assim, os MDEs têm dificuldades em capturar padrões de fluxo em áreas planas, onde mesmo pequenas imprecisões nos valores de elevação podem levar a erros maiores nos fluxos delineados, na delimitação da drenagem e em áreas urbanas, onde os padrões de fluxo são frequentemente modificadas por estruturas de drenagem.

A bacia do Piabanha está inserida num relevo ondulado a montanhoso, entretanto, não deixa de ser importante a obtenção de Modelos Digitais de Elevação de fontes confiáveis para seu posterior uso, lembrando que após o processamento do MDE, as características físicas da bacia serão extraídas em função do mesmo. Nesse sentido, para este trabalho foram obtidos e trabalhados três MDEs de diferentes órgãos

competentes, para uma verificação de qual seria o adequado ao estudo, mencionados a seguir;

- MDE - SRTM²⁵ obtidos do site do IBGE com pixel de 90m x 90 metros;
- MDE – Topodata²⁶ disponibilizado pelo INPE com pixel de 30 x 30 m; e
- MDE extraído de dados de curvas de nível e pontos cotados e malha de drenagem do INEA²⁷, versão cartográfica melhorada em conjunto com o IBGE.

Após análise dos MDEs, com ajuda do software ArcGis, o MDE selecionado, foi o gerado com as curvas de nível e pontos cotados do INEA, por ser o mais detalhado e revisado em 2014 pelo INEA. O procedimento para a delimitação de bacias foi realizado com a ferramenta HEC-GeoHMS e será apresentado no tópico correspondente.

Em relação ao mapas temáticos, foram obtidos das seguintes fontes;

- Uso e cobertura de Solos: O mapa de uso e cobertura de solos foi obtido do INEA/SEA (2008), procedente de dados do ZEERJ (Zoneamento Ecológico Económico) do estado do Rio de Janeiro trabalhados em 2010 a uma escala de 1:100.000 e Datum WGS84;
- Mapa de Solos: O mapa de solos obtido também do INEA, foi elaborado pela SEA28 (2011) por meio de um Ajuste de mapeamento de classes de solos do Estado do Rio de Janeiro da escala 1:250.000 para a escala 1:100.000, Datum WGS84.
- Curva Número (CN): Os dados de curva número foram obtidos do INEA e produzidos pela HICON²⁹, que determinou os grupos hidrológicos no ERJ, associando o uso e ocupação do solo (ZEERJ) com o tipo de solo (EMBRAPA)

4.4 Análise dos dados hidrológicos

Para análise dos dados, foram calculadas as médias mensais e anuais das estações, com registros diários, distribuídas na bacia do rio Piabanha (ANA), a série histórica utilizada foi de 1966 até 2014. Os dados sem registros consistidos, foram

²⁵ SRTM-*Shuttle Radar Topography Mission* (USGS)

²⁶ Topodata: Projeto realizado pelo INPE a partir dos dados da SRTM disponível desde Novembro de 2011

²⁷ Dados do INEA, versão cartográfica de 2014, ainda existe uma versão nova das curvas de nível e pontos cotados para 2015.

²⁸ Por meio do Estudo de Favorabilidade das terras do Estado do Rio de Janeiro a múltiplos usos na escala 1:100.000 – Contratação da Biovert Florestal e Agrícola Ltda (2011).

²⁹ HICON Engenharia Ltda: Empresa que trabalha na área de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas

preenchidos com os dados brutos existentes, cabe destacar que a partir de 2006 os dados existentes são apenas brutos.

Com a mesma série histórica de 1966 – 2014 e por meio da ferramenta de interpolação *Kriging*³⁰ na plataforma do software ArgGIS, foram geradas isoietas para a bacia do rio Piabanha, este mapa de isoietas mostra a distribuição espacial das chuvas anuais na bacia possibilitando identificar mediante as isolinhas a variabilidade anual de precipitação. É importante destacar que, as estações utilizadas para a geração das isoietas, foram as que se encontravam integralmente na bacia, fato pelo qual, poder-se-ia perder algumas informações se comparadas com as isoietas derivadas do mapa do estado do Rio de Janeiro.

A série escolhida de dados de precipitação para a modelagem diária foi a mesma que a do estudo de Gonçalves (2008); (1998-2004). Dessa maneira, o citado autor apresenta a avaliação do grau de homogeneidade dos dados nos postos escolhidos, com o método da dupla massa. A análise de dupla-massa compara os valores acumulados anuais da estação a ser avaliada com os valores da estação de referência, que é usualmente a média de precipitação nos diversos postos vizinhos. A seguir na Figura 4.6 é apresentado um dos gráficos gerados para a verificação.

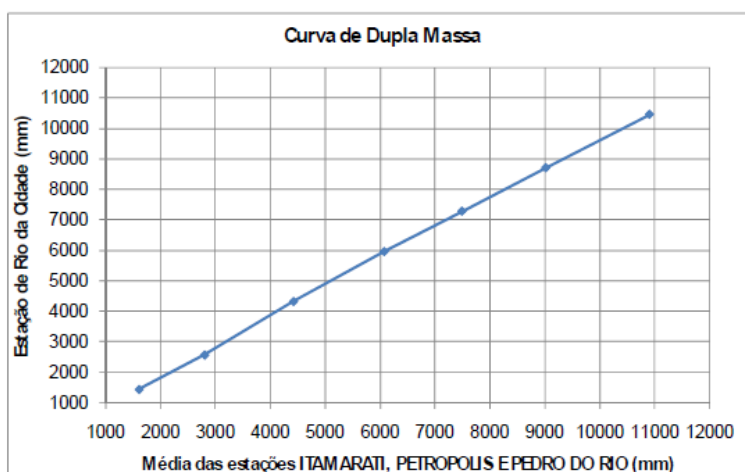


Figura 4.6 – Dupla massa posto Rio da Cidade

Fonte: Gonçalves(2008)

Para a série de dados de chuvas horárias (2012-2014), nenhuma técnica de preenchimento de falhas foi aplicada, primeiro porque técnicas estatísticas clássicas seriam dificilmente usadas para registros horários pois os padrões espaço-temporais do processo de chuva são complexos, não lineares e altamente variáveis, o que dificulta

³⁰ *Kriging* – Krigagem, é um dos métodos de interpolação existentes na plataforma de ArcGIS

essa aplicação (BERTONI E TUCCI, 2007). No entanto, Redes Neurais Artificiais (RNA) poderiam ser utilizadas para este tipo de dados como já foi apresentado por Depiné et al. (2014).

Em segunda instância, não foi necessário o preenchimento de dados já que as estações escolhidas apresentavam dados desde início de janeiro de 2012 até início de dezembro de 2014, a partir dessa última data, falhas aparecem até o fim de dezembro e não existe registros de 2015.

Os dados das vazões horárias para este estudo foram obtidos da estação Parque, do projeto EIBEX, esta estação foi escolhida por ser a única que apresenta dados na série histórica a partir de agosto de 2012 até dezembro de 2014 (período da simulação). Cabe mencionar que as vazões de esta estação foram obtidas a partir dos dados de níveis e da curva chave.

4.5 Determinação de regiões pluviometricamente homogêneas

Numa regionalização hidrológica, a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta hidrológica de cada região, desse modo, a regionalização é usada para identificar zonas que apresentem um comportamento semelhante e, respostas hidrológicas podem ser comparadas. A definição de região hidrológica homogênea não implica a existência de uma continuidade geográfica entre elas, e regiões contínuas não expressam, necessariamente, respostas hidrológicas análogas (ANDRADE, 1999).

Nesse contexto, foram determinadas as regiões pluviometricamente homogêneas usando técnicas de mineração de dados (*data mining*). Estas técnicas representam a extração de informação útil a partir de massas de dados, analisando grandes volumes de informação e classificando-os em grupos que revelem determinados padrões.

Este tipo de técnicas são ferramentais úteis quando os dos dados analisados apresentam padrões variáveis, pois permitem reconhecer por meio do agrupamento de dados, aonde ocorrem as similaridades. Nesse sentido a aplicação do método aglomerativo hierárquico de WARD foi importante para determinar as estações que apresentavam similiaridades nas chuvas dentro da bacia.

A determinação das regiões homogêneas com o método WARD foi realizada na plataforma do software *Statística* 10.0 da Stafsóf. Cabe destacar que este método é bastante utilizado para dados de diversas áreas e será brevemente descrito a continuação.

4.5.1 Método de agrupamento de dados WARD

É um método de agrupamento de dados hierárquico, que forma grupos de maneira a atingir sempre o menor erro interno entre os vetores que compõem cada grupo e o vetor médio do grupo. Isto equivale a buscar o mínimo desvio padrão entre os dados de cada grupo.

No método de WARD, os grupos de dados são formados em etapas, em princípio, têm-se m grupos, ou seja, um grupo para cada vetor componente da base de dados. Nesse estágio inicial, o erro interno é nulo para todos os grupos, pois cada vetor que compõe cada grupo é o próprio vetor médio do grupo. Igualmente o desvio padrão para cada grupo é nulo. Na etapa subsequente, cada possibilidade de aglutinação entre os grupos 2 a 2 é verificada, e é escolhido o agrupamento que causa o menor aumento no erro interno do grupo. São $m \times m$ verificações (MITCHEL et. al., 2004).

WARD, é um dos métodos de agrupamento de dados mais utilizados, em linhas gerais, o método de WARD emprega a análise de variância para determinar as distâncias entre os *Clusters* e, a cada nova iteração aglomerá-los de forma a minimizar a soma dos quadrados de quaisquer pares de dois *clusters* hipotéticos.

Esse método é considerado eficiente e em geral, tende a produzir agrupamentos pouco extensos e de igual número de indivíduos sendo indicado por vários autores (MODARRES; SARHADI, 2011, SANTOS; LUCIO; SILVA, 2014, PINTO & NAGUETTINI, 2007; PEREIRA, 2005, WARD, 1963).

O método WARD apresenta os resultados por meio de um diagrama de árvore ou dendograma como mostrado na Figura 4.7 (nesta figura podem ser observados claramente três agrupamentos dos dados), cujas ligações representam a intensidade da semelhança entre os objetos. A distância de similaridade *dlink* é a que representa a homogeneidade dos dados, maiores distâncias menor similaridade.

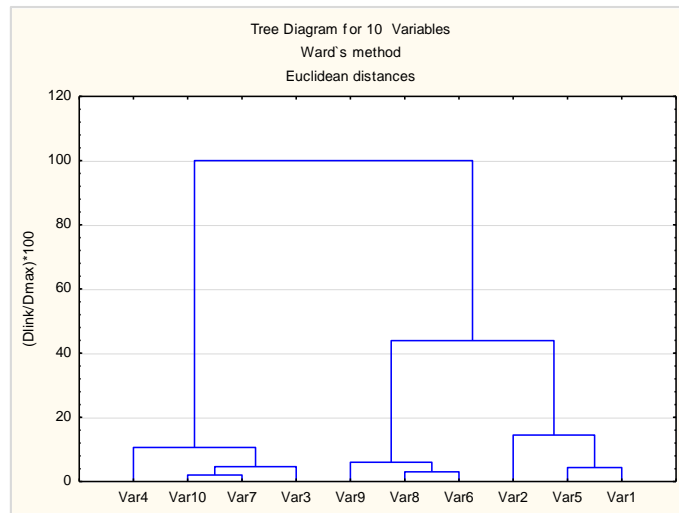


Figura 4.7 - Esquema de um dendograma

Dessa maneira, com base na técnica de WARD e feita a escolha das estações (em escala diária e horária) procedeu-se à determinação das regiões pluviometricamente homogêneas. Cabe ressaltar que series históricas maiores conseguem reproduzir melhor o comportamento das chuvas, assim é sempre recomendado utilizar estações com períodos longos.

Para a entrada dos dados, o período escolhido das estações com medições em escala diária foi de 1966 a 2014, usaram-se os totais mensais de cada ano para cada uma das nove estações escolhidas, destaca-se que, foram utilizados dados consistidos quando possível e dados brutos em casos de não existirem os consistidos.

Devido ao volume de dados diários (49 anos), para realizar o cálculo dos totais mensais foi utilizado o *software* Hidro³¹, com o qual, foram também identificadas algumas falhas devido a dados inexistentes, falhas que tiveram que ser preenchidas para não ter células “vazias” na tabela utilizada para a determinação das regiões homogêneas.

A metodologia de preenchimento foi simples e baseada em outros trabalhos (NICÁSIO, 2008; ANDRADE, 2008; ANDRADE et.al., 2016) devido aos meses faltantes serem poucos na série histórica de cada estação, as falhas foram preenchidas com a média histórica do mês em que havia a falha.

Com as estações prontas, foi utilizada a técnica de WARD e gerado o diagrama de árvore para detectar os primeiros agrupamentos. Como as variáveis escolhidas

³¹ Sistema de Informações Hidrológicas Hidro: é uma aplicação de banco de dados do tipo cliente/servidor projetada especificamente para o ambiente gráfico Windows (site: Agencia Nacional de Águas)

(neste caso, as estações pluviométricas) eram poucas o programa foi rápido a determinar os agrupamentos.

A mesma técnica foi aplicada para as estações escolhidas em escala sub-diária. A série apresenta apenas três anos de dados de chuvas registrados a cada 15 minutos, dessa maneira, trabalhou-se com os dados em escala de tempo de uma hora. Assim, foram gerados os agrupamentos com a maior similaridade nos dados.

Nesse contexto e para observar a consistência dos grupos, figuras dos agrupamentos foram geradas, dados acumulados que mostram mais claramente o comportamento das precipitações de cada estação, verificando ou não a homogeneidade. Por outro lado, os dados foram plotados no MDE de maneira de observar o relevo das estações e os agrupamentos, assim como também foram plotados junto com o mapa de isoietas, verificando mais uma vez a similaridade dos grupos. Estes mapas são exibidos no capítulo de resultados.

4.6 Processamento dos dados cartográficos para entrada do modelo.

A topografia é um fator determinante nos processos de modelagem hidrológica, os modelos que tratam da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica requerem dados baseados nas características topográficas tais como, limites da bacia hidrográfica e sub-bacias, inclinação do terreno, canais de drenagem, longitude do talvegue, entre outros.

Estes atributos topográficos podem ser determinados a partir do modelo digital de elevação (MDE). No entanto, limitações podem ser encontradas nestas fontes, limitações como a escala adotada, área mínima de drenagem, delimitação das sub-bacias, entre outras, estas limitações podem ser influência da resolução do MDE utilizado. Nesse sentido, é muito importante obter um modelo digital de elevação que esteja de acordo com os objetivos do estudo.

Dessa maneira, levando em consideração o aqui exposto, das três fontes de informação de MDEs disponibilizados por diferentes instituições, mencionadas no Item 4.3.2 foi escolhido o MDE gerado com dados de curvas de nível e pontos cotados do GEOPEA³²/INEA (curvas de nível em escala 1:25.000). O MDE foi gerado com resolução espacial de 30 metros.

³² Gerência de Geoprocessamento e estudos ambientais

Para a delimitação da bacia hidrográfica do rio Piabanha e Pedro do Rio, foi utilizada a ferramenta HEC-GeoHMS, que acopla os resultados do processamento do MDE para a entrada do modelo hidrológico HEC-HMS, dessa maneira, a ferramenta será descrita brevemente a continuação.

4.6.1 Ferramenta HEC-Geo-HMS

A extensão HEC-GeoHMS³³ foi desenvolvida pelo corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) como um kit de ferramentas de hidrologia espacial para engenheiros e hidrólogos. HEC-GeoHMS usa ArcGIS e a extensão *Spatial Analyst* para desenvolver uma serie de entradas que farão a conexão no modelo hidrológico HEC-HMS (Figura 4.8). Esta extensão encontra-se disponível gratuitamente na página da USACE.

A extensão, HEC-GeoHMS opera no MDE para o delineamento das sub-bacias e para preparar as entradas hidrológicas do HEC-HMS, o mesmo que, aceita estas entradas como ponto de partida para a modelagem hidrológica (HEC, 2013).

A análise dos dados digitais do terreno é feita pelo HEC-GeoHMS, que transforma os canais de drenagem e limites de bacias hidrográficas em uma estrutura de dados hidrológicos que representa a rede de drenagem. O programa também permite aos usuários visualizar informações espaciais e realizar análises espaciais.

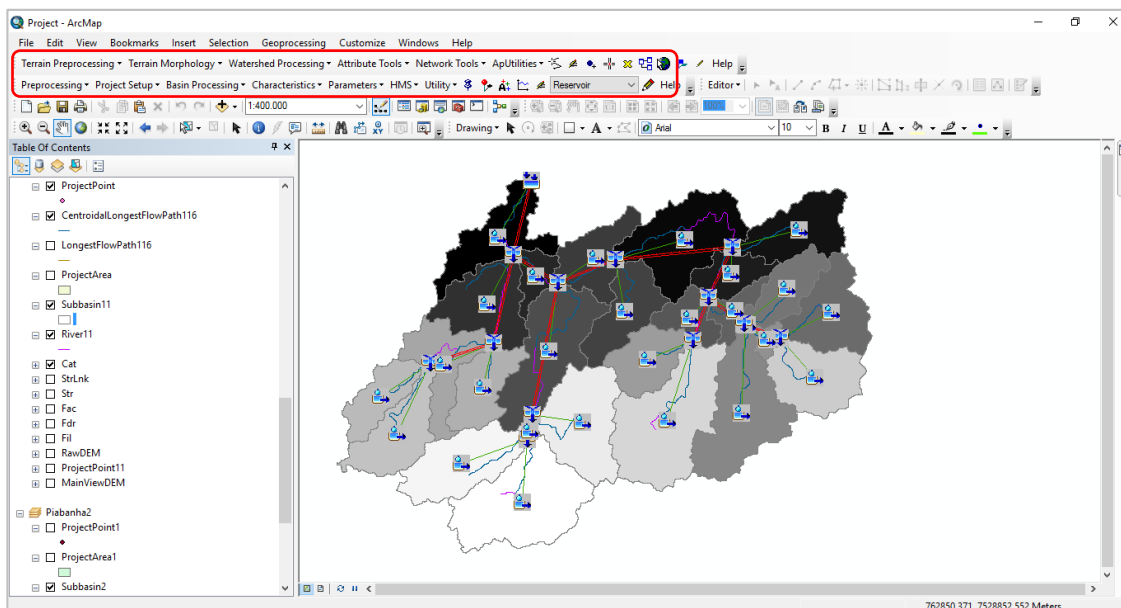


Figura 4.8 – Destaque da ferramenta HEC-GeoHMS em ambiente SIG

³³ Geospatial Hydrologic Modeling Extension – HEC-GeoHMS

Dessa maneira, a estruturação dos arquivos para a entrada da modelagem com ajuda do HEC-GeoHMS é explicada a continuação:

Uma vez obtido o MDE da área de estudo em formato GRID, é realizado o pré-processamento do terreno seguindo as etapas mencionadas abaixo:

1. O pré-processamento do terreno: Realizado com a ferramenta *ArchHydro*, que utiliza como dado de entrada o MDE escolhido. O primeiro passo é o preenchimento de possíveis afundamentos. Aberrações no MDE podem ocorrer frequentemente, causando depressões no terreno, estas depressões precisam ser preenchidas, caso contrário, a direção do fluxo pode sair errada nas fases posteriores do pré-processamento. O comando *Fill Sinks* foi o encarregado de fazer este preenchimento, nivelando essas depressões com o terreno circundante.

Em seguida, foram calculadas as direções do fluxo com o comando *Flow Direction*, neste processo, é utilizada a metodologia D8, a qual define o fluxo célula a célula em apenas uma direção dentro de oito possíveis caminhos em relação às células vizinhas. O comando seguinte foi o de acumulação de fluxo (*Flow accumulation*) que obtém o fluxo acumulado na superfície, nesta etapa já é possível definir o exutório da bacia, tendo em seguida a área de contribuição a montante desse ponto.

Continuando com o processo, o seguinte comando utilizado foi o *Stream Definition*, esta etapa classificou todas as células com acumulação de fluxo maior do que o limite definido (inicialmente 27 sub-bacias para Piabanha e 5 para Pedro do Rio) como células pertencentes a uma rede de drenagem. O próximo passo foi dividir dita rede em segmentos com o comando *Stream Segmentation*, ou seja, cada trecho delimitado por interseção de linhas de drenagem foi definido como um segmento.

Definidos os segmentos, foram traçados os polígonos que envolvem os segmentos, esses polígonos são a base para a delimitação automática da bacia e as sub-bacias, após traçados os polígonos foi gerada a hidrografia e os polígonos que formam a bacia de toda a imagem. Em seguida foi determinada a declividade da bacia com a ferramenta *slope*. Na Figura 4.9 pode-se observar as principais etapas realizadas no pré-processamento do terreno.

2. Configuração do projeto HEC HMS: Nesta etapa os comandos utilizados foram os da barra de ferramentas de HEC-GeoHMS. Estes comandos são responsáveis pela extração dos dados que serão posteriormente utilizados no projeto de modelagem (HEC-HMS). O primeiro passo nesta nova etapa foi definir o ponto de saída da bacia,

ou seja, o exutório. No caso da bacia do rio Piabanha escolheu-se como saída a estação fluviométrica Moura Brasil, e no caso da sub-bacia Pedro do Rio escolheu-se a estação Pedro do Rio.

Uma vez definido o ponto de saída, foi iniciado um novo projeto no ArcGIS com a área delimitada a montante do ponto. Um novo *data frame* (grupo de camadas em ArcGIS) foi automaticamente criado para os novos procedimentos. Na Figura 4.10, se observa já a bacia e as sub-bacias delimitadas, tanto para Piabanha quanto para Pedro do Rio.

3. Processamento de dados da bacia: Após a delimitação automática é possível fazer novas junções de sub-bacias, ou dividi-las, juntar trechos de rios, verificar o perfil longitudinal dos rios entre outros processos necessários ao estudo. Neste estudo, a bacia do Pedro do Rio que é a bacia de entrada para a modelagem, foi dividida em duas sub-bacias. A bacia do Parque a montante denominada W230 e a bacia a jusante denominada W220.

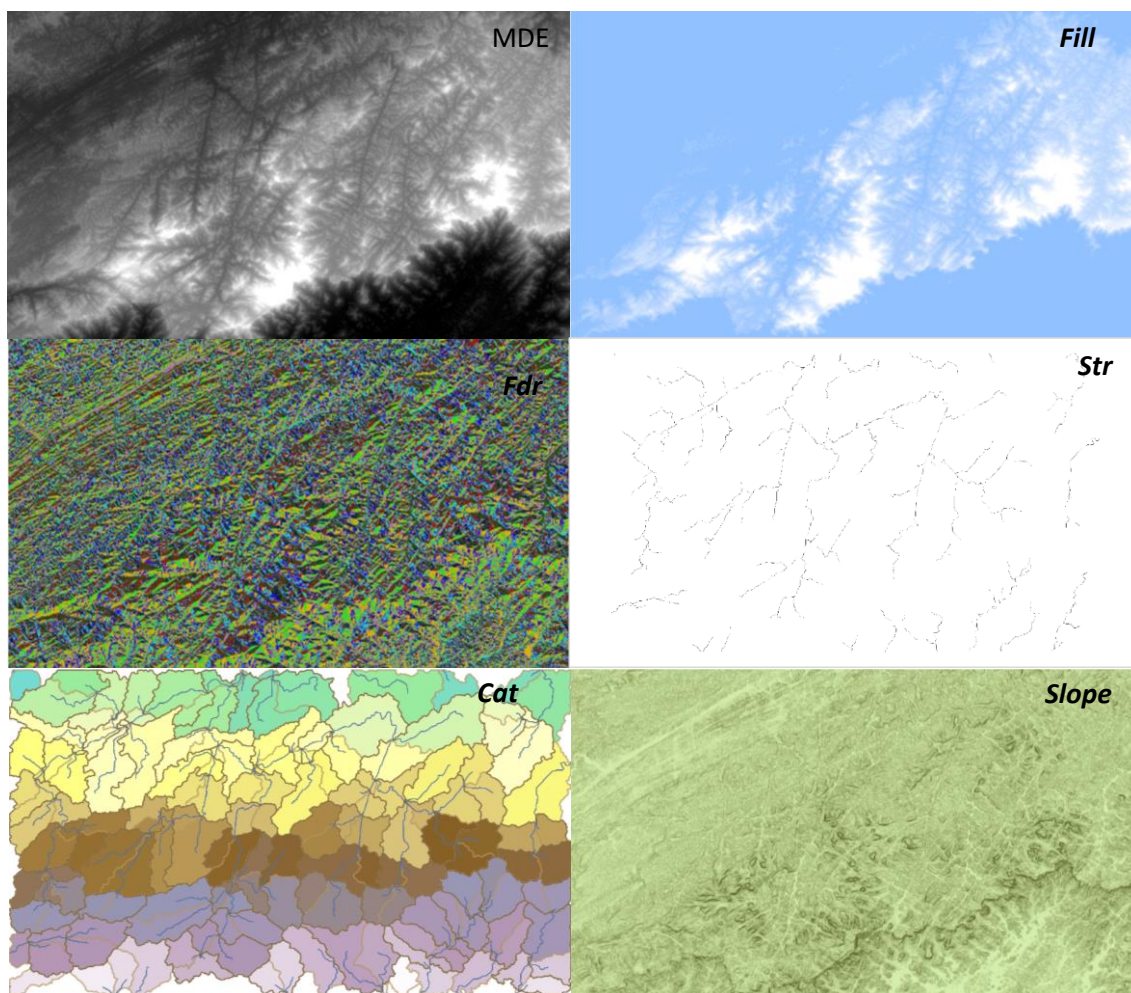


Figura 4.9 – Processamento do terreno (HEC-Geo-HMS)

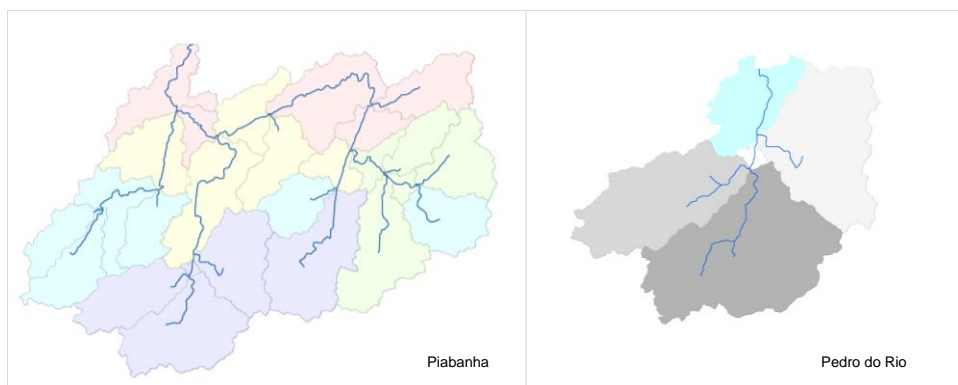


Figura 4.10 – Delimitação da bacia de estudo e sub-bacias

4. Características da Bacia: Nesta etapa foram calculadas diferentes características das sub-bacias e dos rios, as mesmas que são armazenadas na tabela de atributos. As características determinadas foram; Longitude e declividades dos rios, área das sub-bacias, perímetro, declividade média da bacia e o caminho mais longo do fluxo (*longuest flow path*).

5. Processo hidrológico para HEC-HMS: Após o cálculo das características físicas das sub-bacias e rios, o comando HEC-HMS *processes*, permite escolher os parâmetros que serão utilizados no estudo da modelagem e salvar estes parâmetros nas tabelas de atributos. Cabe ressaltar que os parâmetros escolhidos podem também ser modificados uma vez exportados e no ambiente do HEC-HMS.

6. Sistema do Modelo HEC HMS: Como passo final, a ferramenta HEC-GeoHMS cria o sistema de entrada no modelo HEC-HMS, neste processo, escolheu-se o sistema Internacional de Unidades (SI) e foi determinado o modelo de bacia, em linguagem do HEC-HMS. Além disso, foram criados os shapes da bacia e da rede de drenagem que será importada pelo modelo. Na Figura 4.11 é possível observar o modelo de bacia (Pedro do Rio) que foi exportado para o HEC-HMS.

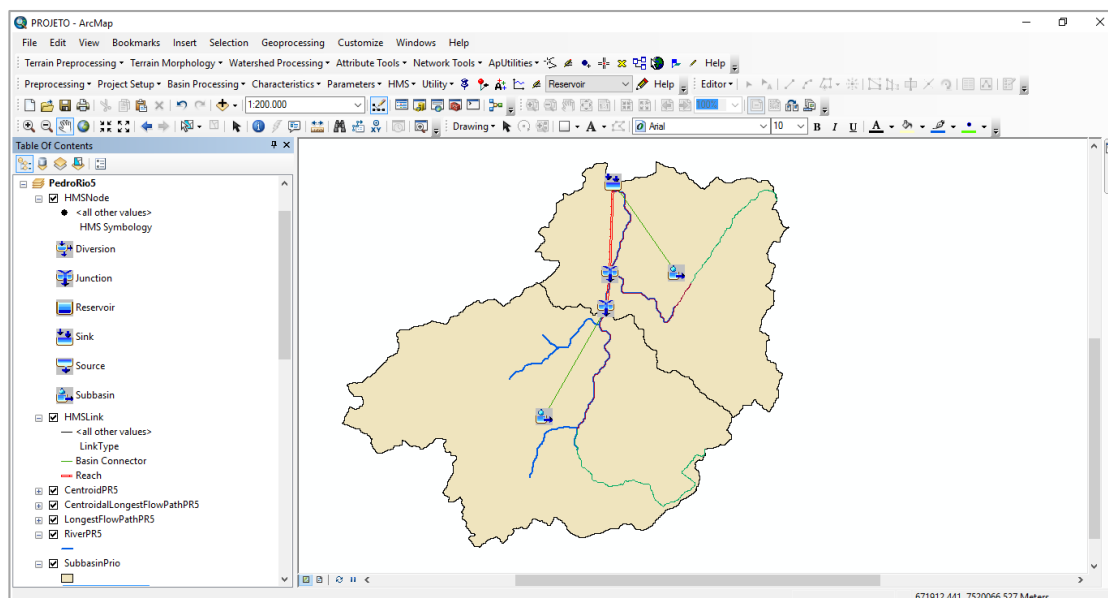


Figura 4.11 – Projeto final gerado pelo HEC-GeoHMS para a bacia de Pedro do Rio

4.7 Características morfométricas da bacia

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, dentre outros) e do tipo da cobertura vegetal (LIMA, 1986; TONELLO et al., 2006).

Desse modo, as características físicas e bióticas da bacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, na infiltração, na quantidade de água produzida como deflúvio, na evapotranspiração e nos escoamentos superficial e sub-superficial. Além disso, essas características tornam-se muitas vezes indicadoras da previsão de fenômenos como enchentes, inundações e erodibilidade (MIOTO et al., 2014; CARDOSO et al., 2006).

A determinação das características morfométricas e físicas da bacia do rio Piabanha e Pedro do Rio, foi realizada com ajuda do MDE processado com a ferramenta HEC-GeoHMS, dessa maneira, alguns índices foram determinados na bacia, entre eles destacamos:

Coefficiente de Compacidade (KC) – É a relação entre o perímetro da bacia (P_e) e uma circunferência de área (A) igual à da bacia. Esse coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia independente do seu tamanho, assim quanto mais irregular ela for, maior será o coeficiente de compacidade, ou seja, quanto mais próxima da unidade, mais circular será a bacia e será mais sujeita a enchentes (VILLELA E MATTOS, 1975). (Equação 4.1);

$$Kc = 0,28 \frac{Pe}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

Fator de Forma (Ff) – É a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia hidrográfica. Segundo Villela e Mattos (1975), uma bacia com um fator de forma baixo (mais comprida) é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior. O fator de forma (F) foi determinado utilizando a Equação 4.2;

$$Ff = \frac{A}{Lt^2} \quad (4.2)$$

Índice de circularidade (Ic) – Acompanhando ao coeficiente de compacidade, o índice de circularidade tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular, e diminui à medida que a forma se torna alongada. A equação relaciona a área total da bacia e a área de um círculo de perímetro igual ao da área total da bacia (LANA et al., 2001) (Equação 4.3);

$$Ic = 12,57 \frac{A}{Pe^2} \quad (4.3)$$

Densidade de drenagem (Dd): Uma indicação do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem é dada pelo índice chamado de densidade de drenagem Dd. Este índice é expresso pela relação entre o comprimento total dos canais (Lb) de uma bacia e a sua área total A e é determinada pela Equação 4.4;

$$Dd = \frac{Lb}{A} \quad (4.4)$$

A densidade de drenagem está definida em km/km² e é um índice que varia de 0,5 km.km⁻², para bacias com drenagem pobre, a 3,5 km.km⁻² para bacias excepcionalmente bem drenadas (VILLELA E MATOS, 1975).

Ordem da bacia - Determina o grau de ramificação ou bifurcação de uma bacia (HORTON, 1945). A ordem da bacia foi determinada pelo canal de ordem maior.

4.7.1 Características do relevo

O relevo de uma bacia hidrográfica tem grande influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, já que a velocidade do escoamento superficial é

determinada pela declividade do terreno, enquanto que a temperatura, a precipitação, e a evapotranspiração são funções da altitude da bacia.

Declividade e curva hipsométrica: O modelo digital de elevação foi utilizado como entrada para a geração do mapa de declividade bacia do rio Piabanha e Pedro do Rio, assim como também para a geração da curva hipsométrica da sub-bacia Pedro do Rio. Foi calculada a declividade média das bacias mencionadas e comparadas com as classes de declividade sugeridas pela Embrapa (1979), conforme mostrado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Quadro de declividades

Declividade	Discriminação
0 - 3	Relevo plano
3 - 8	Relevo suavemente ondulado
8 - 20	Relevo ondulado
20 - 45	Relevo fortemente ondulado
45 - 75	Relevo montanhoso
> 75	Relevo fortemente montanhoso

Fonte: EMBRAPA, (1979)

4.7.2 Tempo de Concentração

O tempo de concentração pode ser definido como o tempo necessário para uma gota de água percorrer superficialmente desde o ponto mais distante da bacia até seu exutório (MC-CUEN et. al., 1984; CHOW et. al., 1988).

Existem vários autores que desenvolveram equações empíricas para estimar o tempo de concentração, por meio de métodos analíticos e experimentais tais como Kirpich (1940); Dooge (1956); Chow (1962); SCS,1969; Ribeiro (1961) entre outros. Todas estas fórmulas, produzem resultados bastante variados e foram desenvolvidas para diferentes estudos e ajustadas de acordo com as características físicas e hidrológicas do local estudado.

Uma pesquisa mais profunda no que concerne às equações dos tempos de concentração foi desenvolvida por Silveira (2005), o autor avaliou 23 equações de tempos de concentração, as suas variáveis e descreveu as condições de uso levando em consideração aonde e para que tipos de estudos foram desenvolvidas.

Da mesma maneira Almeida et. al. (2014) relaciona 30 metodologias empíricas de tempos de concentração, por meio de técnicas de agrupamentos de dados (*clusters*) com o objetivo de estudar a similaridade entre elas.

Nesse contexto, para este estudo foram aplicadas quatro equações de TC, levando em consideração principalmente o tamanho das bacias para as quais estas equações foram desenvolvidas, aplicadas e testadas. As escolhidas foram a de; Dooge (1956); Corpo de Engenheiros (1946); Ribeiro (1961) e Kirpich (1940).

A equação de Dooge foi divulgada no Brasil por Porto (1995) (SILVEIRA, 2005). Esta equação leva em consideração a área da bacia (A) em km² e a declividade do talvegue S (m.m⁻¹). As bacias estudadas para o desenvolvimento desta fórmula foram bacias rurais da Irlanda com áreas entre 140 e 930 km², a fórmula é apresentada na Equação 4.5.

$$T_c = 0,365A^{0,41} S^{-0,17} \quad (4.5)$$

A equação de TC do Corpo de Engenheiros foi desenvolvida em Estados Unidos para bacias rurais menores a 12.000 km² (SILVEIRA 2005), esta equação leva em consideração o comprimento do curso d'água principal (L) em km e a sua declividade média S (m.m⁻¹) (Equação 4.6).

$$T_c = 0,191L^{0,76} S^{-0,19} \quad (4.6)$$

A equação de Kirpich foi desenvolvida para o estado de Tennessee (EUA) principalmente para bacias rurais pequenas (0,450 km²) e com declividades altas (3 - 10%). Dessa maneira quando a equação é usada para bacias maiores, muitas vezes os tempos de concentração encontrados são menores dos que os reais (Silveira, 2005). Esta fórmula foi aplicada para a bacia de estudo, porém apenas com fins de comparação. A fórmula da equação de Kirpich utiliza o comprimento do rio desde a cabeceira L (km) e a sua declividade S (m.m⁻¹) (Equação 4.7)

$$T_c = 0,0663L^{0,77} S^{-0,385} \quad (4.7)$$

George Ribeiro (1961) propôs uma equação de TC que foi aplicada em bacias com áreas menores a 19.000 km² e rurais, leva em consideração uma variável diferente, que seria a porcentagem de mata (%) na bacia, as outras variáveis são a longitude do talvegue principal L (km) e a declividade do mesmo S (m/m) (Equação 4.8)

$$T_c = 0,222(1,05 - 0,2p)^{-1} L S^{-0,04} \quad (4.8)$$

Dessa maneira, foram aplicadas estas equações de TC para a a sub-bacia Parque, para a sub-bacia Pedro do Rio e para a bacia do rio Piabanha. Para o cálculo do TC com a fórmula do George Ribeiro foi necessário calcular a porcentagem de mata na bacia, isto foi realizado com ajuda do mapa de uso e cobertura do solo, levou-se em consideração como “mata” os usos tais como, Floresta, Reflorestamento e Vegetação secundaria.

Cabe ressaltar que estes tempos de concentração foram também comparados com outros estudos (GONÇALVES, 2008; ARAÚJO 2016; COHN 2014). A fórmula escolhida para o TC foi a de George Ribeiro (1961) por levar em consideração a fração de mata, já que a bacia apresenta vasta vegetação, além disso, esta fórmula, apresenta resultados similares aos de alguns estudos já realizados na bacia de estudo. Na Tabela 4.2 são observados os tempos de concentração calculados.

Tabela 4.2 – Tempos de concentração em horas, com diversas fórmulas

BACIA	DODGE	KIRPICH	C.ENGENHEIROS	GEORGE RIBEIRO
PARQUE PET.	10,90	2,57	4,14	7,26
PEDRO RIO	12,12	3,71	5,63	10,09
PIABANHA	23,76	7,49	10,39	19,89

4.8 Aplicação do modelo chuva – vazão HEC-HMS

É de conhecimento, que a escolha de um modelo apropriado para uma determinada bacia hidrográfica, não representa uma tarefa simples, depende de vários fatores entre os quais podemos destacar, o objetivo para o qual o modelo será implementado, as características físicas da bacia, e principalmente a disponibilidade de dados.

Para a simulação das vazões decorrentes dos dados de precipitação, o modelo chuva-vazão HEC-HMS (descrito no capítulo 2, item 2.8) foi escolhido como ferramenta para este estudo. Para a escolha deste modelo foram levados em consideração alguns pontos importantes mencionados a seguir:

- O modelo é de distribuição gratuita, disponível na página do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*USACE – U.S. Army Corps of Engineers*). É um modelo que foi criado e publicado em sua primeira versão

em 1968, foi melhorado com o decorrer dos anos apresentando versões novas bastante utilizadas no mundo inteiro, tornando-se um modelo mais robusto que a cada ano apresenta novas ferramentas.

- O HEC-HMS tem disponíveis vários métodos de cálculo para os diferentes tipos de escoamento, que podem ser adequados para diferentes tipos de bacias, deixando ao usuário à escolha do método indicado.
- O HEC-HMS a pesar de não ser muito utilizado no Brasil como modelo de processos contínuos, é utilizado como modelo de eventos para simulação de cheias. No mundo, segundo literatura consultada, o modelo é muito utilizado em países da Ásia, da Europa e nos Estados Unidos.
- As características das bacias, aonde o modelo já foi aplicado, têm semelhanças com as características da bacia do rio Piabanha e da sub-bacia do Pedro do Rio. Semelhanças enquanto à área, características montanhosas, declividades pronunciadas e vasta vegetação.
- O modelo apresenta uma ferramenta ligada ao software ArcGIS, que transforma a bacia e suas características para a linguagem de leitura do HEC-HMS, delimitando a bacia e as sub-bacias de acordo com o objetivo do usuário e podendo trabalhar com dados de grelha.

Dessa maneira, optou-se pela escolha do HEC-HMS com o intuito de verificar o desempenho do mesmo na bacia experimental do rio Piabanha, no caso de apresentar um desempenho positivo poder-se-ia constituir assim, em mais uma ferramenta gratuita para estudos futuros.

4.8.1 Área da modelagem e períodos escolhidos

A bacia representativa do Pedro do Rio e a sua sub-bacia Parque Petrópolis, foram selecionadas para serem o estudo de caso. Esta escolha foi devida principalmente, à disponibilidade dos dados, já que dentro de toda a bacia do rio Piabanha a bacia Pedro do Rio é a que apresenta mais dados disponíveis.

Dessa maneira, e seguindo o objetivo proposto de verificar se a modelagem com dados em escala temporal diária (normalmente realizada na bacia), é suficiente para uma bacia com TC sub-diário, a modelagem foi dividida em duas fases;

Modelagem com dados diários: Esta modelagem foi baseada na série histórica diária de 1998 até 2004, série também escolhida por estudos anteriores (GONÇALVES, 2008; LOU, 2010; ARAUJO, 2016). Os resultados apresentados com esta modelagem poderão ser analisados e comparados a esses estudos, fato que dará um suporte para a avaliação do modelo ora estudado.

Outra vantagem do uso desse período é a comparação de alguns parâmetros comuns, e que podem ser utilizados como parâmetros iniciais na simulação. É importante também salientar que estas séries históricas, apresentam a maioria dos dados hidrológicos já consistidos pela ANA, fato importante para realizar a modelagem.

A bacia de estudo escolhida para a modelagem diária, foi a bacia de Pedro do Rio e foi dividida em duas sub-bacias que foram chamadas de, bacia alta (W230) e a bacia baixa (W220).

Modelagem com dados horários: O período da modelagem horária escolheu-se de acordo aos dados disponíveis sem falhas de chuvas e vazões. Dessa maneira, o período adotado foi de agosto de 2012 até novembro de 2012 para calibração, sendo a validação para o mesmo período porém nos anos de 2013 e 2014. Os dados de vazão disponíveis para esta modelagem tiveram início em agosto de 2012, fato pelo qual foi abordado apenas um período de 3 meses. A bacia selecionada para esta modelagem foi a bacia do Parque (W230).

É importante ressaltar que não havia a possibilidade de fazer a comparação de modelagem diária e horária com séries históricas diferentes. Dessa maneira, após feita a modelagem com dados horários na bacia do Parque, uma nova modelagem foi organizada, desta vez usando estações de chuva da ANA com medições diárias (estações pluviométricas usadas na modelagem diária anterior, porém com séries de 2012 até 2014 - dados brutos), enquanto às vazões, foram escolhidas da série de vazões horárias as medições das 7h e das 17 h (simulando o que normalmente é feito para vazões diárias), desses dois dados foi determinada a vazão média diária. Assim, obtiveram-se dados diários para o mesmo período da modelagem dos dados horários e os resultados foram comparados.

4.8.2 Dados de Entrada

Para rodar o modelo HEC – HMS, são necessários os dados de entrada mencionados a seguir;

- **O modelo da Bacia:** Este representa o modelo de bacia determinado pela ferramenta HEC-GeoHMS e está apresentado na Figura 4.8, este modelo é a representação esquemática da conformação das sub-bacias e suas conexões na linguagem do HEC-HMS.
- **O modelo meteorológico:** É representado pelos dados de precipitação e vazão descritos anteriormente no item 4.8.1 (nas séries escolhidas tanto para modelagem diária e horária). Neste modelo também devem ser especificados os pesos das estações em função aos polígonos de Thiessen (os polígonos de Thiessen foram realizados para tanto para as estações diárias quanto para as estações horárias)

O modelo meteorológico também é representado pelos dados de evapotranspiração, foram utilizados dados de evapotranspiração média mensal, obtidos para a modelagem diária, de Gonçalves (2008) que utilizou o método de Balanço Hidrológico Sazonal (BHS) e para a modelagem horária, dados de Araújo (2016) que usou a metodologia de Camargo (1971).

- **Tempo de Concentração:** O tempo de concentração escolhido dentre os métodos usados foi o do George Ribeiro.

Além desses dados iniciais de entrada, outros dados são necessários para os métodos escolhidos que representam os diferentes escoamentos no modelo, esses dados são geralmente parâmetros iniciais que devem ser determinados.

4.8.3 Parâmetros do modelo

Como já mencionado, o HEC-HMS apresenta alguns métodos ou modelos para o cálculo dos volumes de escoamento, visando representar o processo hidrológico numa bacia hidrográfica. Desses métodos, alguns pela sua concepção, não poderiam ser utilizados para processos contínuos, seriam próprios de simulações de eventos. Assim, a escolha dos métodos também foi baseada nas recomendações do manual Técnico do modelo HEC-HMS.

4.8.3.1 Cálculo de volumes de escoamento, método *Soil Moisture Accounting*

Para o cálculo de volumes de escoamento foi escolhido o método *Soil Moisture Accounting* (SMA) que é utilizado para processos de simulação contínua. O modelo SMA representa a bacia hidrográfica com uma serie de reservatórios de armazenamento

como ilustrado na Figura 4.12. Na mesma figura são observadas também, as conexões ou fluxos existentes entre estes reservatórios.

Seguindo o esquema, cada um dos reservatórios de armazenamento precisa para o seu cálculo a entrada de parâmetros que são apresentados no Quadro 4.2 e que serão mencionadas na descrição de cada um dos processos do SMA.

Cabe ressaltar que, o processo de estimar os parâmetros não é simples, existem dados a serem levados em consideração e muitas vezes esses dados, como por exemplo no caso dos solos, não existem ou não se encontram disponíveis facilmente.

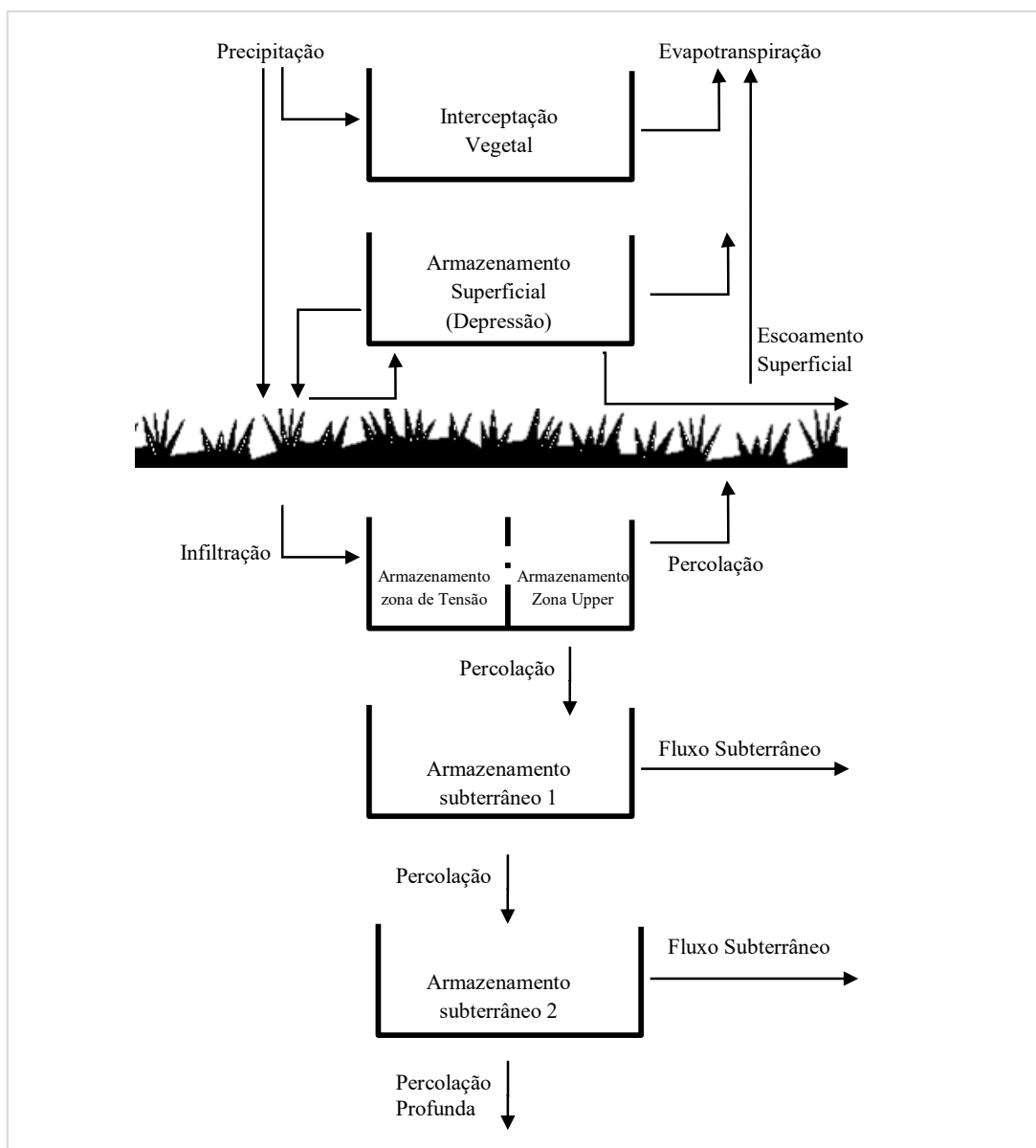


Figura 4.12 – Esquema conceitual do modelo SMA

Fonte: adaptado HEC (2000)

Quadro 4.2 - Relação de parâmetros do modelo SMA

	NOME	ABREV. NO MODELO	UNIDADES
CANOPY	Interceptação Vegetal	Canopy Interception Storage	mm
	Conteúdo Inicial da Interceptação vegetal	Initial Storage	(%)
SURFACE	Interceptação Superficial (Depressões)	Surface Interception Storage	mm
	Conteúdo inicial da Interceptação por superfície	Initial Storage	(%)
LOSS	Conteúdo Inicial de Armazenamento no Solo	Soil	%
	Conteúdo Inicial de Armazenamento	GW1	%
	Conteúdo Inicial de Armazenamento	GW2	%
	Máxima Capacidade de Infiltração do solo	Max Infiltration	mm.h ⁻¹
	Impermeabilidade	Impervious	%
	Capacidade de Armazenamento do Solo	Soil Storage	mm
	Capacidade de Armazenamento na Zona de Tensão do Solo	Tension Storage	mm
	Maxima Capacidade de Percolação do Solo	Soil Percolation	mm.h ⁻¹
	Capacidade de Armazenamento do Reservatório Subterrâneo 1	GW1 Storage	mm
	Máxima Capacidade de Percolação do Reservatório Subterrâneo 1	GW1 Percolation	mm.h ⁻¹
	Coefficiente de Armazenamento do Reservatório Subterrâneo 1	GW 1 Coefficient	h
	Capacidade de Armazenamento do Reservatório Subterrâneo 2	GW2 Storage	mm
	Máxima Capacidade de Percolação do Reservatório Subterrâneo 2	GW2 Percolation	mm.h ⁻¹
	Coefficiente de Armazenamento do Reservatório Subterrâneo 2	GW 2 Coefficient	h

Armazenamento por Interceptação Vegetal: Este reservatório representa a precipitação que é capturada ou reservada nas plantas, nas folhas das árvores, arbustos e gramíneas e não atinge a superfície do solo, a precipitação interceptada evapora entre os eventos de chuvas. O excesso de água da precipitação, uma vez cheio o armazenamento da interceptação, junto com a água que cai na superfície do solo, constituem o volume de água disponível para a infiltração na camada superficial do solo.

No HEC-HMS a condição inicial da interceptação vegetal em porcentagem (*Initial Storage*), deve ser especificada pelo usuário, a mesma refere-se à quantidade de água que as plantas estão acumulando ao início da simulação.

O segundo parâmetro a ser definido pelo usuário é a capacidade máxima de armazenamento das plantas em milímetros (*Max. Storage*), que representa a quantidade máxima de água que pode ser retida nas folhas antes de cair para superfície enquanto dura a precipitação. O uso do método de interceptação vegetal é opcional e geralmente usado apenas para aplicações de simulação contínua.

A interceptação vegetal depende da densidade de vegetação que cobre o solo expressa pelo Índice de Área Foliar (IAF) que indica a relação entre a área das folhas de todas as plantas e a área de uma parcela de solo. Existem na literatura metodologias que fazem uso do IAF para o cálculo da interceptação vegetal como a apresentada por Collischonn (2001).

O trabalho do Colischonn (2001) expõe que alguns dados existentes na literatura mostraram que o IAF ($m^2.m^{-2}$) pode ter valores em torno de 2 e 3 para campo e pastagem, valores de 6 a 9 para florestas e valores de 0 a 6 em cultivos anuais. Para estudos do efeito da vegetação no comportamento hidrológico de uma bacia, os IAF dos diferentes tipos de vegetação poderiam ser medidos utilizando procedimentos de campo, já que, muitas vezes, a classificação do uso de solo e cobertura vegetal podem ser fontes de incertezas.

Na Tabela 4.3 observam-se alguns tipos de cobertura vegetal e seu respectivo IAF segundo diferentes fontes publicadas por Collischonn (2001).

Tabela 4.3 – Índice de Área Foliar -IAF

Tipo de Cobertura	IAF	Fonte
Coníferas	6	Bremiker (1998)
Floresta decídua	6*	Bremiker (1998)
Soja irrigada	7,5*	Fontana et al. (1992)
Soja não irrigada	6*	Fontana et al. (1992)
Floresta amazônica	6 - 9,6*	Honzák et al. (1996)
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5	Roberts et al. (1996)
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9	Roberts et al. (1996)
Savana Africana (região semi-árida)	1,4	Kabat et al. (1997)
Cerrado (estiagem)	0,4	Miranda et al. (1996)
Cerrado (época úmida)	1	Miranda et al. (1996)
* Valor máximo durante o ciclo anual		

Fonte: COLLISCHONN (2001)

Da mesma maneira, alguns valores podem ser estimados em função da precipitação anual para perdas por interceptação, porém deve se adotar um valor de acordo com o tipo de vegetação assim como: prados, de 5 a 10% da precipitação anual; bosques espessos, cerca de 25% da precipitação anual, entre outros valores.

Alguns autores sugerem que, se a chuva total de um evento for inferior a 1 mm, ela será interceptada em sua totalidade, e se for superior a 1 mm, a interceptação pode variar entre 10 e 40 % (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Neste trabalho, para a determinação da capacidade máxima de armazenamento por interceptação vegetal (*Max. Storage*) foi utilizado o mapa de uso e cobertura de solos do ZEE do Estado do Rio de Janeiro (escala 1:100.000). Pelo fato de não termos como dado de entrada um mapa de uso e cobertura vegetal numa escala mais detalhada, para uma bacia pequena como a bacia estudada, a classificação encontrada na área pode não ser totalmente representativa. Dita classificação apresenta: Afloramento rochoso, floresta, reflorestamento, vegetação secundária em estágio inicial, agricultura, pastagem, ocupação urbana e água (Figura 4.13).

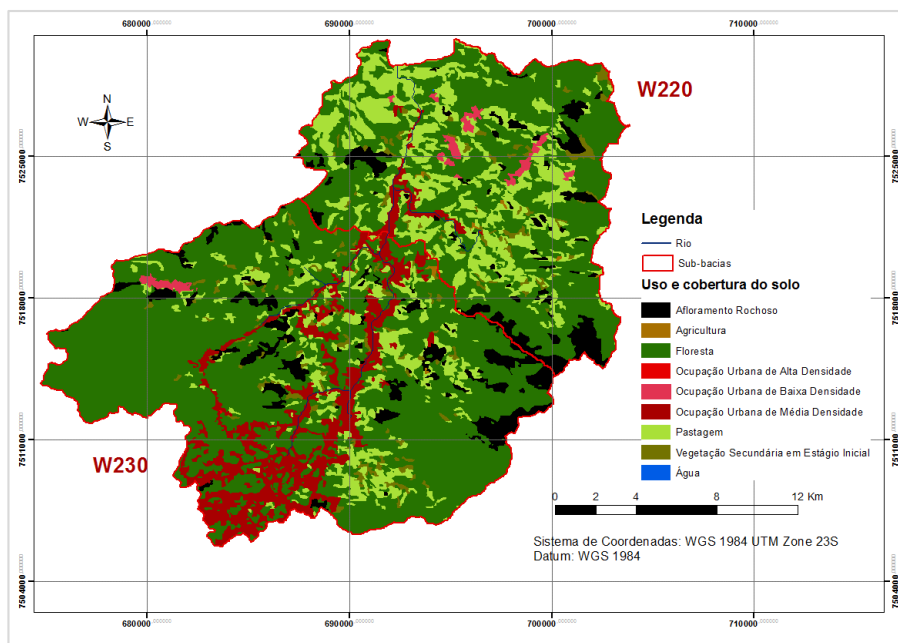


Figura 4.13 - Mapa de uso e cobertura de solos

Fonte: adaptado do ZEE (INEA)

Dessa maneira, duas metodologias foram aplicadas para estimar a interceptação vegetal. A primeira metodologia (MET-1), foi obtida a partir de um estudo realizado na Espanha (GOBIERNO VASCO, 2003), que apresenta bacias com características similares à bacia de estudo em uso de solos e cobertura vegetal e características montanhosas.

Na Tabela 4.4, observam-se valores de interceptação para determinadas classes de uso de solo e cobertura vegetal, esses valores foram utilizados para determinar uma média ponderada da capacidade máxima de armazenamento por interceptação vegetal (mm) para as sub-bacias W230 e W220, que conformam a bacia Pedro do Rio, levando em consideração as áreas correspondentes a cada uma dessas classes no mapa de uso e cobertura vegetal.

Tabela 4.4 – Interceptação de água por parte da vegetação

Uso e Cobertura Vegetal	Interceptação (mm)
Floresta	9
Mata	4
Pastagem	3
Urbano	0
Solo exposto	0
Reflorestamento	9
Parques urbanos	3
Cultivo agrícola	1

Fonte: Gobierno Vasco (2003)

Entretanto, por entendermos que podem existir diferenças entre as espécies e a classificação realizada por um país Europeu, foi estabelecida uma segunda metodologia (MET2) a partir da equação sugerida por Pruski, Rodrigues e Silva (2001) e proposta por Ehlers (1989), em que o cálculo é feito a partir de um valor conhecido de área foliar, assim, a máxima interceptação pela cobertura vegetal ICV (mm) é estimada em função do índice de área foliar (IAF) (Equações 4.9; 4.10)

$$ICV = 0,932 + 0,499 IAF + 0,0057 IAF^2 \quad (4.9)$$

sendo:

$$IAF = \frac{Ap.Sd}{10000} \quad (4.10)$$

em que:

ICV - interceptação máxima pela cobertura vegetal, mm;

IAF - índice de área foliar da cultura, cm² de folhas cm⁻² de solo;

Ap - área foliar por planta no tempo t, cm² de folhas planta⁻¹ e

Sd - densidade de plantas, plantas m⁻².

Cabe destacar, que neste caso o IAF não foi calculado e sim estimado a partir de uma média ponderada, usando os critérios dos estudos acima mencionados (Tabela 4.3 - Collischonn) considerando que a bacia em estudo apresenta mais de 50% de área em classe Floresta e mais de 20% em classe pastagem.

Assim, estas duas metodologias foram aplicadas para determinar os valores da interceptação vegetal nas sub-bacias W230 e W220 formadoras da bacia do Pedro do Rio obtendo-se como valor estimado a média das duas metodologias, por considerar valores parecidos. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores estimados;

Tabela 4.5 – Capacidade de armazenamento por interceptação vegetal

CLASSIFICAÇÃO	PARQUE W230		PARQUE W220	
	AREA (km)	AREA (%)	AREA (km)	AREA (%)
AGUA	0,000	0,0	0,011	0,0
AFLORAMENTO ROCHOSO	17,912	6,8	13,553	8,0
AGRICULTURA - AGRICUL. CAFÉ	0,261	0,1	0,295	0,2
FLORESTA	178,319	67,7	98,685	58,4
REFLORESTAMENTO	0,000	0,0	0,000	0,0
VEGET.SECUNDARIA ESTAGIO INICIAL	5,970	2,3	4,645	2,7
PASTAGEM E PASTAGEM EM VARZEA	24,963	9,5	45,786	27,1
OCUPAÇÃO URBANA	35,818	13,6	6,098	3,6
TOTAL	263,243	100,0	169,073	100,0
	PARQUE W230		PARQUE W220	
INTERCEPTAÇÃO VEGETAL - MET-1 (mm)	6,6		6,1	
INTERCEPTAÇÃO VEGETAL - MET-2 (mm)	4,0		3,9	
VALORES USADOS NA MODELAGEM	5,3		5,0	

Dessa mesma maneira, além do parâmetro de máxima capacidade de armazenamento para interceptação vegetal, o modelo pede como entrada o parâmetro *Initial Storage* em porcentagem, isto é, a quantidade de água acumulada nas plantas no início do intervalo da simulação. O valor estipulado foi 0% já que foi verificado que no primeiro dia da simulação não choveu nem no dia anterior, embora possa existir água nas plantas, foi adotado este parâmetro como zero como uma forma de aquecimento para a modelagem.

Armazenamento de Interceptação Superficial: O segundo reservatório representa o armazenamento da água que fica retida em depressões da superfície. O fluxo neste armazenamento vem da precipitação que não foi capturada pelas plantas e pelo excesso quando superada a taxa de infiltração. A saída de fluxo deste reservatório pode ser por evapotranspiração e também por infiltração.

Qualquer quantidade de água no reservatório ao início do intervalo de tempo estará disponível para infiltração, desde que as condições de solo permitam. Se a água disponível para infiltração exceder a taxa de infiltração, o armazenamento de interceptação superficial será enchido. Uma vez que dito volume extrapolar o reservatório, este excesso contribuirá com o escoamento superficial.

Para a determinação deste volume de água, de acordo com Bennett (1998) citado por Ibrahim (2010), os autores Dunne e Leopold (1978) e Chow (1964) apresentaram alguns dados de estudos para estimar este valor, baseados na descrição da superfície do solo. Dessa maneira, na Tabela 4.6 são mostrados os valores levando em consideração a declividade e a superfície do solo.

Tabela 4.6 - Armazenamento superficial em depressões

Descrição	Declividade (%)	Armazenamento Sup. (mm)
Zonas pavimentadas	-	3,2 - 6,4
Declividades fortes	>30	1
Declividades suaves	5-30	12,7-6,4
Zonas planas	0-5	50,8

Fonte: Dunne e Leopold (1978)

Todavia, por considerar que na bacia Pedro do Rio existem áreas com várias irregularidades no terreno nas declividades, foi feita uma separação acrescentando um faixa de declividade entre 5 e 10% com valores de 20 mm de armazenamento superficial. Outros autores da mesma maneira, fizeram algumas considerações à tabela apresentada, levando em conta o local de estudo. Desse modo, a Tabela 4.7 apresenta os valores adotados.

Tabela 4.7 – Valores de armazenamento superficial em depressões adotados

Descrição	Declividade (%)	Arm Sup em Depressões(mm)
Zonas pavimentadas	-	5
Declividades fortes	>30	1
Declividades suaves-onduladas	10-30	9,5
Declividades planas-suaves	5-10	20
Zonas planas	0-5	50,8

Uma vez com os valores adotados, para o cálculo do armazenamento nas sub-bacias W230 e W220, foi necessário o uso do raster de declividades da bacia. Em seguida, foi feita uma reclassificação (Figura 4.14) em função dos valores da tabela acima apresentada, assignando estes valores para as faixas de declividades mostradas. Feita a reclassificação foram obtidas as áreas correspondentes para o cálculo dos valores de armazenamento superficial para cada sub-bacia, os valores finais são apresentados na Tabela 4.8.

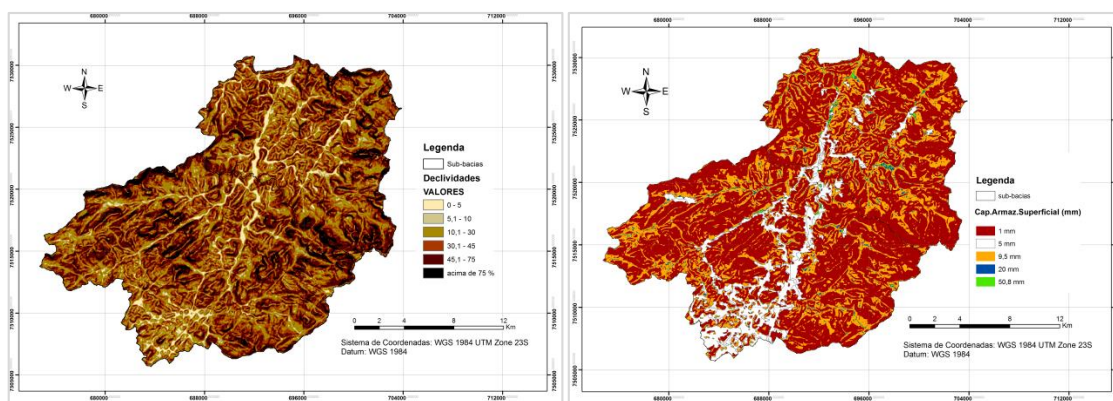


Figura 4.14 – Mapa de declividades Pedro do Rio/ Mapa de armazenamento superficial em depressões

Tabela 4.8 – Armazenamento superficial em depressões nas bacias

Bacia	Armazenamento Sup (mm)
W230	4,1
W220	4,5

Armazenamento do Perfil do Solo: Este armazenamento representa a água armazenada na camada superior do solo, aonde o fluxo entrante é a infiltração da superfície e as saídas de fluxo incluem a percolação para uma camada de água subterrânea e a Evapotranspiração (ET).

A zona do perfil do solo é dividida em duas regiões, a zona superior e a zona de tensão, a zona superior é definida como a porção do perfil do solo que perderá água para a ET e/ou percolação, já a zona de tensão é definida como a área que perderá água apenas para ET.

A zona superior representa a água mantida nos poros do solo e que é susceptível de ser pressa pelas raízes das plantas ou pela ação da gravidade (percolação), e a zona de tensão representa a água ligada às partículas do solo, a ET ocorre a partir da primeira zona, a superior. Na zona de tensão a ET apenas acontece após a da zona superior, isto representa a resistência crescente natural na remoção de água aderida às partículas do solo.

Dessa maneira, para representar este armazenamento no modelo hidrológico, quatro parâmetros devem ser determinados:

- capacidade de Armazenamento do solo (CAS);
- capacidade de Armazenamento na zona de Tensão do solo (CAZTS);
- máxima Capacidade de Infiltração no solo (MCIS);
- capacidade de Percolação do solo (CPS).

Estes valores estão relacionados em maior ou menor medida com as características do solo, no entanto, existe muitos casos que poderiam apresentar-se, já que, o solo pode ser muito diferente entre locais não muito distantes. Portanto, resulta difícil fazer uma estimativa quando ainda não se tem dados específicos de solos na bacia. Vários autores fizeram estimativas utilizando diversas fontes de dados de solos de outras bacias, tentando aproximá-los aos seus estudos de caso.

Nesse sentido, um levantamento que está sendo realizado na sub-bacia de Bonfim (CT Hidro RHIMA³⁴ parceria com a Embrapa) e que já conta com alguns perfis de solo, porém em revisão, foi utilizado para fazer as estimativas, aliado a algumas outras fontes como o mapa dos solos, uso e cobertura, entre outras que serão apresentadas nesta descrição. Na Figura 4.15 estão apresentados os pontos aonde foram feitos já alguns levantamentos de perfil de solos, ressaltando que ainda são dados a serem revisados e pertencem apenas à parte da sub-bacia Bonfim.

Dessa maneira, o primeiro parâmetro a ser estimado é a Capacidade de armazenamento do solo (CAS) que representaria a primeira camada de solo. Para estimar este parâmetro que simula a quantidade de água que o solo pode armazenar, seria necessário o conhecimento da espessura dos solos nas sub-bacias de estudo, além da sua porosidade.

No mapa de tipo de solo apresentado na Figura 4.15, pode-se observar que os tipos de solos dominantes na região, de uma maneira geral são os cambissolos háplicos, que representam, principalmente à bacia W230, os latossolos vermelho-amarelo que se encontram mais na bacia W220, e o afloramento rochoso que está em ambas bacias, observa-se também áreas de neossolo litólico.

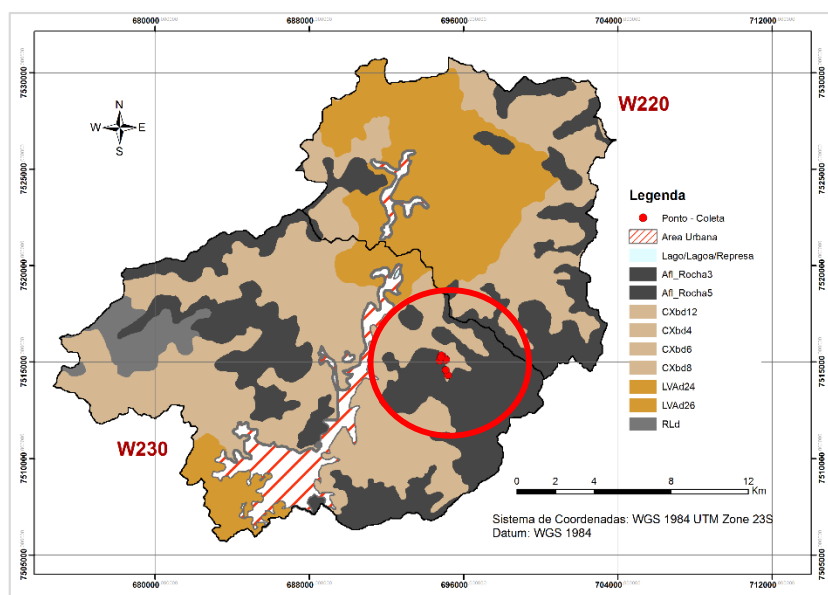


Figura 4.15 – Mapa de solos da sub-bacia Pedro do Rio

Fonte: SEA (2011)

³⁴ Rede de pesquisa em monitoramento e modelagem de processos hidrossedimentológicos em bacias representativas rurais e urbanas do bioma Mata Atlântica – Chamada pública MCT/Finep CT Hidro 01/2010 (Ressaltando que os dados adquiridos são dados iniciais, não são publicados pois o projeto está em andamento)

Cada um desses tipos de solos apresenta muitas variações, existem níveis de classificação chamados de níveis categóricos do sistema, que são um conjunto de classes definidas. As características ou propriedades usadas para a definição de um nível categórico, são as propriedades do solo que podem ser identificadas em campo, ou inferidas de outras propriedades que são reconhecidas também em campo, ou a partir de conhecimentos da ciência do solo e disciplinas correlatas (EMBRAPA, 2006)

Dessa maneira e levando em consideração a escala do mapa de solos utilizado (1:100.000) neste estudo, resulta complicado fazer uma descrição detalhada dos tipos existentes na região, porém com os conhecimentos gerais desses tipos de solos, poder-se-ia chegar a uma aproximação para a modelagem hidrológica, embora não seja o apropriado, é o dado que pode ser obtido.

É importante ressaltar também que para a modelagem, é necessário apenas a média da espessura dos solos nas sub-bacias, por ser um modelo concentrado este valor será o representativo. Nesse contexto, e de forma geral serão feitas algumas descrições das classes de solos até o segundo nível categórico;

Cambissolos: Compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte Bi (incipiente) subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, exceto hístico com 40cm ou mais de espessura, ou horizonte. (EMBRAPA, 2006)

- **Cambissolos háplicos:** São solos geralmente bem drenados e possuem espessuras em torno de 60. Possuem horizonte A moderado ou proeminente, com espessura de 20 a 25 cm e o horizonte Bi apresenta textura média ou argilosa. Estes solos ocorrem principalmente em morros e montanhas com encostas dissecadas, em relevos forte-ondulado e montanhoso com declives 40 a 70% sendo predominantemente recobertos por florestas alteradas (EMBRAPA, 2001).

Latossolos: compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B latossólico. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada. São normalmente muito profundos, sendo a espessura do *solum* raramente inferior a um metro. Têm sequência de horizontes A, B, C, com pouca diferenciação de subhorizontes, e transições usualmente difusas ou graduais (EMBRAPA, 2006).

- **Latossolo vermelho amarelo:** Solos profundos ou muito profundos que apresentam horizonte A moderado, geralmente com espessura em torno de 10 a 20 cm, textura média a argilosa. O horizonte B tem espessura superior aos 200 cm com textura argilosa, muito friável quando úmida e plástica e pegajosa quando molhada (EMBRAPA, 2001). Estes solos ocorrem em posições fisiográficas de colinas, morros com encostas de relevo ondulado a montanhoso, com declives de 8%-50%.

Neossolo: Compreende solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

- **Neossolo litólico:** Solos com horizonte A ou hístico, assentes diretamente sobre rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm (Cascahos). Admite um horizonte B em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

Uma vez com estas definições dos solos existentes nas sub-bacias, e com ajuda dos oito perfis obtidos do projeto RHIMA, que estão sendo levantado na sub-bacia do Bonfim, sub-bacia localizada na bacia W230, foi gerada a Tabela 4.9 que apresenta um resumo das espessuras dos solos aproximada e seu tipo de vegetação.

Tabela 4.9 – Perfis de solo levantados na sub-bacia do Bonfim

	PERFIL	Classificação	Esp. Aprox (cm)	Vegetação primaria
1	31	Cambisoló Háplico	110	Floresta
2	42	Argisoló Amarelo	170	Floresta
3	52	Latossoló VA	120	Floresta
4	81	Neosoló Litólóico	35	Floresta
5	82	Cambisoló Háplico	90	Floresta
6	86	Cambisoló Háplico	50	Floresta
7	90	Argisoló Amarelo	85	Floresta
8	98	Cambisoló Háplico	75	Floresta

Fonte: dados do projeto em execução RHIMA (2016)

Observando a tabela acima apresentada, vemos que o Cambissoló Háplico é o mais recorrente, apesar de ter apenas 8 perfis, é confirmado com o mapa de solos da Figura 4.15. A vegetação é floresta e as espessuras são variadas, porém com tendências a valores baixos. Um valor médio estimado dessas espessuras seria de 90 cm (900 mm) com base nos valores da tabela foram estimados os valores de espessura

de solos para a sub-bacia W230 (70 cm) e W220 (100cm) por apresentar mais latossolo na área.

Lawall (2010) em sua busca por entender a dinâmica hidrológica dos solos fez o cálculo de valores médios de porosidade por meio de trabalho de campo, em algumas áreas da bacia do Bonfim, levando em consideração a profundidade e tipo de uso e cobertura do solo. Verificou em 81 amostras analisadas na bacia, que a fração predominante no solo era a de areia apresentando valores de 68% na área de floresta e de 41% na de pastagem. O projeto RHIMA que está sendo realizado na bacia, apresentou nos oito perfis cedidos para este estudo, solos Franco argilo arenosos e solos argilo arenosos, todavia, os dados dos perfis ainda não apresentam dados de porosidade.

Os valores de porosidade total que Lawall (2010) expôs no seu estudo, foram os utilizados para estimar a capacidade de armazenamento média dos solos nesta pesquisa, assim, a autora mostra que a floresta foi a que apresentou maiores valores de porosidade na superfície com 55% reduzindo para 52% em profundidades de 50 cm, em função da atividade biogénica no topo de solo, que favorece à formação dos poros, especialmente dos macroporos. Em relação à pastagem a porosidade apresentou valores entre 43 e 44%.

Por outro lado, Salas e Alpañes (1996) apresentam também equivalências de porosidade, levando em consideração a classificação de solos do *Soil Conservation Service*, em que os solos tipo C e D pertencem aos solos franco argilo arenosos e solos argilo arenosos, proporcionando valores de porosidade de 35% e 40% respectivamente.

Dessa maneira, diante do exposto, porosidades médias foram estimadas para as sub-bacias, em função dos tipos de solos, sua textura e uso e ocupação. Ressaltando que na bacia W230 o tipo Cambissolo háplico é o que mais prevalece, além de apresentar aproximadamente 60% de área de floresta, e a sub-bacia W230 apresenta maior quantidade de área em Latossolo VA e Cambissolo Háplico e área em floresta e pastagem.

Para a capacidade de armazenamento na zona de tensão do solo, Lee (1980) citado por Lima (2008) apresenta uma tabela relacionando a textura do solo à capacidade de armazenamento dessa zona. Gomes (2008) também cita a referida tabela para estimar este parâmetro. A Tabela 4.10 mostra esses valores, nos quais foram baseadas as estimações deste parâmetro.

Tabela 4.10 – Capacidade de armazenamento na zona de tensão

Textura	Capacidade (mm.m ⁻¹ de perfil)
Arenosa	100
Limosa	267
Argilosa	325

Fonte: Lee (1980) apud Lima (2008)

Capacidade de infiltração no solo (MCIS); a infiltração no solo é um processo importante do ciclo hidrológico, uma vez que determina quanta água que precipita irá escoar superficialmente. As atividades de uso da terra, exercem significativa influência sobre a infiltração e o homem pode assim, modificar a capacidade de infiltração por meio do manejo (LIMA, 2008).

O processo da infiltração define a entrada de água no solo. Já o movimento da água dentro do solo é referida à percolação. Horton (1933) define a capacidade de infiltração como a taxa máxima em que um dado solo, em determinadas condições, pode absorver água.

Na literatura existem algumas formas de estimar a capacidade da infiltração, muitos autores utilizam a metodologia do *Soil Conservation Service* (USDA, 1972) que classifica a capacidade de infiltração em quatro grupos principais, a seguir nomeados;

Solos A: Solos com alta capacidade de infiltração;

Solos B: Solos com capacidade de infiltração moderada;

Solos C: Solos com baixa capacidade de infiltração; e

Solos D: Solos com capacidade de infiltração muito baixa

Na Tabela 4.11, observam-se além dos valores de infiltração, os tipos de solos que representam esta classificação:

Tabela 4.11 – Taxa de infiltração do *Soil Conservation Service*

Grupo Hidrológico	Textura	Taxa de infiltração (mm.h ⁻¹)
A	Solo arenoso/franco arenoso	7,6 - 11,4
B	Solo franco arenoso/ franco	3,8 - 7,6
C	Solo franco siltoso / franco argilo arenoso	1,3 -3,8
D	Solo franco argiloso/ franco argilo siltoso/ argilo/ arenoso siltoso/argiloso	0,0 - 1,3

Fonte: GOMES (2008)

Em função dos valores dessa tabela, alguns autores em seus estudos estimaram a taxa de infiltração dos solos (GOMES, 2008; GOBIERNO VASCO, 2003; (SALEH; GHOBAD; NOREDIN, 2011) principalmente quando não havia disponibilidade de dados de campo ou de outras referências.

Para este trabalho, outras fontes foram consultadas, já que os valores exibidos na Tabela 4.11 do SCS mostram-se baixos para a bacia do rio do Piabanha, que apresenta mais de 50% de floresta aonde existe uma atividade biogênica alta.

Lawall (2010) fez uma ampla pesquisa sobre valores de infiltração. Identificou autores que determinaram valores de infiltração em diferentes estudos, Reichardt (1987), por exemplo, em seu estudo, apresentou valores de taxa de infiltração básica (TIB) definindo valores maiores de 30 mm.h^{-1} como muito altos, valores entre 15 e 30 mm.h^{-1} como altos, entre 5 e 15 mm.h^{-1} como médios e entre 5 e 1 mm.h^{-1} como baixos, sendo os muito baixos menores a 1 mm.h^{-1} .

Alguns autores destacam também que em regiões florestadas em relevo montanhoso a taxa de infiltração pode ser bastante alta (HARDEN e SCRUGGS, 2003). Nesse sentido, Lima (2008) sinaliza que a cobertura vegetal é um dos fatores importantes que pode influir sobre a condição superficial de solo, já que a presença de vegetação e a camada de material orgânico fornece proteção contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a compactação e a desagregação.

Nesse contexto, os valores estimados de infiltração para este trabalho foram baseados no trabalho de Lawall (2010) que apresenta valores de taxa de infiltração básica em floresta bem superiores aos 30 mm.h^{-1} indicados por Reichardt (1987), e em pastagem os valores estão de acordo com o indicado pelo autor. No Anexo I deste estudo pode ser observada uma recopilação de informação relativa a autoria, tipo de uso, textura, método e resultados da Taxa de Infiltração Básica levantada por Lawal (2010).

No referido a percolação, os valores estimados para a modelagem foram adotados do estudo do Governo Vasco (2003), que apresenta a relação entre a permeabilidade do tipo de substrato e a máxima capacidade de percolação como se observa na Tabela 4.12

Tabela 4.12 – Percolação para camadas profundas do solo

Tipo de substrato	Percolção (mm.h ⁻¹)
Permeabilidade alta	8
Permeabilidade média	4
Permeabilidade baixa	1

Fonte: Gobierno Vasco (2003)

Armazenamento nos reservatórios subterrâneos (*Groundwater storage GW1 e GW2*): O HEC-HMS distingue dois níveis para estes reservatórios que contribuem com o fluxo hipodérmico e fluxo base. Um mais superficial, que recebe diretamente água da percolação que excedeu a capacidade de armazenamento do solo e outro mais profundo que recebe a água percolada do reservatório anterior. Posteriormente, se ainda houver alguma percolação, esta é considerada perdida ou fora do sistema, já que entra no aquífero que não é modelado pelo HEC-HMS.

Neste estudo, foi apenas levado em consideração um dos reservatórios subterrâneos, o segundo foi desconsiderado pelo fato da bacia do Pedro do Rio apresentar solos muito jovens, solos pouco espessos.

Dessa maneira, os parâmetros que devem ser definidos pelo modelo neste reservatório são; Conteúdo inicial de água no reservatório GW1 em porcentagem, que representa a quantidade de água que o reservatório está armazenando no momento inicial da modelagem; Capacidade máxima de armazenamento do GW1 (mm); Percolação a partir do reservatório GW1 em mm/h e o coeficiente de armazenamento GW1 em horas, que representa o tempo que a água demora em se deslocar horizontalmente até o exutório da bacia.

O conteúdo inicial de água no reservatório foi estimado em função das chuvas que aconteceram no início e antes da modelagem, a percolação no reservatório foi estimada como a metade da considerada no perfil do solo, da mesma maneira, por não contarmos com dados mais específicos dessa camada, a capacidade máxima de armazenamento foi estimada em função do perfil do solo, um valor que será verificado na calibração da modelagem.

Outro parâmetro necessário para o método SMA é a porcentagem que as bacias apresentam de áreas impermeáveis, dessa maneira, e por meio do mapa de uso e cobertura de solos, determinou-se as áreas que exibiam afloramento rochoso e água, sendo em porcentagem de 22% para a bacia W230 e 12% para a W220.

4.8.3.2 Escoamento direto

Para o método da transformação do excesso de precipitação em vazão foram escolhidos dos métodos; o método de Clark e o Soil Conservation Service. O método de Clark chamado também tempo-àrea (McCUEN, 1998) considera que, para a transformação da chuva sobre uma bacia em hidrograma de escoamento superficial, dois processos estão implicados, o processo de translação do excesso de água por meio da rede de drenagem até o exutório, e o processo de atenuação ou redução da vazão pico devido ao armazenamento transitório da água na bacia.

Para a aplicação no modelo, o método de Clark demanda dois parâmetros; o tempo de concentração que foi determinado no item 4.7.2 e o coeficiente de armazenamento, que é um índice de armazenamento temporal da precipitação excedente, no interior da bacia e que drena até o ponto exutório, este índice é dado em horas, segundo o manual do modelo HEC-HMS (HEC, 2000) este coeficiente pode ser estimado via calibração quando tem-se disponibilidade de dados de vazão observados. No entanto, o estudo do Governo Vasco (2003) indica que este índice pode ser estimado sob uma equação empírica que o estudo apresenta, com um parâmetro α que representa a declividade da bacia e o uso. O mesmo estudo recomenda que o valor para bacias de tipo rural e montanhoso o parâmetro teria o valor de $\alpha = 0,75$; significando aproximadamente um coeficiente de armazenamento de três vezes o valor do tempo de concentração. Esse valor foi considerado para este estudo.

O modelo do hidrograma unitário (HU) do *Soil Conservation Service* (SCS UH) que foi desenvolvido para um grande número de bacias pequenas é um modelo empírico, simples e bastante utilizado principalmente em bacias pequenas. O modelo pede como parâmetro de entrada o *Tempo-lag* (Tlag), que é definido como a diferença de tempo entre o centro de massa do excesso de precipitação e o pico do HU. Na modelagem este parâmetro pode ser estimado via calibração quando a bacia apresenta dados monitorados (HEC; 2000, BUI, 2011; GOBIERNO VASCO, 2003); ou pode ser aproximado com um fator de 0,6 vezes o tempo de concentração da bacia (HEC, 2000)

4.8.3.3 Escoamento de Base

O método escolhido para representar o fluxo base da bacia é o de recessão exponencial. Este método foi projetado para aproximar o comportamento típico observado em bacias hidrográficas quando o escoamento recua exponencialmente após um evento. O método está definido pela Equação 4.11;

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (4.11)$$

em que:

Q_0 = vazão de base inicial (no tempo zero) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

k = a constante de recessão exponencial;

Q_t = vazão de base a qualquer tempo t ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

No modelo HEC-HMS, k é definido como a relação da vazão de base no tempo t para a vazão de base um dia antes. O valor inicial da vazão de base Q_0 é uma condição inicial para o modelo e pode ser obtida se a bacia apresentar dados de vazão medidos. Estudos como o de Gonçalves (2008) e Araújo (2016) já consideraram este valor, assim, estas estimativas também poderiam ser utilizadas para o início da modelagem.

A constante de recessão é outro parâmetro que deve ser definido pelo usuário, no estudo de Araújo (2016) que aplicou o modelo SMAP para a bacia de Pedro do Rio, a autora, aplica o método de Lencastre e Franco (1984) para estimar este parâmetro. Nesse sentido, foi utilizada esta estimativa como uma primeira aproximação.

Dessa maneira, os parâmetros estimados foram tabelados para o início da modelagem, e são apresentados no capítulo dos resultados.

4.8.4 Simulação do modelo HEC-HMS

Com todos os dados preparados, e parâmetros estimados o modelo HEC-HMS foi rodado para as seguintes datas e escalas;

- **Simulação diária com dados diários:** Simulação para a bacia Pedro do Rio, série histórica de 1998-2004, com fins de comparação com resultados de outros estudos, foi calibrado para o período 1998-2001 deixando um ano para o aquecimento do modelo (1998), e foi validado para toda a série histórica 1998-2004.
- **Simulação diária com dados horários:** Simulação diária para a bacia do Parque (W230) para a série histórica 2012-2014, foram utilizadas as estações com dados pluviométricos diários da ANA (Itamarati e Rio da cidade) e as vazões com dados horários da estação Parque do EIBEIX. Com a finalidade de simular leituras de vazões diárias (já que esse período não apresenta dados

diários de vazão de nenhuma das fontes) foram obtidos os valores das 7h e 17 h da série horária de vazões. Cabe ressaltar que a simulação abrangeu apenas três meses, devido a disponibilidade dos dados, começou em 10 de agosto e terminou em 10 de novembro. A calibração foi feita para o ano 2012 e validação para o ano 2013 e 2014 nos mesmos períodos.

- **Simulação horária com dados horários:** Simulação horária para a bacia Parque (W230) na série histórica 2012–2014, nesta simulação foram utilizados os dados horários das estações de precipitação do Alerta INEA e com as vazões horárias da estação Parque do EIBEX. Os meses simulados, calibrados e validados foram os mesmos que da simulação anterior. Esta simulação foi feita com fins de comparação e verificação se a simulação horária é mais apropriada para a bacia.
- **Simulação horária com dados horários com estações pluviométricas diferenciadas:** Simulação horária para a mesma série histórica (2012–2014). Esta simulação foi realizada levando em consideração os agrupamentos de dados obtidos pelas técnicas de mineração com o método WARD. As estações pluviométricas escolhidas foram as mais representativas da bacia, identificadas pelo grupo AH2, com a finalidade de verificar a influência de estações que apresentam chuvas mais homogêneas na bacia.

4.8.5 Calibração e Validação da modelagem

A calibração é uma das fases mais importantes na modelagem, é a fase do processo onde os parâmetros serão testados e melhorados, dessa maneira, após realizado o processo de simulação, deu-se início ao processo de calibração, nesta etapa, com ajuda da função objetivo Nash Sutcliffe e R^2 buscou-se o conjunto de parâmetros mais adequado, procurando dessa maneira, obter o melhor ajuste entre os valores das vazões geradas pelo modelo e os valores das vazões observadas

Dentre as possíveis formas de realizar o processo de calibração, este estudo optou por realizar a calibração manual como primeira opção. A calibração manual consiste em um processo iterativo, em que os parâmetros iniciais vão sendo alterados e a cada alteração, o modelo é executado novamente, posteriormente é realizada a comparação dos resultados obtidos com os valores observados com o objetivo de verificar se houve melhoria na representação do sistema.

A calibração manual foi escolhida por permitir um melhor controle nos valores dos parâmetros e permitir encontrar valores lógicos para região. Autores como Mays e Tung

(1992) e Fletcher e Ponnambalam (1998) recomendam a utilização dessa abordagem por permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo, ressalvados no entanto, em casos de modelos extremamente complexos com grande número de variáveis.

Como função objetivo, esse ajustamento visou eliminar as discrepâncias dos dados simulados para com os dados medidos por meio de dois coeficientes: o coeficiente de determinação (r^2) e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE).

O r^2 , na Equação 4.12, mensura quanto da parcela da variabilidade dos dados simulados podem ser explicados pela variabilidade dos dados medidos; assim, essa medida identifica o desempenho da acurácia dos dados LOPES (2008)

$$r^2 = \left(\frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_M - \bar{x}_M)(x_E - \bar{x}_E)}{n-1}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_M - \bar{x}_M)^2}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_E - \bar{x}_E)^2}{n-1}}} \right)^2 \quad (4.12)$$

em que:

x_M – evento observado;

\bar{x}_M – média do evento simulado no período de simulação;

x_E – evento simulado pelo modelo;

\bar{x}_E – média do evento observado no período de simulação; e

n – número de eventos.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), Equação 4.13, é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos (MACHADO et al., 2003). Esta métrica analisa individualmente os dados verificando a diferença de sua magnitude. A equação 4.13 apresenta o coeficiente NSE .

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_M - x_E)^2}{\sum_{i=1}^n (x_M - \bar{x}_M)^2} \quad (4.13)$$

em que:

x_M – evento observado;

x_E – evento simulado pelo modelo;

\bar{x}_E – média do evento observado no período de simulação; e

n – número de eventos.

Cabe mencionar que, ao se obter valores de NSE maiores que 0,4 e valores de r^2 maiores que 0,5, há a indicação de um desempenho satisfatório do modelo (GREEN e VAN GRIENSVEN, 2008).

Uma vez o modelo calibrado é feita a validação do mesmo, nessa fase o modelo calibrado será utilizado com dados de séries diferentes à aquelas usadas no ajuste. Os resultados permitiram verificar se o modelo foi bem calibrado, cabe destacar que só quando o desempenho do modelo for satisfatório, em ambas os processos, calibração e validação, o modelo poderá ser usado com certa confiabilidade na prática.

CAPITULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Campanhas de campo

Como mencionado no item 4.2.1 da metodologia, algumas campanhas de campo importantes foram realizadas na bacia. Entre as mais relevantes mencionamos a campanha de levantamento das características físicas do rio Piabanha, realizada no mês de Julho de 2012, que proporcionou um maior conhecimento do entorno da bacia, assim como das características da região, sociais, econômicas, culturais entre outras. Foram encontrados sinais de degradação de qualidade de água e mudanças na calha do rio Piabanha desde os primeiros trechos visitados.

A continuação no Quadro 5.1 são apresentadas as descrições de alguns dos pontos levantados. Cabe mencionar que a descrição será feita apenas até o último ponto da sub-bacia do Pedro do Rio (sub-bacia escolhida para a modelagem), uma descrição maior (toda a bacia do rio Piabanha) é encontrada em Silva (2013).

Quadro 5.1 – Dados da campanha de campo

CARACTERÍSTICAS DA BACIA DO RIO PIABANHA					
Trabalho de campo No.	2				
Integrantes:	Claudia Daza Andrade				
	Paulo Vitor Márques da Silva				
Objetivo	Conhecer as características morfológicas e a hidrodinâmica do rio Piabanha.				
Materiais					
	1. GPS portátil, que serviu para obter as coordenadas dos pontos visitados.				
	2. Trena de 30 metros, utilizada para medir a largura da calha do rio.				
	3. Câmera fotográfica digital, para registrar as imagens dos pontos visitados.				
	4. Folhas para anotações.				

A caracterização do rio Piabanha teve seu início a aproximadamente uns 500 metros das nascentes, foram escolhidos diversos pontos do rio no percurso realizado e dos quais obtiveram-se as coordenadas UTM com a finalidade de mapeamento destes pontos (Figura 5.1). Na Tabela 5.1 encontra-se o detalhamento das coordenadas e distancias dos pontos escolhidos.

Tabela 5.1 - Coordenadas e distâncias dos pontos escolhidos em campo

Nome (Pontos)	Coordenadas UTM WGS 84		Distância Acumulada (m)		Nome (Pontos)	Coordenadas UTM WGS 84		Distância Acumulada (m)
	E	N				E	N	
P04	684847	7513287	0		P23	691376	7517048	20865
P05	684545	7512989	500		P24	691462	7517071	21065
P06	684457	7512881	650		S04	692190	7519133	24065
P07	684192	7512621	1070		P25	691495	7520059	25565
P08	684024	7512471	1330		S05	692083	7523147	29265
P09	683409	7511794	2330		P26	692095	7523245	29405
P10	682995	7511203	3180		P27	693159	7526101	32905
P12	682954	7510533	4130		S06	692364	7528830	37005
S00	683867	7509513	5980		P28	692344	7529160	37055
P13	684142	7509483	6265		P31	692452	7529284	37385
P14	684923	7509430	7165		P29	692401	7529327	37505
P15	686146	7510225	8965		P30	692701	7532118	40305
S01	686877	7510184	9795		S07	692768	7533144	41505
P16	687495	7511899	11795		S08	694940	7534019	44805
S02	687521	7512088	11995		P32	696468	7534303	46805
P17	688591	7513363	13995		P33	697193	7535689	48905
P18	688972	7513459	14445		S09	697238	7535843	49005
P19	689442	7513529	14975		P34	698075	7537264	50705
P20	689651	7513395	15265		S10	697200	7538940	53705
S03	690683	7514644	17365		P36	695743	7539637	55905
P21	691098	7515869	19165		P37	695571	7540399	56705
P22	691316	7517002	20665		S11	692303	7542263	62105

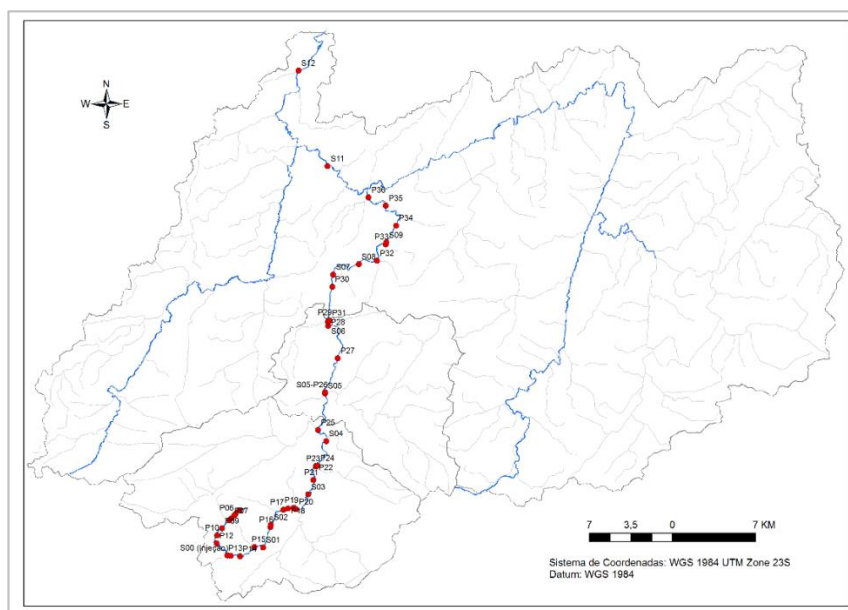


Figura 5.1 – Pontos de levantamento de campo na bacia do rio Piabanha

O primeiro ponto visitado foi o ponto com acesso mais próximo às nascentes do rio Piabanha, aproximadamente a 500 metros a jusante das nascentes. O P04 está

localizado em um sítio cujo nome é Levallon. Neste ponto, observou-se ausência de moradias, não foi constatado transporte de lixo pelo escoamento, nem depósitos de material nas margens (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Esquerda, vista da ponte sobre o rio Piabanha (P04). Direita, vista do rio Piabanha, a montante da ponte

O próximo ponto observado foi o P05 (Figura 5.3), localizado aproximadamente a 500 metros a jusante do anterior. Assim, como observado no P04, a água é transparente e o leito do escoamento neste trecho é arenoso, com presença de rochas e vegetação bem preservada aos arredores.



Figura 5.3 – Detalhes do ponto P05

O seguinte ponto (P06), localizado a aproximadamente a 150 metros de P05 a jusante, mostra a presença de poços artesanais de captação de água da fábrica da NESTLE. Próximo a estes poços encontra-se o rio Piabanha, que possui características semelhantes aos trechos apresentados anteriormente (Figura 5.4).



Figura 5.4 - Vista das casas de captação de água da NESTLE P06

O P07 (Figura 5.5), localiza-se ao lado da fábrica da NESTLE. Neste ponto, algumas mudanças começaram a ser percebidas, constatou-se a diminuição da vegetação nas margens do rio, um odor desagradável, não sendo identificado de onde o odor era proveniente, do rio ou da fábrica, por outro lado, observou-se que o rio neste trecho é canalizado além da existência de residências nas margens dele.



Figura 5.5 - Fotos a montante e a jusante do P07, respectivamente

No ponto a seguir (P08), verificou-se o transporte de lixo pelo escoamento e também depósitos do mesmo nas margens. Neste ponto observou-se também a presença de muitas casas e árvores perto das margens do rio (Figura 5.6).



Figura 5.6 - Fotos de montante e jusante do P08 no rio Piabanha, respectivamente

O ponto (P09) está localizado perto de uma comunidade carente, com muitas construções e aparentemente sem nenhum tratamento de esgoto. Observaram-se contribuições diretas por tubulações das casas para o rio Piabanha, foi constatada a presença de lixo nas margens e também o transporte do mesmo pelo escoamento. A coloração da água é cinza-amarronzada como mostrado na Figura 5.7.



Figura 5.7 - a) Foto a montante de P09; b) Foto ilustrando a comunidade e a contribuição de esgoto direta no rio Piabanha; c) Foto de acumulação de lixo a jusante de P09; d) Lixo acumulado na calha do rio Piabanha

O seguinte ponto a ser descrito é o P12 (Figura 5.8), a água neste trecho está mais detida formando um grande “bolsão” de água, a velocidade no trecho é muito baixa e a acumulação de lixo é maior. Formação de bancos de areia por conta dos sedimentos também são observados e a coloração da água se manteve cinza-amarronzada, porém um pouco mais escura.



Figura 5.8 - Fotos de montante e de jusante do ponto P12, respectivamente

No ponto P14 da Figura 5.9 foi observado a presença de lixo nas margens, mas em pequena quantidade. O trecho tem largura aproximada de 9 metros e o escoamento apresenta baixa velocidade.



Figura 5.9 - Vistas de montante e de jusante do rio Piabanha (P14)

O seguinte ponto denominado P16, mostra o leito do escoamento arenoso, a água apresenta coloração escura e baixa velocidade, sem odor desagradável. Não foi constatado transporte de lixo pelo escoamento, porém havia lixo depositado nas margens. A largura média da calha do rio Piabanha neste trecho é de 12 metros aproximadamente (Figura 5.10)



Figura 5.10 - Visão de montante e de jusante respectivamente, rio Piabanha no ponto P16

O próximo ponto escolhido para realização da descrição foi denominado de S02 (Figura 5.11), localizado a 200 metros a jusante de P16, próximo às estações pluviométrica e fluviométrica do Liceu Carlos Chagas, este ponto foi escolhido por ter servido como seção de monitoramento na campanha de campo com o uso de traçadores fluorescentes, sua largura e profundidade são de aproximadamente 13 e 0,4 metros, respectivamente. Observou-se que o leito do escoamento é arenoso ao longo deste trecho, apresentando alguns pontos de depósitos de sedimentos. Neste trecho verificou-se a presença de muitas descargas de água feitas diretamente no rio.



Figura 5.11 - Foto ilustrando o trecho do rio Piabanha do ponto S02

Aproximadamente a 2,0 km a jusante de S02 está o ponto P17 (Figura 5.12), neste trecho, observou-se a presença de rochas grosseiras nas margens e no leito do rio. Constatou-se a presença de lixo transportado pelo escoamento e depositado nas margens.



Figura 5.12 - Fotos de montante e de jusante de P17, respectivamente

O seguinte ponto escolhido para descrição é o P18, encontra-se localizado 450 metros a jusante de P17. Neste ponto observa-se um reservatório de aproximadamente 150 metros de comprimento e 15 metros de largura média. As margens do rio neste ponto são bem arborizadas, com bastante vegetação. Após o reservatório, observou-se a presença de um acúmulo de sedimentos de grande porte, reduzindo assim a calha do rio e, por consequência, aumentando a velocidade neste trecho. A Figura 5.13 ilustra o reservatório descrito neste parágrafo.



Figura 5.13 - a) Vista do reservatório; b) Jusante do reservatório

Poucos metros após o reservatório está a usina CGH Petropolitana no bairro Cascatinha a montante da confluência com o rio Itamarati. Segundo informações verbais com a CEIVAP, esta usina é muito antiga e tem a capacidade de geração de 1 MW. No estudo de Chiappori (2015) menciona-se que segundo relatos de moradores locais, a usina encontra-se desativada já há mais de 10 anos, por questões de manutenção, a casa de máquinas encontra-se totalmente abandonada.

O trecho a jusante tem uma declividade bem acentuada o que faz com que a velocidade aumente consideravelmente, o leito é rochoso e no escoamento observou-

se a presença expressiva de garrafas PET. Este trecho é conhecido como a Cachoeira da Cascatinha (Figura 5.14).



**Figura 5.14 - a) Foto panorâmica ilustrando o escoamento a jusante do vertedor;
b) Foto ilustrando o acúmulo de garrafas PET**

O seguinte ponto denominado S03, apresenta uma declividade suave, largura da calha variada e o leito do escoamento rochoso. Não se constatou o transporte de lixo pelo escoamento, nem depósitos importantes nas margens. A água exibia coloração escura, as margens do rio bem vegetadas apresentando algumas residências nas proximidades (Figura 5.15).



Figura 5.15 - Visões de montante e de jusante de S03, respectivamente

Outro ponto escolhido foi o P22, nesse trecho observou-se um aumento considerável na urbanização, conseqüentemente verificaram-se alguns pontos de contribuição por encanamentos, e uma diminuição da vegetação nas margens. Um grande depósito de sedimentos consolidados foi observado a jusante deste ponto, na margem direita do rio Piabanha. Observou-se também um acúmulo de lixo no pilar da ponte (Figura 5.16)



Figura 5.16 - Visões de montante e de jusante de P22, respectivamente

O ponto P23 está localizado na confluência dos rios Bonfim e Piabanha, neste trecho se observa a formação de um banco de areia na margem esquerda do rio, próximo à confluência. Não foi verificado transporte de lixo pelo escoamento, mas sim depósitos nas margens. Este trecho possui uma declividade baixa e por consequência, uma velocidade baixa (Figura 5.17).



Figura 5.17 - a) Visão de montante da confluência entre os rios Bonfim e Piabanha; b) Visão da confluência entre os rios

O ponto (P26) está na confluência entre os rios Santo Antônio e Piabanha. Devido às obras de dragagem e proteção das margens que estavam sendo feitas, a coloração da água do rio Santo Antônio era barrenta, este rio apresenta uma contribuição importante ao rio Piabanha. A Figura 5.18 ilustra esta descrição.



Figura 5.18 - Visões do rio Santo Antônio, de montante da confluência com o rio Piabanha pela margem direita, e da confluência dos dois rios, respectivamente

O ponto seguinte é o S06, que está localizado na ponte principal em Pedro do Rio. Devido às obras de contenção de encostas que estavam ocorrendo nas margens do rio Santo Antônio e na confluência com o Piabanha, observou-se que a água ainda apresentava coloração barrenta, por transporte de grande quantidade de sedimentos em suspensão. Não constatou-se o transporte de lixo pelo escoamento, mas sim depósitos de lixo nas margens.

Observou-se também a presença de casas nas margens do rio, com contribuições laterais de água (esgoto) por meio de encanamentos. A Figura 5.19 ilustra com fotos o ponto S06 em Pedro do Rio, último ponto escolhido para esta descrição.



Figura 5.19 - Visões de montante e de jusante de S06, respectivamente

5.2 Escolha da base de dados hidrológicos da bacia do Piabanha

O grande avanço tecnológico, tem sido importante na melhora, obtenção e automação de dados hidrometeorológicos, não só na precisão, mas também no tempo e na formação de redes integradas de dados em tempo real. Na bacia do rio Piabanha

a implementação de novas estações de medição tanto pluviométricas quanto fluviométricas é um grande avanço que irá apoiar nas decisões para um bom gerenciamento dos recursos hídricos, além disso brindará apoio em todos os estudos realizados na bacia.

Nesses últimos anos, novas estações foram implementadas, porém ainda existem muitos gargalos em relação à operação e manutenção das mesmas. Problemas de estações que estavam operando e não operam mais ou estações que foram arrastadas pelas intensas chuvas da região, acarretam algumas dificuldades na obtenção de dados, deixando falhas nas séries históricas. Apesar de este fato ser muito comum em nosso meio, os esforços feitos para manter e controlar dados das estações da bacia do rio Piabanha são constantes, entidades que fornecem dados como a CPRM, o projeto EIBEX/UFRJ, INEA, INMET e outras tem ajudado e fortalecido a rede, no entanto ainda são necessários maiores esforços.

5.2.1 Estações pluviométricas

No site da Agência Nacional de Águas Hidroweb³⁵, existem 31 estações pluviométricas cadastradas na bacia (Tabela 5.2), das quais 12 pertencem à ANA, e o restante a outros órgãos. Das 31 estações cadastradas, apenas 10 estações apresentam dados e uma delas está desativada (Petrópolis).

O Sistema de Alerta de Cheias do INEA, apresenta 26 estações telemétricas (Tabela 5.3) que enviam dados automaticamente a cada 15 minutos, com medição da quantidade de chuva e do nível d'água nos rios. As estações foram instaladas no ano de 2011 após o desastre que atingiu à região serrana do Rio de Janeiro, episódio acontecido no mês de Janeiro de 2011.

Já o CEMADEN conta com 50 estações dentro da bacia do rio Piabanha, estações telemétricas que foram implementadas em 2013 e 2014 com dados a cada 10 minutos. Na Tabela 5.4, observamos as estações correspondentes ao CEMADEN e no final estações do INMET, o mesmo que possui duas estações automáticas atuantes na bacia, Pico de Couto e Teresópolis.

³⁵ <http://hidroweb.ana.gov.br/>

Tabela 5.2 – Estações pluviométricas cadastradas no site de ANA

Nº	Nome	Estação Código	Responsável	Operadora	Altitude	Latitude	Longitude	Município
1	BOM SUCESSO	2242026	ANA	CPRM	870	-22,271	-42,795	TERESÓPOLIS
2	FAZENDA SOBRADINHO	2242027	ANA	CPRM	650	-22,201	-42,900	TERESÓPOLIS
3	CASCATA	2242034	ANA	DESATIVADA		-22,383	-42,967	SUMIDOURO
4	SOBERBO	2242054	DNOS	DESATIVADA	1004	-22,450	-42,983	TERESÓPOLIS
5	TERESÓPOLIS (PARQUE NACIONAL)	2242071	INMET	INMET	980	-22,433	-42,983	TERESÓPOLIS
6	TERESÓPOLIS-PAQUEQUER	2242121	INEA	INFOPER		-22,431	-42,976	TERESÓPOLIS
7	VALE ALPINO	2242122	COPPE/UF RJ	CPRM	778	-22,276	-42,865	TERESÓPOLIS
8	PROVIDÊNCIA	2242123	UERJ/UFF	UERJ/UFF	717	-22,278	-42,927	TERESÓPOLIS
9	PETRÓPOLIS	2243009	ANA	DESATIVADA	890	-22,512	-43,171	PETRÓPOLIS
10	ITAMARATI - SE	2243010	ANA	CPRM	1085	-22,485	-43,149	PETRÓPOLIS
11	RIO DA CIDADE	2243011	ANA	CPRM	704	-22,438	-43,170	PETRÓPOLIS
12	PEDRO DO RIO	2243012	ANA	CPRM	645	-22,333	-43,136	PETRÓPOLIS
13	AREAL (GRANJA GABI)	2243013	ANA	CPRM	450	-22,242	-43,104	TRÊS RIOS
14	FAGUNDES	2243014	ANA	CPRM	460	-22,300	-43,178	PETRÓPOLIS
15	MOURA BRASIL	2243015	ANA	CPRM	270	-22,127	-43,152	TRÊS RIOS
16	MORELI (PARADA MORELI)	2243016	ANA	CPRM	600	-22,201	-43,027	PETRÓPOLIS
17	GRANJA JURITY	2243249	INMET	INMET	980	-22,300	-43,033	PETRÓPOLIS
18	UHE AREAL - JUSANTE	2243258	QUANTA	QUANTA		-20,693	-41,518	AREAL
19	UHE FAGUNDES - JUSANTE	2243259	QUANTA	QUANTA		-22,204	-43,160	PARAIBA DO SUL
20	UHE PIABANHA	2243260	QUANTA	QUANTA		-22,200	-43,158	AREAL
21	BINGEN	2243268	ANA	CPRM		-22,305	-43,225	PETRÓPOLIS
22	PETRÓPOLIS	2243284	INEA	CPRM	824,2	-22,519	-43,187	PETRÓPOLIS
23	CAMPO DE AVENTURAS	2243285	A. IMPERADOR	CPRM	1004	-22,463	-43,091	PETRÓPOLIS
24	PARQUE PETRÓPOLIS	2243286	COPPE/UF RJ	CPRM	700	-22,405	-43,133	PETRÓPOLIS
25	ESPERANÇA	2243287	COPPE/UF RJ	CPRM	819	-22,511	-43,210	PETRÓPOLIS
26	MORIN	2243288	COPPE/UF RJ	CPRM	818	-22,517	-43,169	PETRÓPOLIS
27	LICEU CARLOS CHAGAS	2243289	COPPE/UF RJ	CPRM	815	-22,487	-43,177	PETRÓPOLIS
28	POÇO TARZAN	2243290	COPPE/UF RJ	CPRM	926	-22,454	-43,108	PETRÓPOLIS
29	SITIO DAS NASCENTES	2243291	INEA	CPRM		-22,469	-43,103	PETRÓPOLIS
30	FAZENDA SEDE	2243299	CERV-PET	CERV-PET	785	-22,352	-43,164	PETRÓPOLIS
31	BARRAGEM ANTIGA	2243300	CERV-PET	CERV-PET	791	-22,351	-43,158	PETRÓPOLIS

Tabela 5.3 – Estações telemétricas do sistema Alerta INEA

Nº	Nome	Rio monitorado	Data de Implantação	Tipo	Código ANA Plu	Código ANA Flu	Latitude	Longitude
1	Alto da Serra	Rio Palatinado	06/10/2011	Plu/Flu	2243315	58400040	-22,514	-43,173
2	Araras		01/10/2011	Plu	2243323	-	-22,384	-43,076
3	Barão do Rio Branco		17/10/2011	Plu	2243324	-	-22,488	-43,178
4	Bingen	Rio Piabanha	01/10/2011	Plu/Flu	2243316	58400005	-22,509	-43,196
5	Bonfim		01/10/2011	Plu	2243327	-	-22,461	-43,095
6	Capim Roxo		01/10/2011	Plu	2243330	-	-22,352	-43,192
7	Cel Veiga	Rio Quitandinha	25/10/2011	Plu/Flu	2243317	58400015	-22,526	-43,194
8	Centro	Rio Quitandinha	01/10/2011	Plu/Flu	2243313	58400025	-22,512	-43,180
9	Correás	Rio Piabanha	20/10/2011	Plu/Flu	2243318	58400102	-22,445	-43,144
10	Cuiabá	Rio Cuiabá	04/05/2011	Plu/Flu	2243325	58400300	-22,379	-43,068
11	Independência		31/10/2011	Plu	2243321	-	-22,548	-43,209
12	Itaipava	Rio Santo Antônio	04/11/2011	Plu/Flu	2243319	58401000	-22,406	-43,103
13	Itamarati		13/10/2011	Plu	2243320	-	-22,485	-43,150
14	LNCC		10/06/2011	Plu	2243329	-	-22,530	-43,217
15	Morin		14/10/2011	Plu	2243332	-	-22,527	-43,161
16	Pedro do Rio		01/09/2011	Plu	2243322	-	-22,333	-43,133
17	Posse		01/09/2011	Plu	2243326	-	-22,258	-43,076
18	Quitandinha		26/10/2011	Plu	2243331	-	-22,529	-43,224
19	Samambaia		01/09/2011	Plu	2243328	-	-22,460	-43,141
20	Caleme	Rio Imbuí	16/11/2011	Plu/Flu	2243310	58413000	-22,402	-43,012
21	Comari	Rio Paquequer	07/10/2011	Plu/Flu	2242139	58409500	-22,446	-42,976
22	Paquequer	Rio Paquequer		Plu/Flu	2242121	58410000	-22,430	-42,976
23	Posse - São Sebastião	Rio Príncipe	12/11/2011	Plu/Flu	2243311	58414800	-22,373	-43,001
34	Quebra Frascos	Rio Quebra Frascos	27/01/2012	Plu/Flu	2243312	58409800	-22,417	-43,008
25	Quinta do Lebrão	Rio Fisher	01/02/2011	Flu	2242162	58414000	-22,410	-42,947
26	Unifeso	Rio Meudon	07/11/2011	Plu/Flu	2242140	58410900	-22,419	-42,967

Tabela 5.4 – Estações telemétricas e automáticas do CEMADEM e INMET

Nº	Nome	Código Adicional	Latitude	Longitude	Altitude	Município Nome
1	AREAL_Centro	330022502	-22,239	-43,102	472	AREAL
2	AREAL_SAAESA	330022503	-22,227	-43,092	487	AREAL
3	PETRÓPOLIS_Alto da Serra1	330390602	-22,530	-43,171	863	PETRÓPOLIS
4	PETRÓPOLIS_Alto da Serra2	330390616	-22,530	-43,170	889	PETRÓPOLIS
5	PETRÓPOLIS_Araras	330390605	-22,427	-43,249	980	PETRÓPOLIS
6	PETRÓPOLIS_Araras 2	330390629	-22,419	-43,173	724	PETRÓPOLIS
7	PETRÓPOLIS_CIEP Brizolão 281	330390613	-22,258	-43,076	516	PETRÓPOLIS
8	PETRÓPOLIS_CIEP Brizolão137	330390614	-22,454	-43,143	698	PETRÓPOLIS
9	PETRÓPOLIS_Correias	330390625	-22,461	-43,099	988	PETRÓPOLIS
10	PETRÓPOLIS_Estrada da Cachoeira	330390624	-22,353	-43,095	761	PETRÓPOLIS
11	PETRÓPOLIS_Estrada do Brejal	330390607	-22,255	-43,063	642	PETRÓPOLIS
12	PETRÓPOLIS_Estrada do Cantagalo	330390606	-22,374	-43,046	1114	PETRÓPOLIS
13	PETRÓPOLIS_Estrada Petrópolis/Teresópolis	330390608	-22,428	-43,058	1099	PETRÓPOLIS
14	PETRÓPOLIS_Itaipava	330390611	-22,388	-43,132	692	PETRÓPOLIS
15	PETRÓPOLIS_Itaipava2	330390622	-22,369	-43,112	799	PETRÓPOLIS
16	PETRÓPOLIS_Morin	330390620	-22,527	-43,161	889	PETRÓPOLIS
17	PETRÓPOLIS_Mosela	330390627	-22,481	-43,219	1071	PETRÓPOLIS
18	PETRÓPOLIS_Nogueira	330390619	-22,418	-43,122	793	PETRÓPOLIS
19	PETRÓPOLIS_Pedro do Rio	330390623	-22,335	-43,134	685	PETRÓPOLIS
20	PETRÓPOLIS_Rua Amazonas/Quitandinha	330390618	-22,529	-43,223	964	PETRÓPOLIS
21	PETRÓPOLIS_Rua Araruama/Quitandinha	330390617	-22,520	-43,220	1071	PETRÓPOLIS
22	PETRÓPOLIS_Rua Parana/Quitandinha	330390603	-22,520	-43,210	1001	PETRÓPOLIS
23	PETRÓPOLIS_Vale do Cuiabá	330390615	-22,402	-43,047	1065	PETRÓPOLIS
24	PETRÓPOLIS_Vale do Cuiabá2	330390626	-22,336	-43,047	1116	PETRÓPOLIS
25	PETRÓPOLIS_Vila Constância	330390609	-22,401	-43,097	771	PETRÓPOLIS
26	PETRÓPOLIS_Vila Rica	330390628	-22,349	-43,132	730	PETRÓPOLIS
27	S.JOSE DO VALE DO RIO PRETO_Aguas Claras	330515802	-22,166	-42,947	541	S.J. DO VALE DO RIO PRETO
28	S.JOSE DO VALE DO RIO PRETO_Centro	330515801	-22,150	-42,924	620	S.J. DO VALE DO RIO PRETO
29	S.JOSE DO VALE DO RIO PRETO_Estrada do Oirindi	330515803	-22,172	-42,907	819	S.J. DO VALE DO RIO PRETO
30	TERESOPOLIS_Bonsucesso	330580219	-22,275	-42,796	874	TERESÓPOLIS
31	TERESOPOLIS_Est. Teresópolis/Nova Friburgo	330580221	-22,288	-42,810	871	TERESÓPOLIS
32	TERESÓPOLIS_Est. Teresópolis/Nova Friburgo 2	330580218	-22,275	-42,732	1086	TERESÓPOLIS
33	TERESÓPOLIS_Est.RioBahia	330580207	-22,273	-42,958	827	TERESÓPOLIS
34	TERESÓPOLIS_Fazenda Alpina	330580212	-22,338	-42,980	883	TERESÓPOLIS
35	TERESÓPOLIS_Fonte Santa	330580205	-22,400	-42,955	880	TERESÓPOLIS
36	TERESÓPOLIS_Jardim Meudon	330580201	-22,437	-42,952	1033	TERESÓPOLIS
37	TERESÓPOLIS_Meudon	330580203	-22,436	-42,943	952	TERESÓPOLIS
38	TERESÓPOLIS_Morro dos Pinheiros	330580213	-22,417	-42,966	988	TERESÓPOLIS
39	TERESÓPOLIS_Panorama	330580208	-22,418	-42,981	985	TERESÓPOLIS
40	TERESÓPOLIS_Parque do Imbui	330580214	-22,390	-42,998	883	TERESÓPOLIS
41	TERESÓPOLIS_Quinta da Barra	330580202	-22,398	-42,973	912	TERESÓPOLIS
42	TERESÓPOLIS_S. Pedro	330580204	-22,428	-42,962	934	TERESÓPOLIS
43	TERESÓPOLIS_Serra do Capim	330580225	-22,182	-42,851	834	TERESÓPOLIS
44	TERESÓPOLIS_Tres Corregos	330580217	-22,353	-42,944	765	TERESÓPOLIS
45	TERESÓPOLIS_Vargem Grande	330580220	-22,374	-42,872	859	TERESÓPOLIS
46	TERESÓPOLIS_Venda Nova	330580215	-22,320	-42,870	790	TERESÓPOLIS
47	TERESÓPOLIS_Vieira	330580209	-22,262	-42,737	1006	TERESÓPOLIS
48	TERESÓPOLIS_Vieira2	330580216	-22,282	-42,723	1135	TERESÓPOLIS
49	TERESÓPOLIS_Volta do Pião	330580227	-22,122	-42,780	929	S.J. DO VALE DO RIO PRETO
50	TRES RIOS_Moura Brasil	330600804	-22,131	-43,149	333	TRES RIOS
51	PETRÓPOLIS-Pico do Couto (INMET)	86876	-22,465	-43,292	1758	PETRÓPOLIS
52	TERESÓPOLIS-Parque Nacional (INMET)	86888	-22,449	-42,987	991	TERESÓPOLIS

Dessa maneira, após este levantamento de dados, foi realizado um mapeamento das estações para observar a distribuição espacial das mesmas, na Figura 5.20 pode ser observada esta distribuição.

Em seguida, analisando a quantidade de estações existentes, poder-se-ia dizer que a bacia apresenta um número considerável de estações para monitoramento, são mais de cem estações distribuídas na bacia toda, todavia, a maioria são estações novas

que foram instaladas em 2011 e 2013 e das restantes as séries históricas apresentam deficiências e ausência de valores.

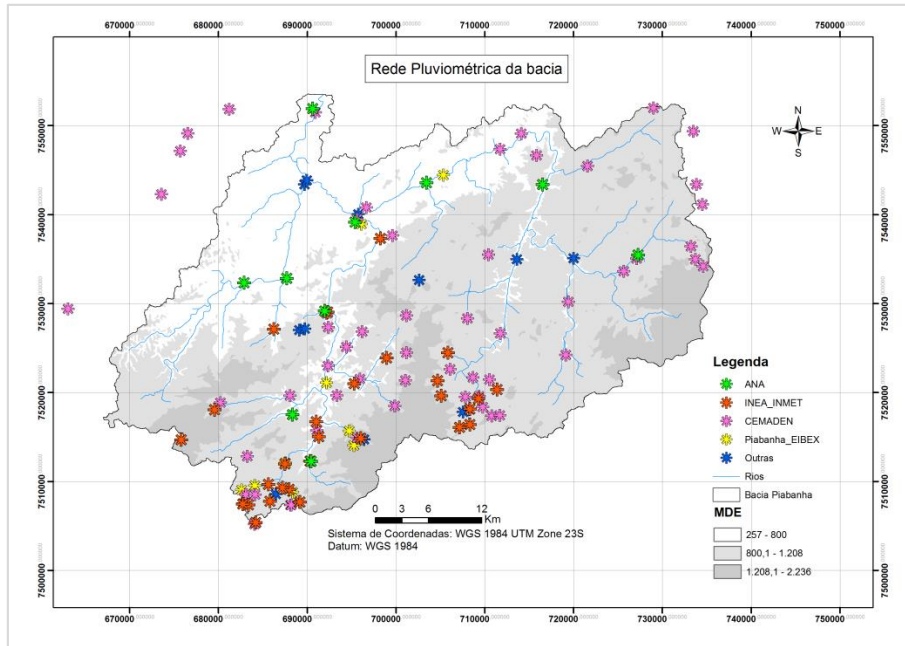


Figura 5.20 – Rede pluviométrica da bacia do rio Piabanha

Nesse sentido, após feita a análise dos dados das series históricas, a redução de estações é sem dúvida muito grande ficando muito poucas estações disponíveis para o estudo. Na Tabela 5.5, são apresentadas as estações que serão utilizadas para as análises de agrupamento de dados e para a modelagem em escala diária. Na Tabela 5.6 estão as estações escolhidas com dados horários, lembrando que para a modelagem ainda haverá uma redução de estações correspondentes apenas às sub-bacias de Pedro do Rio e Parque (Figura 5.21).

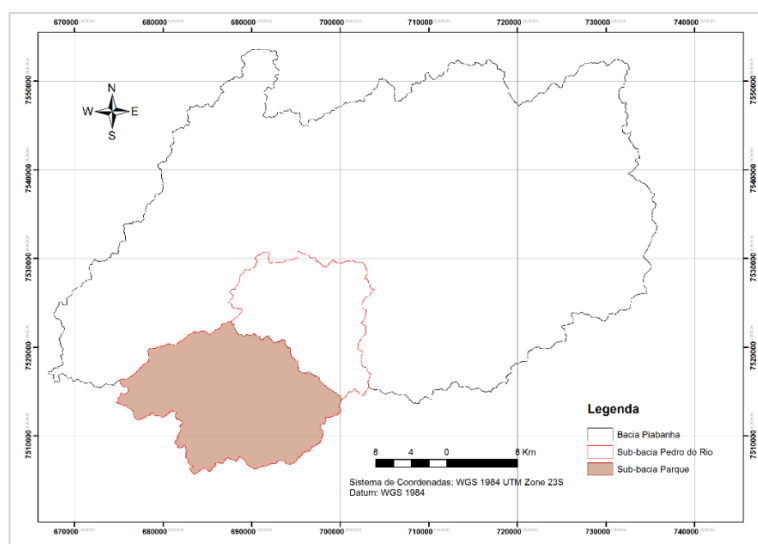


Figura 5.21 – Localização das sub-bacias de estudo

Tabela 5.5 – Estações pluviométricas escolhidas - ANA

Nº	Nome	Estação Código	Altitude	Latitude	Longitude	Município
1	BOM SUCESSO	2242026	870	-22,271	-42,795	TERESÓPOLIS
2	FAZENDA SOBRADINHO	2242027	650	-22,201	-42,900	TERESÓPOLIS
3	PETRÓPOLIS (Desativada)	2243009	890	-22,512	-43,171	PETRÓPOLIS
4	ITAMARATI - SE	2243010	1085	-22,485	-43,149	PETRÓPOLIS
5	RIO DA CIDADE	2243011	704	-22,438	-43,170	PETRÓPOLIS
6	PEDRO DO RIO	2243012	645	-22,333	-43,136	PETRÓPOLIS
7	AREAL (GRANJA GABI)	2243013	450	-22,242	-43,104	TRÊS RIOS
8	FAGUNDES	2243014	460	-22,300	-43,178	PETRÓPOLIS
9	MOURA BRASIL	2243015	270	-22,127	-43,152	TRÊS RIOS
10	MORELI (PARADA MORELI)	2243016	600	-22,201	-43,027	PETRÓPOLIS

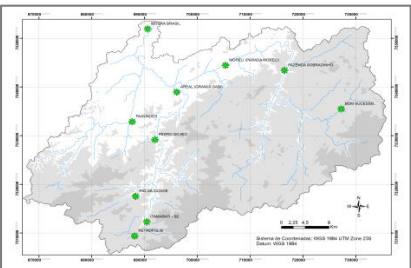
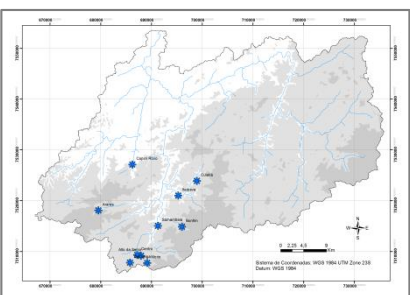


Tabela 5.6 – Estações pluviométricas escolhidas – Alerta INEA

No.	Nome	Codigo_ope	Data_de_Im	Latitude	Longitude	Município
1	ALTO DA SERRA	0204PET011	06/10/2011	-22,514	-43,173	Petrópolis
2	ARARAS	0304PET006	01/10/2011	-22,434	-43,256	Petrópolis
3	BONFIM	0304PET008	01/10/2011	-22,461	-43,095	Petrópolis
4	CAPIN ROXO	0304PET009	01/10/2011	-22,352	-43,192	Petrópolis
5	CEL. VEIGA	0204PET016	25/10/2011	-22,526	-43,194	Petrópolis
6	CENTRO	0204PET010	01/10/2011	-22,512	-43,180	Petrópolis
7	CUIABÁ	0204PET001	04/05/2011	-22,379	-43,068	Petrópolis
8	ITAIPAIVA	0204PET019	04/11/2011	-22,406	-43,103	Petrópolis
9	MORIN	0304PET013	14/10/2011	-22,527	-43,161	Petrópolis
10	SAMAMBAIA	0304PET005	01/09/2011	-22,460	-43,141	Petrópolis



5.2.2 Estações Fluviométricas

No caso das estações fluviométricas a bacia do Piabanha conta com 10 estações com dados cadastradas no site da ANA, sendo que apenas seis de elas estão ativas como observado na Tabela 5.7.

Com o Projeto EIBEX, foram instaladas na bacia mais 11 estações, com registradores contínuos e digitais de nível de água, as mesmas são observadas na Tabela 5.8. Já na Figura 5.22 é exposta a distribuição espacial das estações fluviométricas disponíveis na bacia do rio Piabanha.

Tabela 5.7 – Estações fluviométricas ANA

Num	Código	Nome	Responsável	Operadora	Latitude	Longitude
1	58400000	PETROPOLIS	ANA	DESATIVADA	-22,516667	-43,183333
2	58405000	PEDRO DO RIO	ANA	CPRM	-22,332222	-43,133611
3	58409000	AREAL - RN	ANA	DESATIVADA	-22,233889	-43,100833
4	58415000	CASCATA	ANA	DESATIVADA	-22,383333	-42,966667
5	58420000	FAZENDA SOBRADINHO	ANA	CPRM	-22,200278	-42,901111
6	58425000	MORELI (PARADA MORELI)	ANA	CPRM	-22,200833	-43,026944
7	58427000	TRISTAO CAMARA	ANA	DESATIVADA	-22,216667	-43,050000
8	58434000	FAGUNDES	ANA	CPRM	-22,299722	-43,178056
9	58440000	MOURA BRASIL	ANA	FURNAS	-22,141667	-43,157500
10	58442000	FAZENDA DA BARREIRA	LIGHT	LIGHT	-22,142222	-43,159167

Tabela 5.8 – Estações fluviométricas EIBEX

Num	Código	Nome	Altitude	Latitude	Longitude
1	58400010	ESPERANÇA (Petrópolis)	819	-22,5039	-43,1825
2	58400015	CORONEL VEIGA	-	-22,5264	-43,1939
3	58400025	CENTRO	-	-22,5125	-43,1803
4	58400030	MORIN	818	-22,5167	-43,1689
5	58400050	LICEU CARLOS CHAGAS	815	-22,4872	-43,1772
6	58400104	POÇO DO CASINHO	-	-22,4608	-43,0944
7	58400108	JOÃO CHRIST	-	-22,4603	-43,0997
8	58400210	ROCIO 2 - BRAÇO DIREITO	-	-22,4775	-43,2581
9	58400211	ROCIO 2 - BRAÇO ESQUERDO	-	-22,4772	-43,2578
10	58400212	ROCIO 2 - PONTE	-	-22,4775	-43,2569
11	58400250	PARQUE PETRÓPOLIS	700	-22,4053	-43,1333

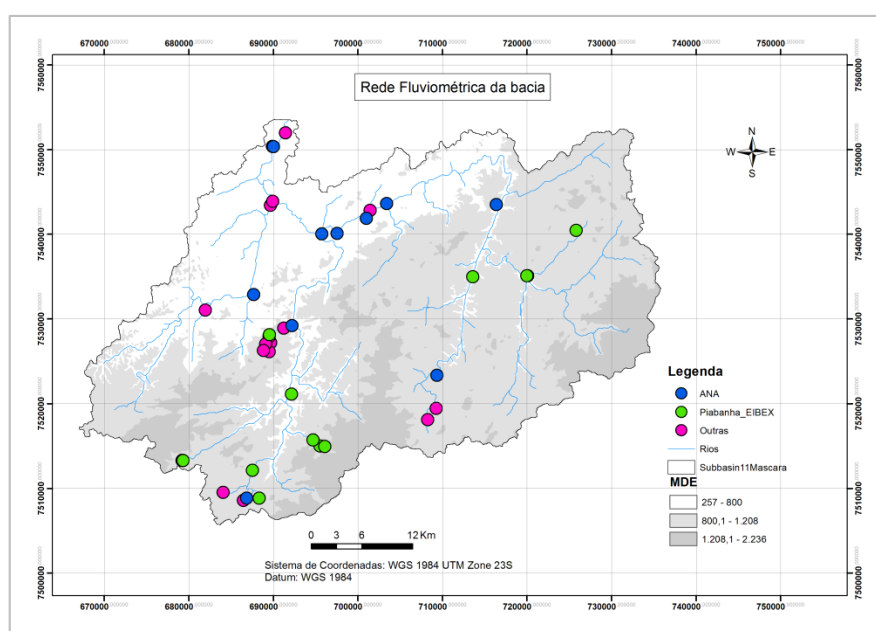


Figura 5.22 – Rede fluviométrica da bacia do rio Piabanha

Com essa base de estações fluviométricas, foram analisados os dados das séries existentes para cada estação, em muitos casos as estações apresentaram poucos dados e em outros os dados estavam com falhas. Nesse sentido, levando em consideração que a modelagem abarca apenas as sub-bacias Pedro do Rio (dados diários) e Parque (dados horários) foram escolhidas as vazões da estação Pedro do Rio (ANA) e as vazões da estação Parque (EIBEX) ressaltando que, no caso das vazões horárias, foi a única estação que apresentou dados mais consistentes para o período de estudo (Tabela 5.9).

Em relação a estação Pedro do Rio foi escolhida por apresentar dados com série histórica maior além de ser a única da rede da ANA inserida na sub-bacia do mesmo

nome. Esta estação também foi a escolhida nos estudos de Gonçalves (2008); Lou (2010); Brito (2014) e Araújo (2016) para a modelagem com dados diários.

Tabela 5.9 – Estações fluviométricas escolhidas para o estudo de modelagem

Num	Código	Nome	Latitude	Longitude
1	58400250	PARQUE PETRÓPOLIS	-22,4053	-43,1333
2	58405000	PEDRO DO RIO	-22,3322	-43,1336

No Apêndice I pode ser observada uma estatística das estações tanto fluviométricas quanto pluviométricas cadastradas no site da ANA. Esta estatística reflete a quantidade de estações e anos disponíveis de dados das mesmas, a ferramenta utilizada para este trabalho foi o código computacional HIDROCALC.

5.3 Análise dos dados hidrológicos – Regime de chuvas e vazões

De uma série histórica de 49 anos (1966-2014) para 9 estações distribuídas na bacia do rio Piabanha, como apresentado na Figura 5.23, foi calculada a precipitação média anual, resultando em torno de 1300 mm por ano. É observado que a quantidade de estações para este cálculo é pouca, principalmente por não existirem dados para as regiões mais altas da bacia, no entanto, se compararmos este resultado com os estudos da SEA (2008) observa-se que a bacia do rio Piabanha, apresenta variabilidade de chuvas médias anuais, desde 700 até 2200 mm nos picos mais altos, estando a maior proporção na faixa de 1300 a 1600 mm.

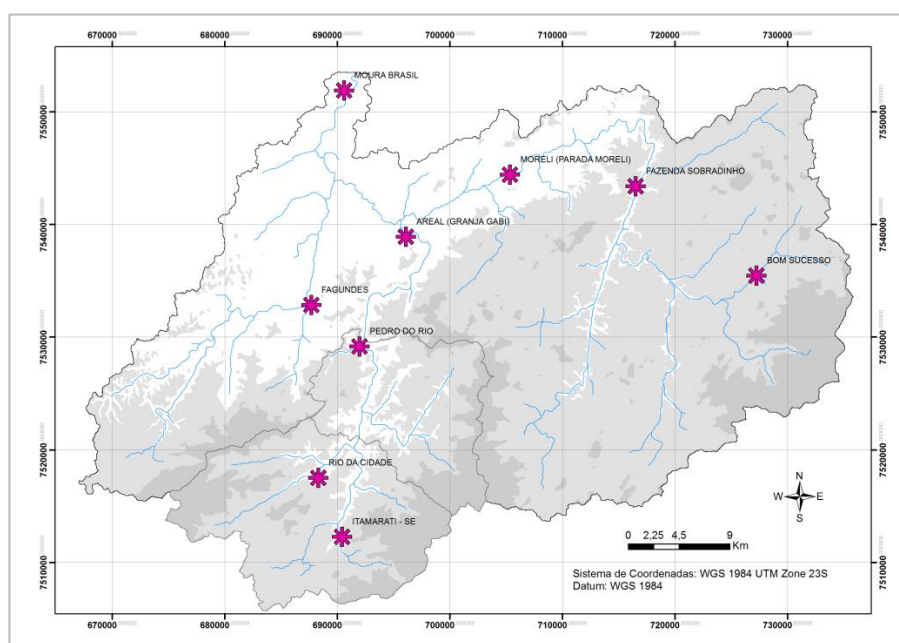


Figura 5.23 - Distribuição das estações pluviométricas escolhidas (ANA)

Em quanto a precipitações mensais, na Figura 5.24 são apresentadas curvas do comportamento pluviométrico no decorrer dos meses do ano para o período 1966 – 2014, pode-se observar que as maiores médias mensais acontecem em Itamarati região localizada nas cabeceiras da bacia (altitude aproximada de 1085 m). Foi verificado também que a estação Itamarati junto à estação Rio da Cidade são as duas estações representativas da sub-bacia Parque Petrópolis.

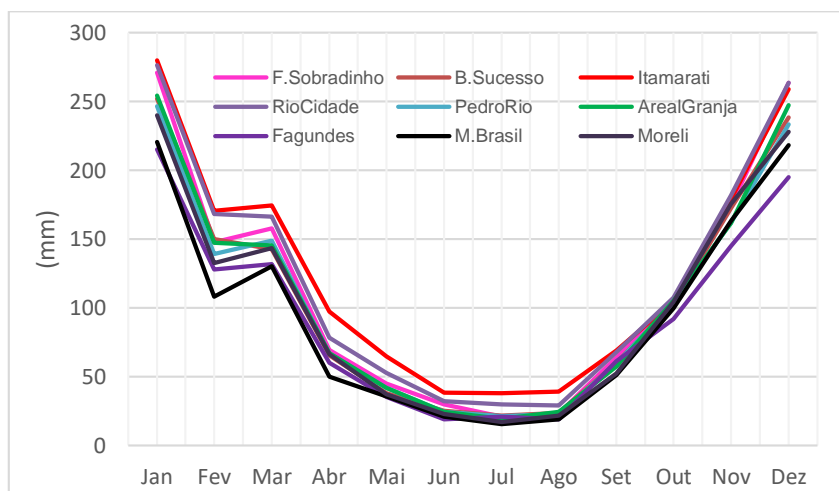


Figura 5.24 – Médias mensais da série histórica 1966-2014

Na Figura 5.25 encontram-se plotadas as chuvas médias mensais das estações Itamarati e Pedro do Rio junto com a média das 9 estações distribuídas na bacia. Nesse mesmo gráfico observa-se que o período chuvoso começa em novembro e termina em março (GONÇALVES, 2008; LOU, 2010; CARVALHO JUNIOR; 2013) e o ano hidrológico começa em setembro e termina em agosto. O mês mais chuvoso é janeiro seguido de dezembro, e o mês mais seco é julho.

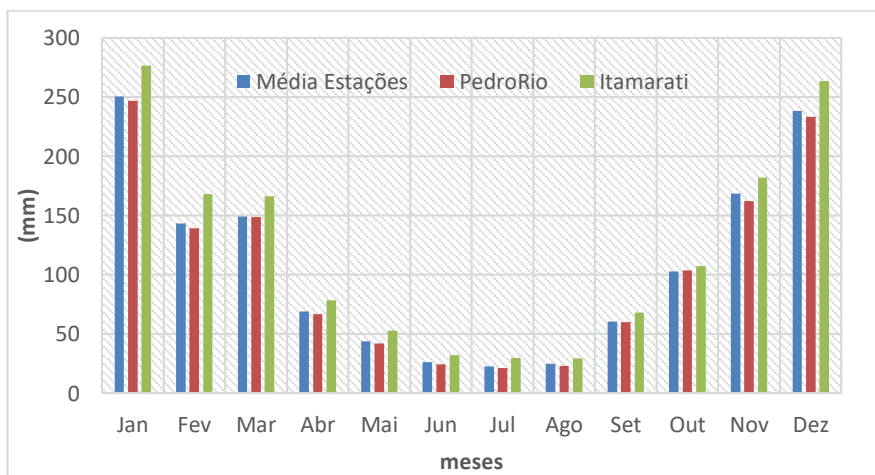


Figura 5.25 – Médias mensais em Pedro do Rio, Itaipava vs. médias de todas as estações escolhidas na bacia

Dentre essa seleção de 9 estações não foi escolhida a estação Petrópolis que se encontra desativada atualmente, não entanto ela é levada em consideração no período da modelagem em escala diária, dessa maneira na Figura 5.26 se observam as precipitações acumuladas das quatro estações localizadas na sub-bacia Pedro do Rio para a série histórica de 1998 - 2004, constatando que a estação (Petrópolis) recebia chuvas ainda superiores às de Itamarati.

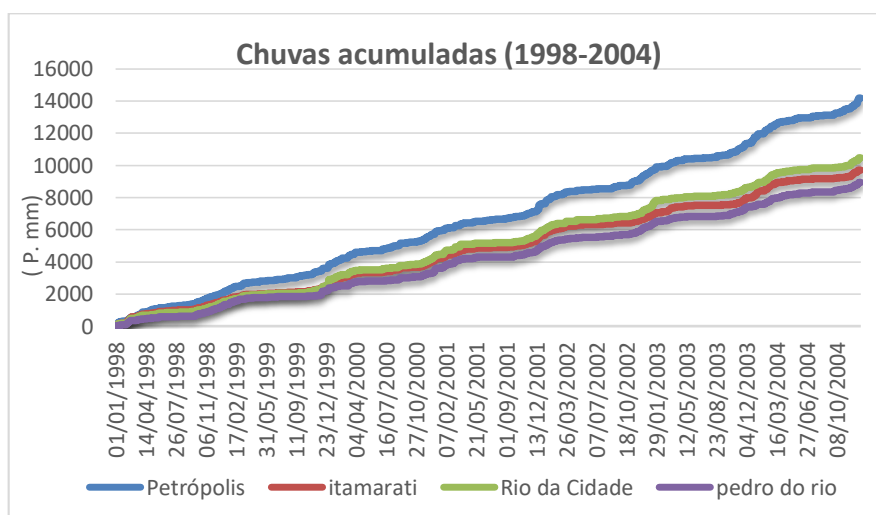


Figura 5.26 – Chuvas acumuladas (Série 1998-2004)

Mapa de Isoietas Médias Anuais: Como explicado na metodologia com os mesmos dados e estações escolhidas anteriormente, foi traçado o mapa de isoietas para a bacia do rio Piabanha, observado na Figura 5.27. Como comparação deste mapa é apresentado também um recorte para a bacia do Piabanha do mapa de isoietas gerado pela CPRM (2011) para o estado do Rio de Janeiro na Figura 5.28. Devido à quantidade de estações, série histórica e localização das mesmas, como já explicado na metodologia, observam-se algumas diferenças nas isoietas.

No mapa de isoietas, gerado pelo método de krigagem ordinária da Figura 5.27, podemos observar que as maiores chuvas acontecem na bacia alta do rio Piabanha (sub-bacia Itamarati), são as regiões mais altas aonde as chuvas podem atingir aproximadamente até 2200 mm.ano⁻¹. Chuvas menores são observadas nas estações de Fagundes e Moura Brasil, na parte baixa da bacia, aonde a dinâmica é diferente, o uso de solo é diferente e até mesmo o relevo. Uma questão a ser observada é que a estação Pedro do Rio recebe quantidades de precipitação menores do que Itamarati e Rio da Cidade, isto também será observado na análise de agrupamento de dados apresentada neste estudo.

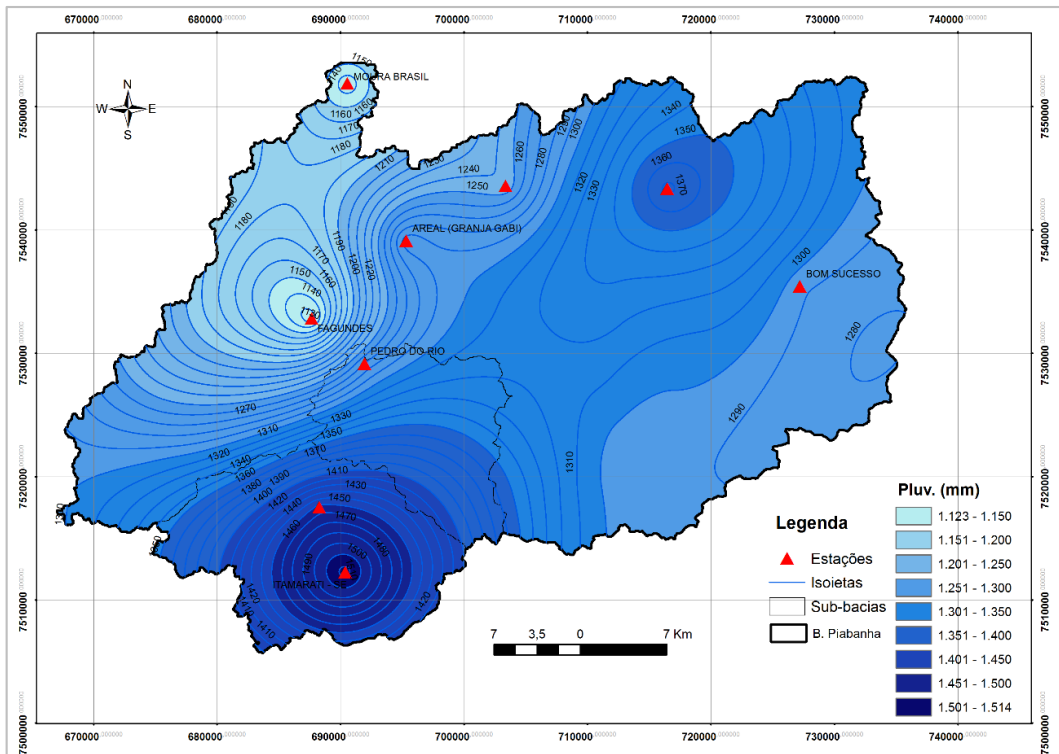


Figura 5.27 – Mapa de isoietas da bacia do rio Piabanha (Gerado por krigagem)

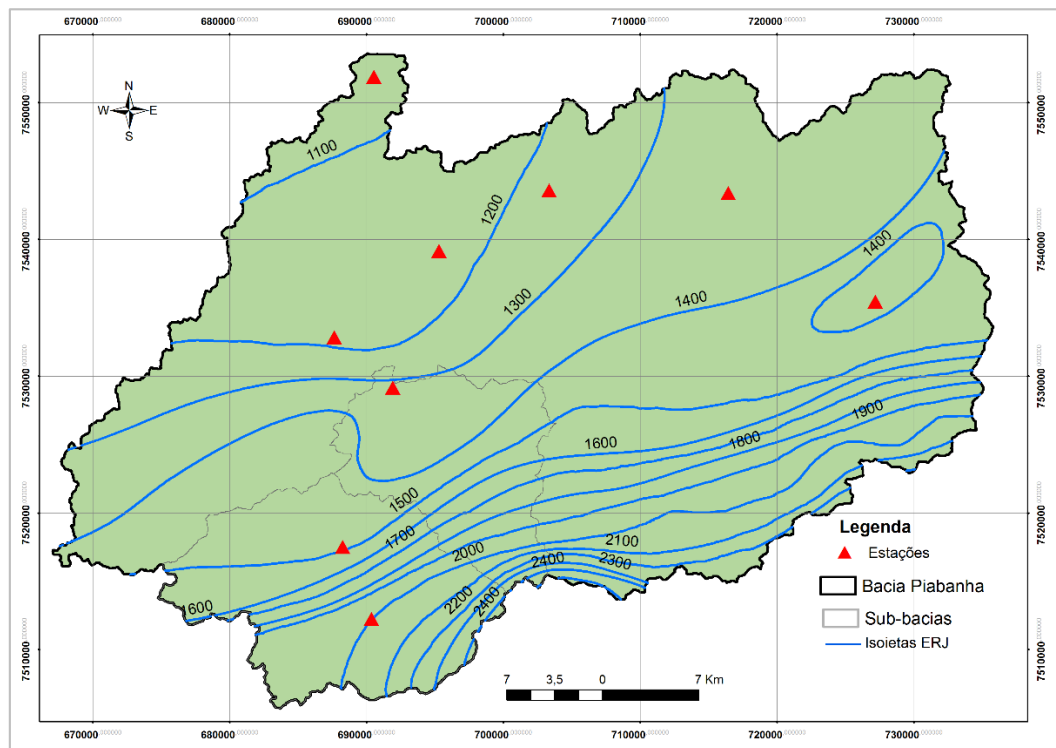


Figura 5.28 – Mapa de isoietas da bacia do rio Piabanha

Fonte: CPRM, 2011

Com relação às vazões, as maiores ocorrem nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, como apresentado na Figura 5.29. Não entanto, na Figura 5.30,

observa-se que em 16 de maio de 1994 a vazão chegou a ultrapassar os $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ encontrando-se no patamar dos maiores picos acontecidos na série histórica de 1984 – 2010 (em Janeiro de 1991 ocorreu um pico de $175 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; dezembro de 1994 teve $171 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e dezembro de 2001 com $172 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

Foi realizada uma pesquisa na literatura para saber se teve algum evento extraordinário neste ano (1994) e foi constatado que houve um tornado em 14 de maio em Ribeirão Preto (dois dias antes). Este tornado foi um dos maiores que teria acontecido na região e que destruiu parte da cidade, no entanto, não se tem conhecimento dos acontecimentos na bacia do Piabanha nesta data.

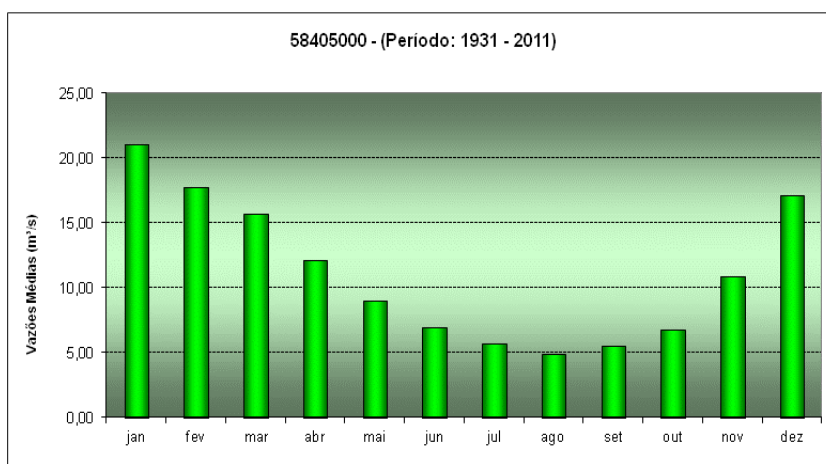


Figura 5.29 – Vazões médias mensais Pedro do Rio

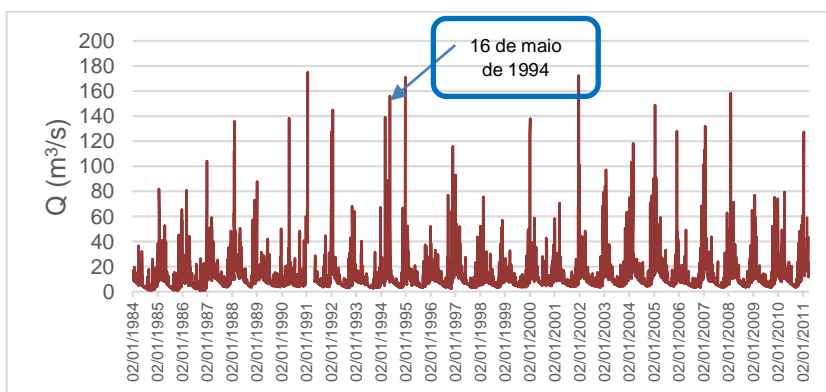


Figura 5.30 – Vazões diárias em Pedro do Rio (1984 – 2010)

Foram também calculados os valores de curva de permanência Q_{90} e Q_{95} além da vazão média de longo termo QMLT e a $Q_{7,10}$ para as estações da rede da ANA (período existente da série de cada estação). Na Tabela 5.10 se observam estes dados, gerados com o programa HIDROCAL. Destaca-se que as estações Moura Brasil e Fazenda

Barreira que apresentam as mesmas áreas de drenagem, tem vazões com diferença de quase $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabela 5.10 – Vazões de permanência e longo termo

Código	Estação	Q_{7,10} (m³.s⁻¹)	Q90% (m³.s⁻¹)	Q95% (m³.s⁻¹)	QMLT (m³.s⁻¹)
58405000	Pedro do Rio	2,08	3,70	3,17	11,11
58420000	Faz. Sobradinho	3,86	6,36	5,63	16,96
58425000	Morelli	4,77	7,56	6,64	18,77
58434000	Fagundes	0,95	1,59	1,32	3,98
58440000	Moura Brasil	5,24	10,30	8,16	38,06
58442000	Faz. Barreira	8,49	14,00	12,00	38,82

Como explicado na metodologia foi necessário ir a campo para conferir a localização de estas estações, verificou-se que as mesmas se encontram a 450 metros uma da outra, no entanto apresentam vazões diferentes.

Uma outra questão a ser abordada é que segundo os dados calculados, as vazões de Moura Brasil estariam baixas, pois fazendo uma análise da continuidade com as vazões Q₉₅, a estação fazenda barreira representaria melhor esta continuidade (ver digrama Unifiliar no Apêndice I). Este fato poderia radicar nas curvas chaves utilizadas para a geração das vazões nas diferentes estações, porém este dado não encontra-se disponibilizado, fato pelo qual não foi realizada esta avaliação.

No caso das estações pluviométricas escolhidas do Alerta-INEA, utilizadas para a modelagem com escala de dados horários, na Figura 5.31 é apresentada a distribuição espacial das estações e na Figura 5.32 são observadas as chuvas acumuladas, mostrando que a estação que recebe maior quantidade de precipitação é Quitandinha que está nas cabeceiras da bacia a mais de 1000 metros de altitude.

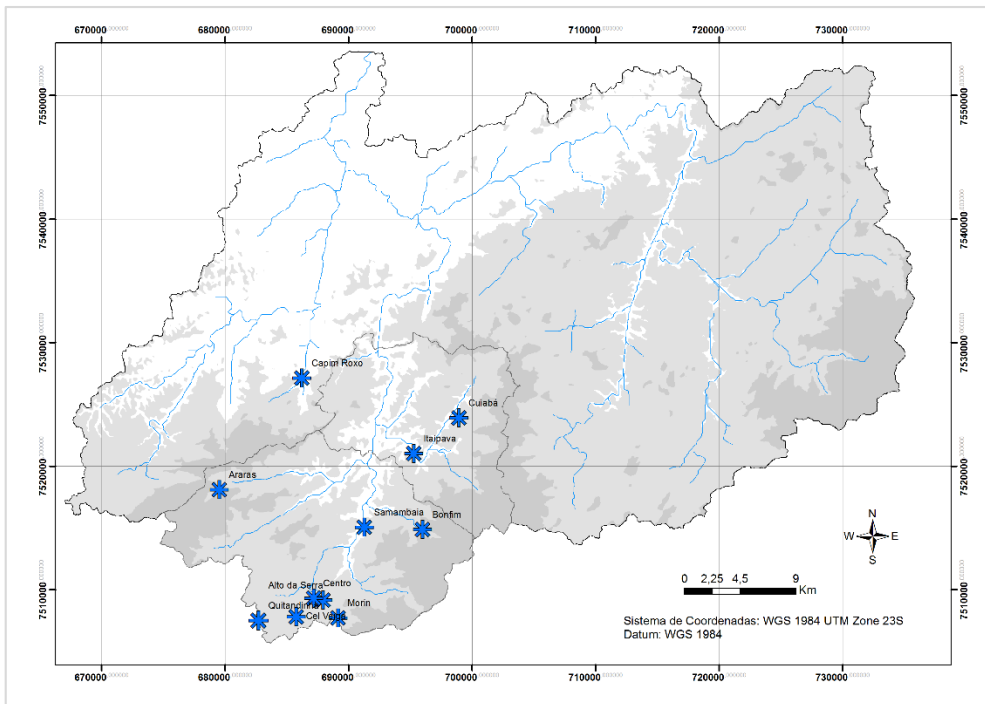


Figura 5.31 – Distribuição das estações com dados horários escolhidas do Alerta INEA

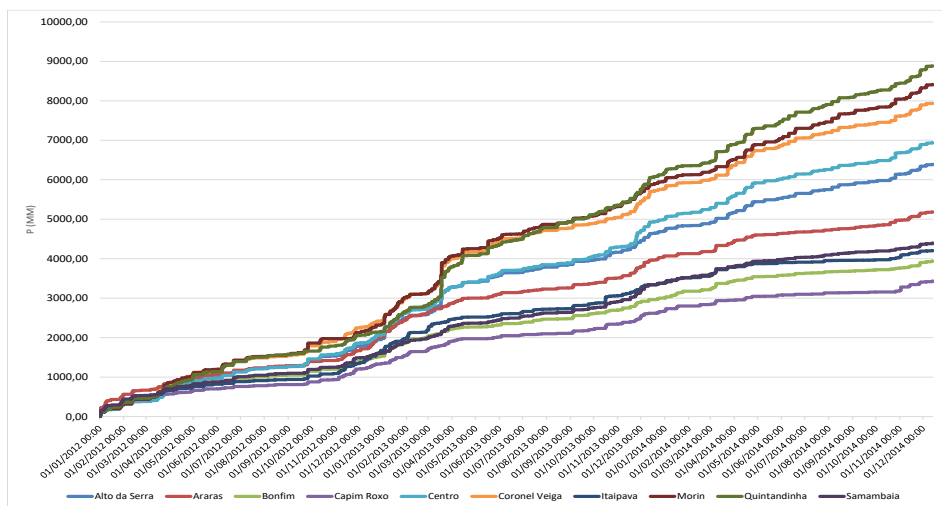


Figura 5.32 - Chuvas horárias acumuladas para o período de 2012-2014

Após essa análise dos dados, os mesmos que serão utilizados nas tarefas de modelagem em escala tanto horária quanto diária, uma outra análise foi realizada com o objetivo de determinar as regiões que apresentam homogeneidade na quantidade de chuva. Esta tarefa foi realizada para as séries com dados diários e horários e é apresentada a seguir.

5.4 Determinação de regiões pluviometricamente homogêneas na bacia do rio Piabanha

Para a determinação de regiões pluviometricamente homogêneas utilizaram-se os dados das nove estações distribuídas na bacia para encontrar estações com chuvas homogêneas durante o período de 1966 – 2014.

O método Ward (ferramenta de mineração de dados, descrita na metodologia) utilizado para agrupamento de dados ou *Clusters*, apresentou três agrupamentos entre as estações localizadas nas cabeceiras da bacia e as estações do centro e parte baixa da bacia. O dendograma apresentado na Figura 5.33, mostra os três agrupamentos definidos pelo método e suas distâncias de similaridade.

Observa-se que no interior dos grupos A2 e A3, as estações Moura Brasil e Areal Granja apresentam um certo afastamento dos seus grupos respectivamente. Dessa maneira, com o intuito de melhor entender esta pequena separação, foram traçados os gráficos de medias mensais e chuvas acumuladas de cada agrupamento e são apresentadas a continuação.

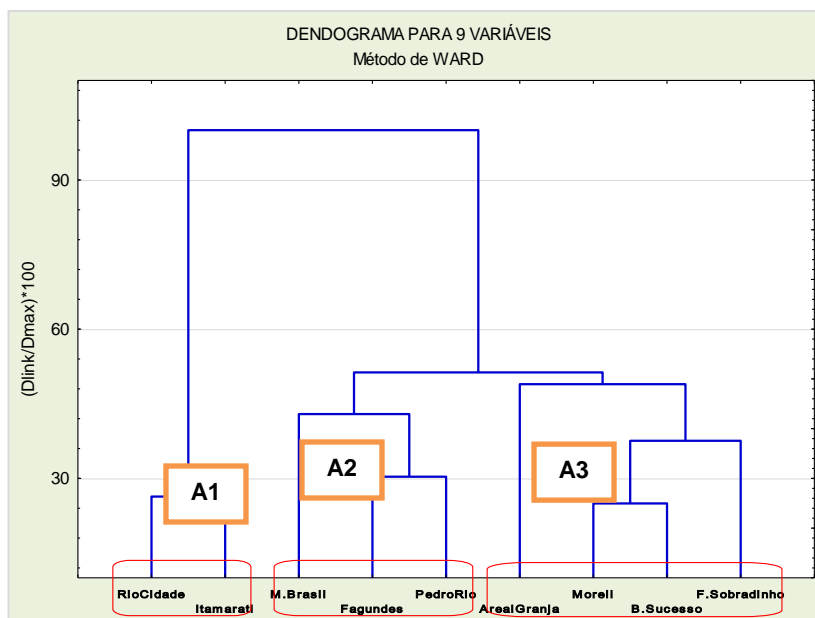


Figura 5.33 – Agrupamento de estações com medição diária na bacia Piabanha

Agrupamento A1: Na Figura 5.34 se observa a resposta do agrupamento A1, duas estações que apresentam um agrupamento bem definido com comportamento muito similar no decorrer do ano e chuvas acumuladas similares.

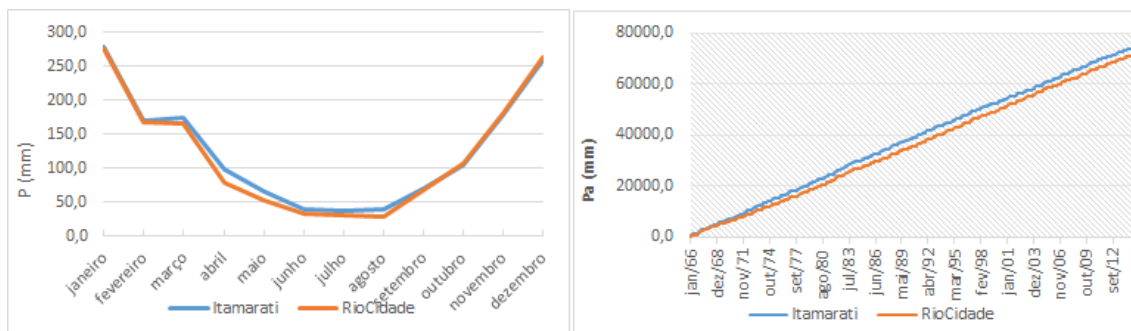


Figura 5.34 – Chuvas médias mensais – Chuvas acumuladas

Agrupamento A2: Na figura 5.35 se observa a resposta do agrupamento A2, lembrando que no dendograma a estação Moura Brasil se afasta um pouco do grupo, nos gráficos de precipitações médias mensais podemos constatar esta situação, vendo que nos primeiros meses a quantidade de chuvas médias na estação é bem mais baixo, porém, nos meses secos a estação acompanha as outras. No gráfico de acumuladas Pedro do Rio apresenta maior quantidade de chuvas, se lembrarmos um pouco da localização de esta estação, é uma estação que se encontra a maior altitude, aonde a vegetação também é mais preservada.

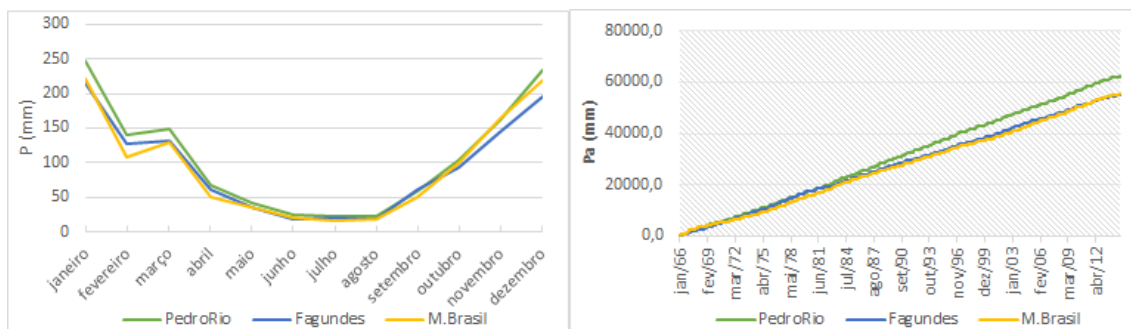


Figura 5.35 – Chuvas médias mensais – Chuvas acumuladas

Agrupamento A3: No agrupamento A3, se observa uma pequena distância em relação ao grupo, por parte da estação Areal Granja, na Figura 5.36 das médias mensais do agrupamento, as quatro estações apresentam um comportamento similar, apenas e levemente existe um distanciamento nas precipitações acumuladas da estação Areal Granja, mostrando que a quantidade de chuva nessa estação é um pouco menor. Contudo, observa-se que o agrupamento é bem definido. Na Figura 5.37 observamos a disposição dos agrupamentos na bacia.

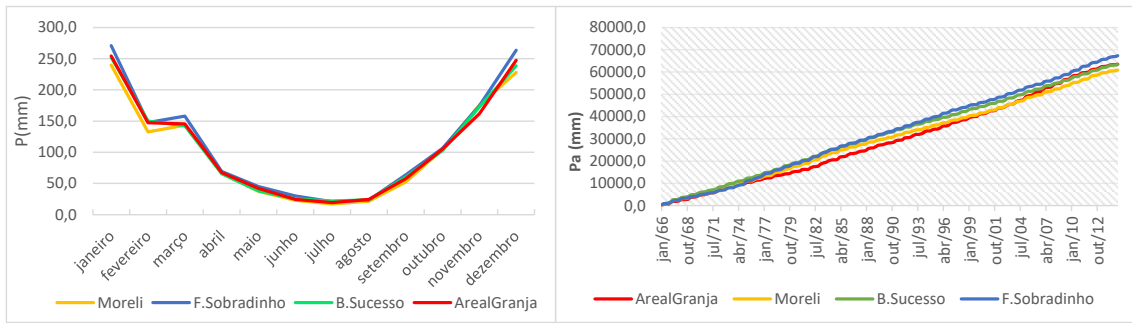


Figura 5.36 – Chuvas médias mensais – Chuvas acumuladas

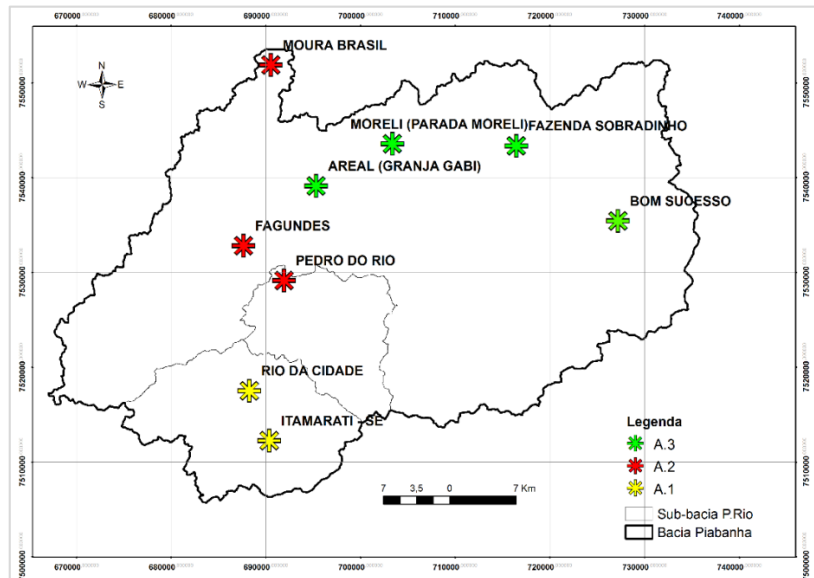


Figura 5.37 – Disposição dos agrupamentos na bacia

Em relação às estações horárias também foi feita uma divisão de agrupamentos como mostrado no dendograma da Figura 5.38. As estações escolhidas estão distribuídas na sub-bacia de Pedro do Rio pois, por serem em maior quantidade serão utilizadas na análise da modelagem horária. Cabe ressaltar que a série histórica destas estações é pequena de 2012 a 2014 (três anos).

Na Figura 5.38 são observados claramente dois agrupamentos importantes, um terceiro ainda poderia acontecer dentro do agrupamento AH1. Na Figura 5.39 de precipitações acumuladas, observa-se a separação dentro do agrupamento AH1, as estações Alto da Serra, Araras e Centro apresentam um comportamento similar acumulado, as estações e Coronel Veiga, Morin e Quitnadinha também, porém com maior quantidade de chuvas. Já o segundo agrupamento AH2 mostra maior estabilidade entre os membros componentes, apenas a estação Capim Roxo, apresenta uma leve separação mostrando chuvas acumuladas menores do que as outras estações do mesmo grupo. Na Figura 5.40 observa-se a distribuição dos agrupamentos na sub-bacia Pedro do Rio.

Observa-se que existem maiores diferenças nos gráficos de chuvas acumuladas nos agrupamentos das estações com dados horários, uma das razões para explicar esta fato é que os anos 2013 e 2014 foram anos diferenciados, o ano de 2013 apresentou no mês de março uma chuva intensa, porém depois começou a grande seca que estendeu-se pelo ano 2014 e 2015 (ARAÚJO, 2016).

A estação Quitandinha que se encontra nas cabeceiras da bacia teve chuvas acumuladas que chegaram a 9000 mm quase o dobro do que recolheram as estações do agrupamento AH2. Dessa maneira podemos dizer que a bacia do Pedro do Rio para aquela série histórica ficou praticamente dívida em dois agrupamentos.

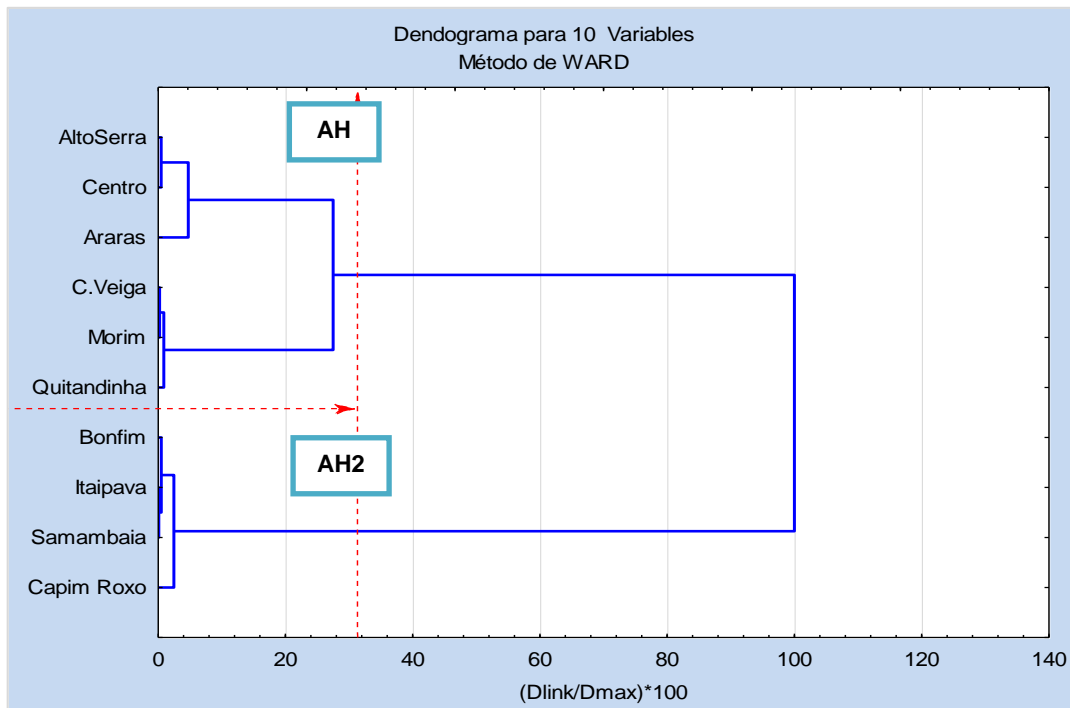


Figura 5.38 – Agrupamentos estações com medição horária (Pedro do Rio)

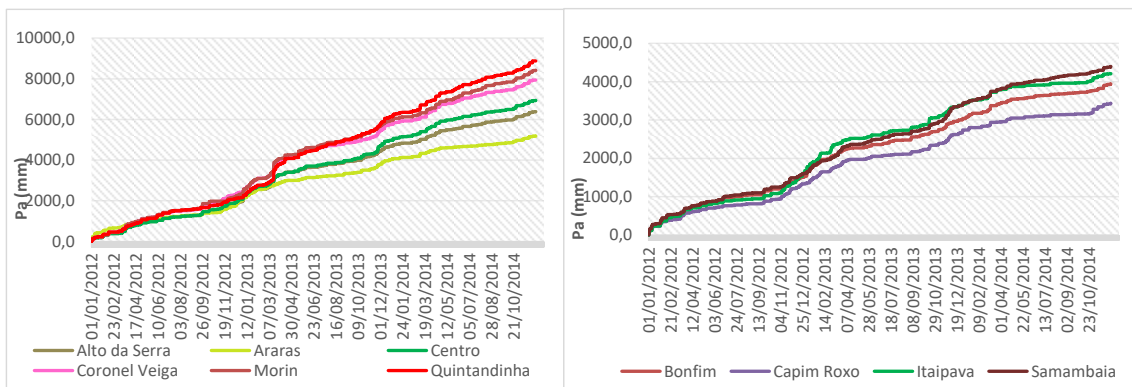


Figura 5.39 – Precipitações Acumuladas AH1 e AH2 respectivamente

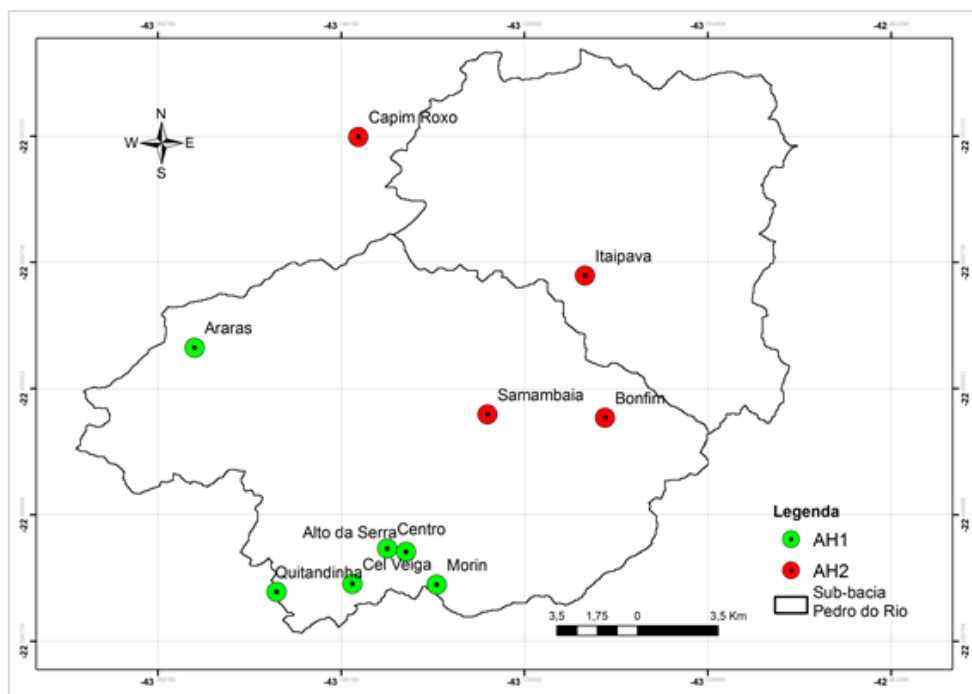


Figura 5.40 – Distribuição dos agrupamentos na bacia Pedro do Rio

5.5 Caracterização Morfométrica da bacia

5.5.1 Índices morfométricos

A partir do MDE escolhido e das ferramentas utilizadas na etapa anterior, foram determinados os índices morfométricos da sub-bacia do rio Pedro do Rio e da bacia do rio Piabanha, os quais são apresentados na Tabela 5.11

Tabela 5.11 – Características morfométricas

Índice	Pedro do Rio	Piabanha
Coefficiente de compacidade (KC)	2,01	2,23
Fator de Forma (Ff)	0,30	0,34
Índice de circularidade (Ic)	0,24	0,20
Densidade de drenagem (Dd) (km.km ⁻²)	1,44	1,75
Ordem da Bacia	6	6
Área da Bacia (km ²)	432,37	2066,68
Perímetro (km)	149,14	361,62
Comprimento dos Canais (km)	622,31	3625,73
Número de canais	805,00	5222,00
Cota máxima (m)	2236,00	2236,00
Cota mínima (m)	648,00	256,00
Comprimento mais longo do canal (km)	37,711	77,87
Comprimento do canal principal (km)	33,81	75,02

Pode-se observar com base em alguns dos índices morfométricos como a densidade de drenagem, que a bacia do rio Piabanha e Pedro do Rio, apresentam uma drenagem boa. Verificando-se o coeficiente de compacidade, aparentemente as duas bacias teriam forma mais alongada sem muita tendência a grandes enchentes para chuvas normais, o que é confirmado pelo fator de forma. No entanto, pode-se observar que a bacia Pedro do Rio, por apresentar grandes declividades, tem tempos de concentração pequenos o que contribui para ter picos de enchente.

Moreira et.al (2007) realizaram uma análise das características físicas de três sub-bacias localizadas nas cabeceiras da bacia de Pedro do Rio, encontrando os índices apresentados na Tabela 5.12

Tabela 5.12 – Características morfométrias bacias Petrópolis, Bonfim e Araras

Descrição	Bacias Experimentais		
	Petrópolis (Urbana)	Bonfim (Agrícola)	Araras (Preservada)
NOME DA BACIA			
ORDEM DA BACIA (Strahler)	4	3	3
AREA (km²)	43,340	30,500	5,300
PERIMETRO (km)	42,530	25,000	9,820
COMPRIMENTO DO RIO PRINCIPAL (km)	9,900	10,107	4,500
COMPRIMENTO DAS DRENAGENS (km)	56,360	37,846	16,710
DENSIDADE DE DRENAGEM (km/km²)	1,300	1,240	3,150
EXTENSAO MEDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (km)	1,091	0,754	0,294
COEFICIENTE DE COMPACIDADE	1,808	1,282	1,194
FATOR DE FORMA	0,440	0,299	0,262
MAIOR ALTITUDE (m)	1.7	2.26	1.66
MENOR ALTITUDE (m)	820	720	1.02
ALTITUDE MEDIANA (m)	964	1.364	1.302
DECLIVIDADE MÉDIA DO CURSO PRINCIPAL (m/m)	0,131	0,326	0,266

Fonte: Moreira et. al. (2007)

5.5.2 Declividade e Perfil do Rio

A declividade média da bacia do rio Piabanha foi calculado em 37% e de Pedro do Rio 41%, de modo que, segundo a EMBRAPA (1979) as bacias estariam classificadas como fortemente onduladas (25% - 45%). Foi gerado o mapa de declividades (Figura 5.41) por meio do MDE para a bacia Pedro do Rio (utilizado na modelagem). Na Figura 5.42 observa-se o perfil do talvegue do rio Piabanha até a estação Pedro do Rio e a curva hipsométrica da bacia de Pedro do Rio.

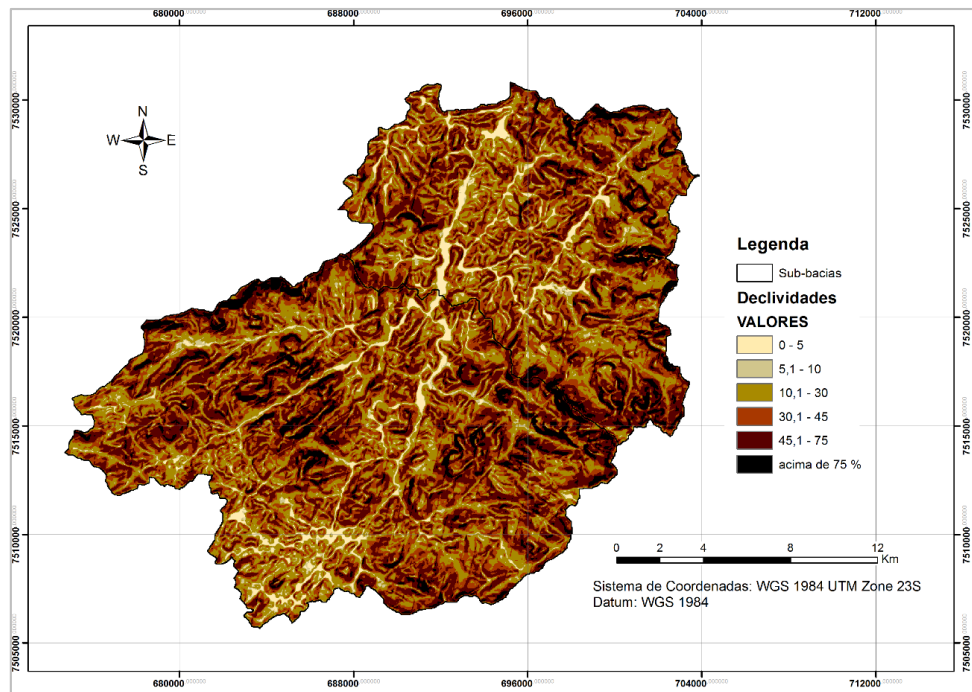


Figura 5.41 – Mapa de declividades na sub-bacia Pedro do Rio

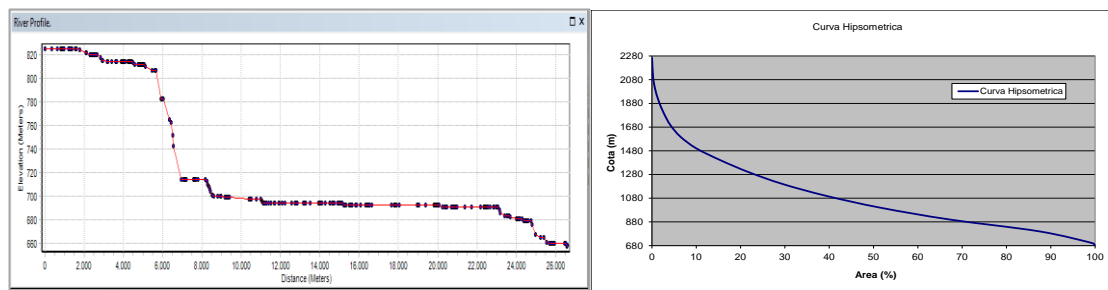


Figura 5.42 – Perfil do rio principal até Pedro do Rio-Curva hipsométrica Pedro do Rio

5.6 Aplicação do Modelo HEC-HMS

Neste item serão apresentados os resultados da calibração e validação de cada uma das simulações feitas, em diferentes escalas temporais descritas na metodologia no item 4.8.4. Primeiro serão apresentados os dados de entrada e os parâmetros iniciais estimados para rodar o modelo e suas considerações quando necessárias.

5.6.1 Modelagem diária com dados diários

Uma vez inserido o modelo de bacia (dados do HEC-GeoHMS) (Figura 5.43), são inseridos os dados do modelo meteorológico, estes dados referem-se às precipitações das séries históricas descritas, a evapotranspiração para cada uma das modelagens realizadas, e os pesos dos polígonos de Thiessen calculados para cada simulação feita,

foram também inseridos na modelagem diária os parâmetros escolhidos e apresentados na Tabela 5.13.

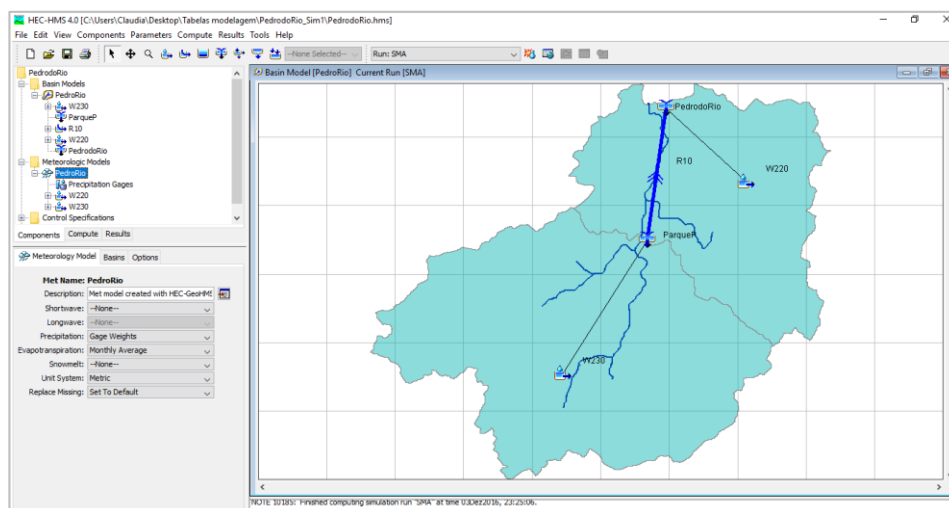


Figura 5.43 – Modelo de bacia apresentado pelo HEC-HMS em Pedro do Rio

Tabela 5.13 – Entrada de dados e parâmetros estimados

Bacia Pedro do Rio	Sub-bacia	W230	W220
	Area (km ²)	263,2	169,1
	Tempo de Concentração (h)	7,26	6,8
CANOPY Intercep. Vegetal	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Máximo Armazenamento (mm)	5,3	5
SURFACE Armaz.em depressões	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Máximo Armazenamento (mm)	4,1	4,5
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	50	50
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	60	60
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35	25
	Impermeabilidade (%)	22	12
	C.Armazenamento no solo (mm)	245	300
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120	160
	Percolação no solo(mm.h ⁻¹)	8	4
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100	100
	Percolação no GW1 (mm.h ⁻¹)	4	2
TRANSFORM	Coeficiente de armazenamento GW1 (h)	48	72
	SCS - Tlag. (min)	261	245
	HU Clarck - TC (h)	7,26	6,8
BASEFLOW	Coef.Arm (hrs)	21,78	20,4
	Descarga Inicial (m3.s ⁻¹)	5	5
	Constante de recessão	0,99	0,98

Na Tabela 5.13 observa-se que, o armazenamento inicial na interceptação vegetal e nas depressões foi considerado como zero, isto devido a que se verificou que o dia da simulação e um dia anterior não houve chuvas, dessa maneira o primeiro armazenamento seria considerado zero.

Nesse mesmo contexto o armazenamento inicial tanto do solo quanto do GW1 foi considerado com um conteúdo inicial de 50% e 60% respectivamente da capacidade dos armazenamentos, por ser um mês de chuvas constantes, no armazenamento GW1, foi um pouco maior por ser subterrâneo. Uma vez colocados no modelo todos estes valores, procedeu-se à primeira modelagem

Simulação Inicial

Primeira simulação para o período de 1998-2001 e validação para 1998-2004 – ano de aquecimento 1998:

Feita a primeira simulação, a Figura 5.44 mostra as séries de vazões geradas e observadas ao longo do tempo, enquanto a Figura 5.45 mostra o gráfico de dispersão das vazões geradas e observadas e a distribuição temporal dos resíduos.

Observa-se claramente que para um primeiro contato com o modelo, houve um ajuste adequado da série simulada (1998-2001), com uma eficiência NSE de 0,577 e se desconsidera o primeiro ano que viria a representar o aquecimento do modelo, este valor aumenta para 0,607. Isto nos mostra que a primeira estimação dos parâmetros pode ser considerada como apropriada.

Observa-se também que na primeira simulação não há uma boa representação dos picos ocorridos, principalmente no ano 1999 e há superestimação do fluxo de base no mesmo ano. O modelo também encontra o pico maior em 03 de janeiro de 2000 em não reconhece o pico do dia 24 de dezembro de 2001.

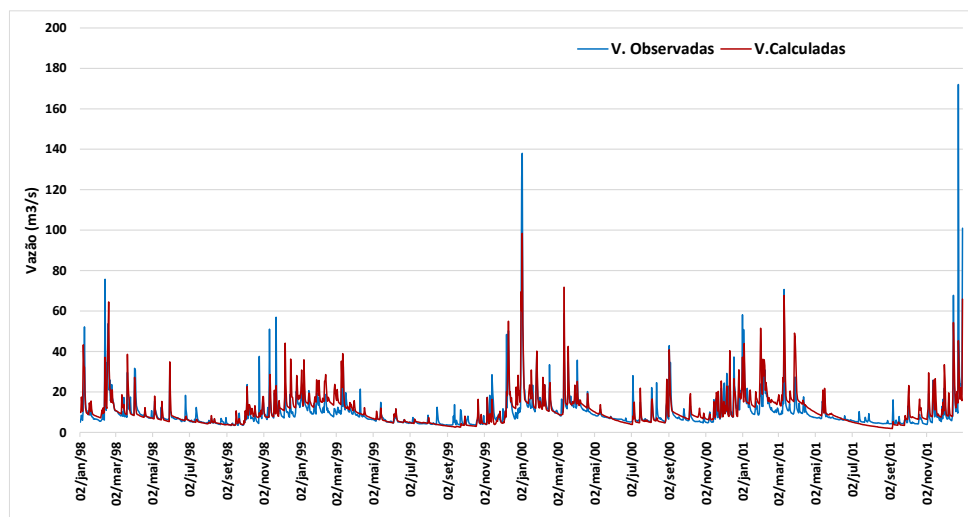


Figura 5.44 – Vazões geradas e vazões observadas – Simulação 1998-2001

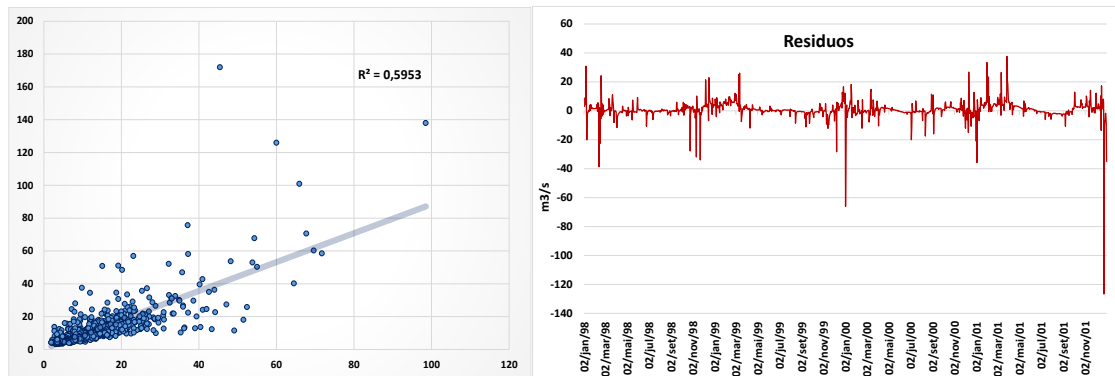


Figura 5.45 – Dispersão, vazões geradas e observadas / Distribuição dos resíduos – Simulação 1998 - 2001

Validação (1998-2004)

Para a validação foi utilizada toda a série histórica 1998-2004, sete anos, todavia sem calibração, o modelo foi validado e apresentou resultados satisfatórios para uma primeira etapa, estes resultados podem ser observados nas Figuras 5.46 e 5.47 que exibem as séries de vazões ao longo do tempo, gráfico de dispersão/distribuição dos resíduos respectivamente.

O modelo apresentou os resultados das métricas mostradas na Tabela 5.14, em que o coeficiente de eficiência Nash Sutcliffe foi de 0,442, que é considerado satisfatório. Da mesma maneira, analisando-se o gráfico de vazões calculadas e observadas, vemos que o modelo se ajusta mais no fluxo base do que nos picos. Existe uma subestimação na vazões pico.

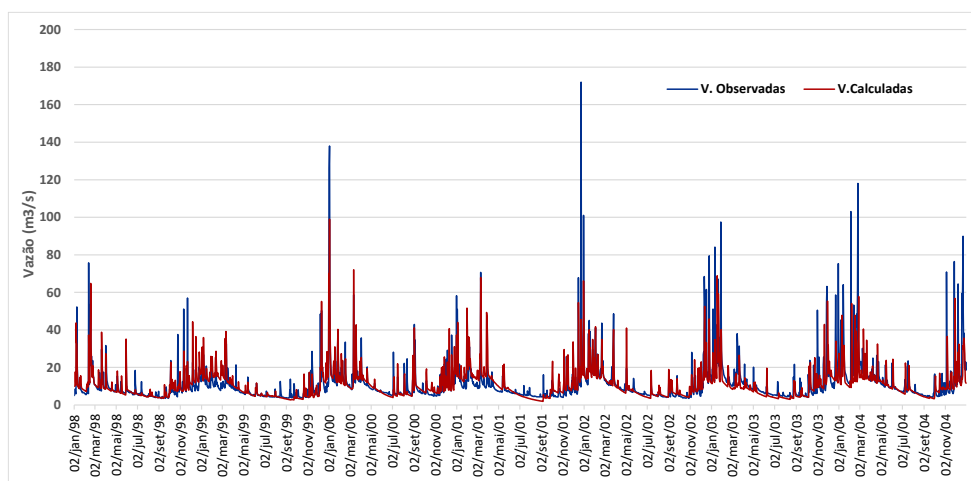


Figura 5.46 – Vazões geradas e vazões observadas – Validação 1998-2004

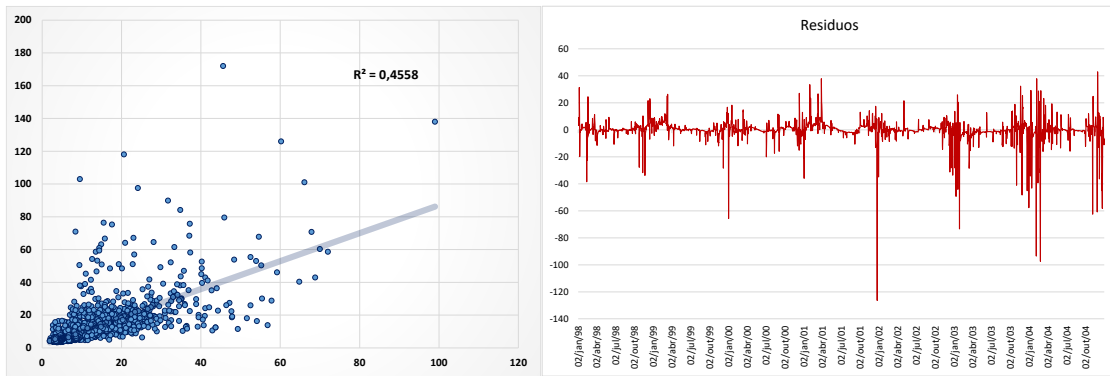


Figura 5.47 – Dispersão, vazões geradas e observadas / Distribuição dos resíduos (1998-2004)

Tabela 5.14 - Resultados das métricas da simulação e validação

Coeficiente de eficiência	Simulação1	Simulação sem ano de aquecimento	Validação
	98-01	99-01	1998-2004
Nash Sutcliffe (NSE)	0,577	0,607	0,442
R ²	0,595	0,613	0,456

Calibração 1999-2001:

A calibração foi feita levando em consideração a série 1998-2001, porém retirou-se o ano de 1998 que foi destinado a aquecimento do modelo.

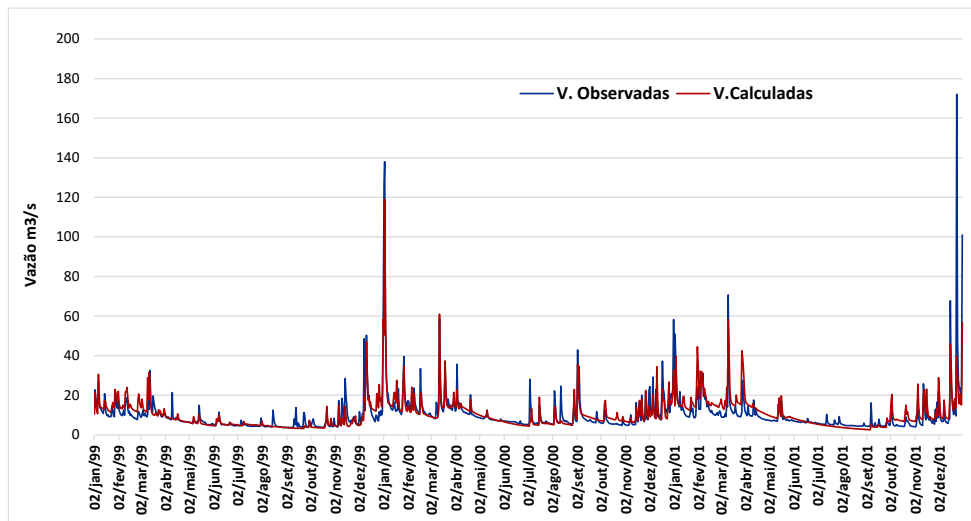


Figura 5.48 - Vazões geradas e vazões observadas - Calibração 1999-2001

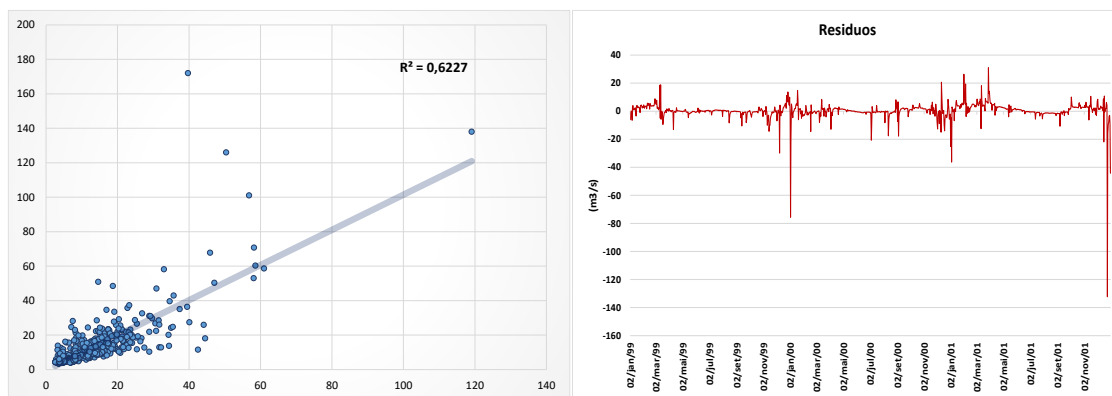


Figura 5.49 – Dispersão, vazões geradas e observadas / Distribuição dos resíduos (1999-2001)

Na Figura 5.48 se observa que com a calibração as vazões mínimas acompanham melhor as vazões mínimas observadas, o coeficiente de eficiência de Nash apresentou um resultado considerado bom de 0,621, no entanto, ainda existe um subestimação dos picos principalmente no ano 2001. Na Figura 5.49 se observa o gráfico de dispersão e a distribuição dos resíduos.

Validação 1998 – 2004

Para a validação em que foi considerado todo o período a Figura 5.50 mostra a representação das vazões. O hidrograma calculado acompanha o hidrograma observado, no entanto, não foi possível conseguir uma boa melhora na vazão de pico. O mês de dezembro de 2001 ainda apresenta picos que não foram reconhecidos pelo modelo, subestimando as vazões. Observa-se de igual maneira que os anos de 2002 a 2004 apresentam grande quantidade de picos se comparados com o período de 1998-2001, existe uma variabilidade nas chuvas e vazões nessas duas séries. Dessa maneira foram plotadas num gráfico somente as vazões da estação Pedro do Rio, para melhor observar esta mudança. A Figura 5.51 apresenta o comportamento dessas vazões no período completo além de uma linha de tendência que mostra melhor a variabilidade dos períodos.

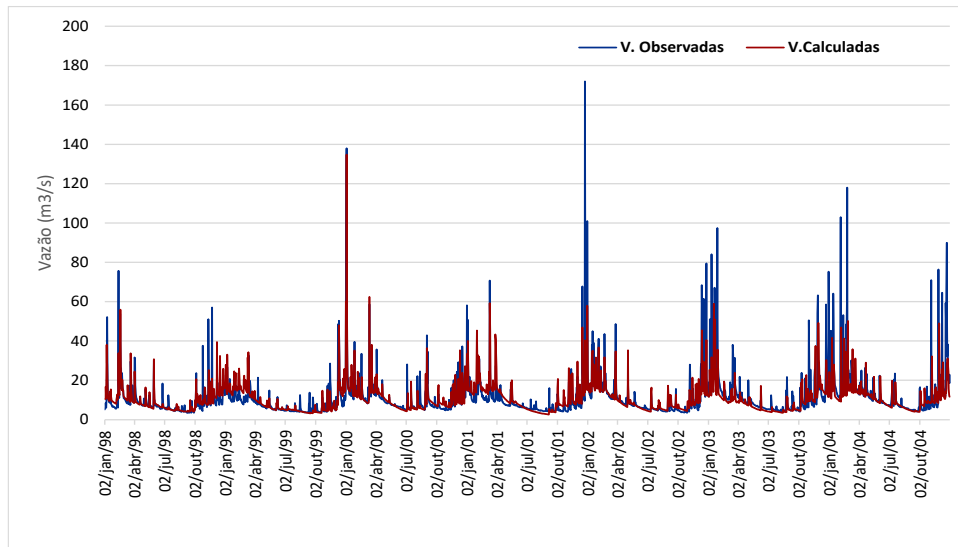


Figura 5.50 - Vazões geradas e vazões observadas - Validação 1998-2004

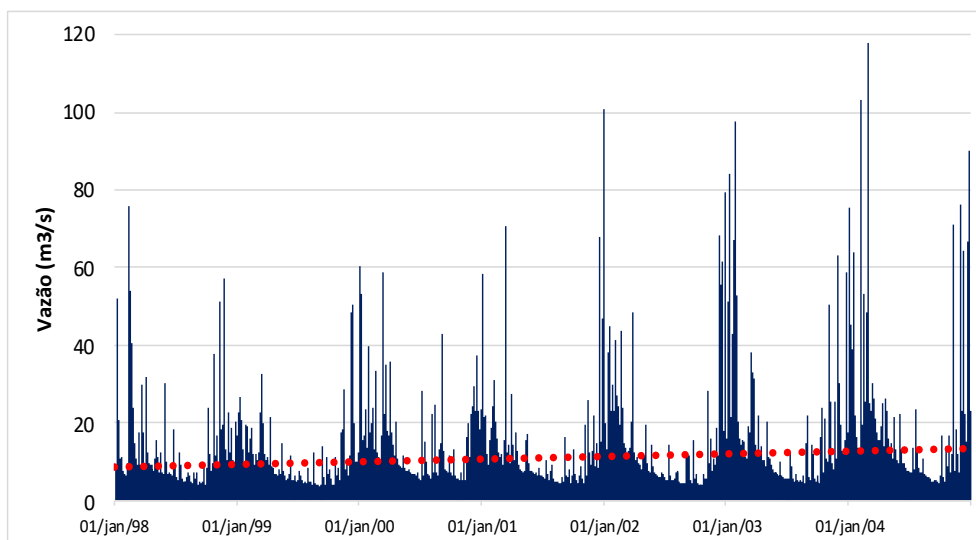


Figura 5.51 - Vazões em Pedro do Rio – 1998-2004

A validação apresentou uma leve melhora no coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe, com um valor de 0,466 (Tabela 5.15) porém o gráfico mostra um melhor acompanhamento das curvas. Na Figura 5.52 se observa a dispersão e a distribuição dos resíduos. Na Tabela 5.16 são apresentados os parâmetros calibrados manualmente, destaca-se que o método do HU de Clark foi desconsiderado por apresentar valores menores do que com o método do HU do SCS.

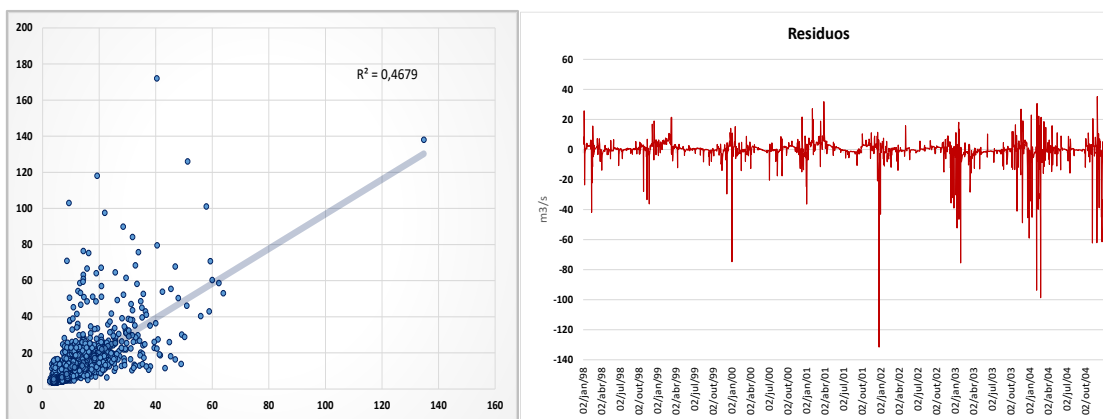


Figura 5.52 – Dispersão, vazões geradas e observadas / Distribuição dos resíduos (1998-2004)

Tabela 5.15 – Coeficiente de Eficiência NSE e R2 (1998-2001)

Métricas/Séries	Calibração	Validação
	99-01	1998-2004
Nash	0,621	0,466
R2	0,623	0,468

Tabela 5.16 – Parâmetros estimados e calibrados

		ESTIMADOS		CALIBRADOS	
Bacia Pedro do Rio	Sub-bacia	W230	W220	W230	W220
CANOPY	Armazenamento Inicial (%)	0	0	0	0
	Intercep. Vegetal	Máximo Armazenamento (mm)	5,3	5	5,3
SURFACE	Armazenamento Inicial (%)	0	0	0	0
	Armaz.em depressões	Máximo Armazenamento (mm)	4,1	4,5	4,1
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	50	50	50	50
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	60	60	60	60
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35	25	33	24
	Impermeabilidade (%)	22	12	17,4	12
	C.Armazenamento no solo (mm)	245	300	215	280
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120	160	125	130
	Percolação no solo (mm.h ⁻¹)	8	4	8	4
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100	100	95	100
	Percolação no GW1(mm.h ⁻¹)	4	2	2,5	1
	Coefficiente de armazenamento GW1 (h)	48	72	50	70
TRANSFORM	SCS - Tlag. (min)	261	245	261	245
BASEFLOW	Descarga Inicial (m ³ .s ⁻¹)	5	5	5,4	5,1
	Constante de recessão	0,99	0,98	0,9945	0,978

5.6.1.1 Comparação de resultados com outros estudos

Como foi mencionado anteriormente, outros estudos de modelagem já foram realizados na bacia do rio Pedro do Rio, entre eles está o de Gonçalves (2008); Lou (2010); Brito (2014) e Araújo (2016), todos eles em escala diária e com diferentes

ressalvas. Gonçalves por exemplo, utilizou o modelo SMAP e o TOPMODEL, os valores que o autor conseguiu para a série 1998-2004 foram até agora os melhores para a sub-bacia com o modelo semi-distribuído TOPMODEL e para dados diários, o modelo SMAP suavizado apresentou também valores adequados no mesmo estudo, Lou (2010) fez a modelagem com um modelo distribuído que é o MODCEL, no entanto na época ainda o modelo não considerava escoamento subterrâneo (BRITO, 2014) e que foi implementado por Brito, obtendo melhores resultados porém para outra data de calibração. Araújo (2016), simulou a bacia Pedro do Rio com SMAP, todavia utilizou outro método para a Evapotranspiração e fez a modelagem para outras séries históricas mais atuais.

Nesse contexto, a seguir é apresentada a Tabela 5.17 com os valores obtidos pelos diferentes autores citados (métricas da modelagem), tanto nas datas aqui modeladas quanto em outras datas. São apresentadas também as Figuras 5.53, 5.54 com as vazões observadas e calculadas de Gonçalves (2008) e de este estudo, com um mesmo período de calibração pelos dois modelos concentrados (SMAP; HEC-HMS).

Tabela 5.17 – Métricas dos resultados obtidos por diferentes autores na modelagem diária da bacia Pedro do Rio

Trabalho	Modelo usado	Tipo de modelo	Calibração			Validação		
			Período	r ²	NASH	Período	r ²	NASH
Brito (2014)	MODCEL	Distribuído	2001	0,75	0,60	2002 -2004	0,76	0,71
						-	-	-
Lou (2010)	MODCEL	Distribuído	1998	0,57	0,40	1999	0,59	0,33
			2002	0,56	0,47	2000	0,63	0,56
Gonçalves (2008)	TOPMODEL	Semi-distribuído	1998 – 2001	0,75	0,73	2002 - 2004	0,75	0,73
	SMAP ROSENBROCK	Concentrado	1998 – 2001	0,32	0,30	2002 - 2004	0,47	0,46
	SMAP SUAVIZADO	Concentrado	1998 – 2001	0,63	0,67	2002 - 2004	0,71	0,69
Araújo (2016)	SMAP (1)*	Concentrado	1998-2001	0,74	0,69	1998 – 2004	0,72	0,69
	SMAP(2)**		1998-2001	0,74	0,69	1998 – 2004	0,68	0,67
	SMAP		2007-2010	0,57	0,56	2010-2014	0,60	0,60
Presente estudo	HEC-HMS	Concentrado	1999-2001	0,62	0,62	1998-2004	0,47	0,47
* SMAP com parametros de Gonçalves								
** SMAP (Gonçalves com outros dados de evapotranspiração)								

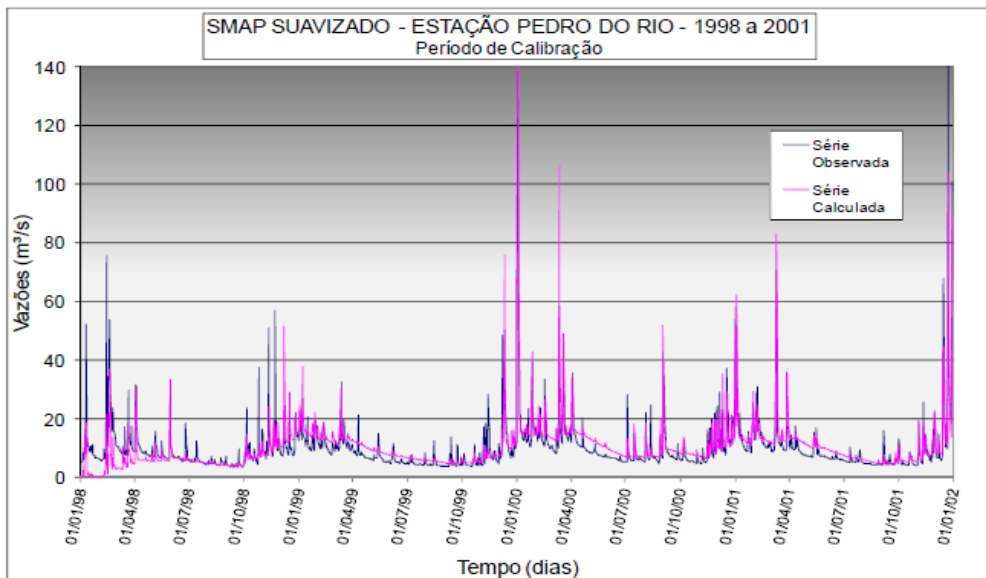


Figura 5.53 – Vazões observadas e calculadas Gonçalves (2008) NSE:0,67

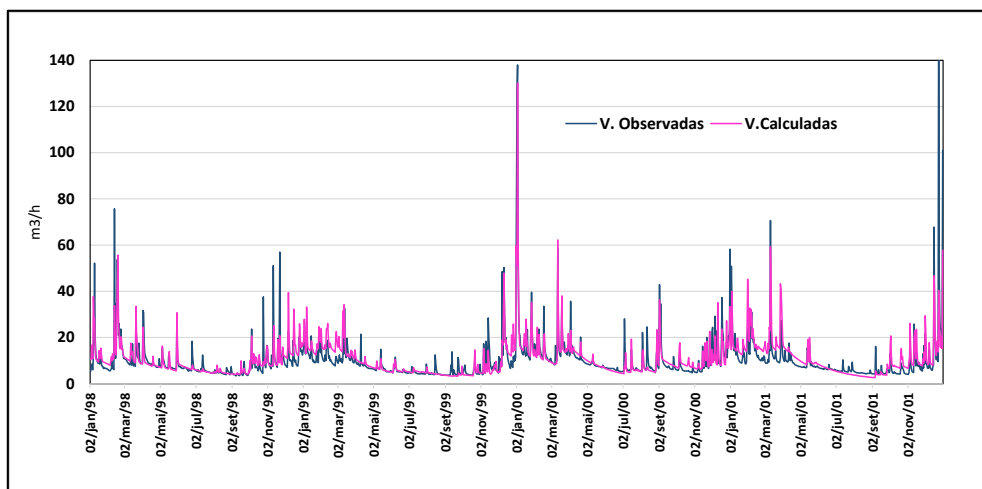


Figura 5.54 – Vazões observadas e calculadas HEC-HMS – Este estudo NSE: 0,62

5.6.2 Modelagem diária com dados horários

Para a modelagem com dados horários alguns parâmetros foram modificados, como a modelagem iniciou com período seco (Agosto 2012) supôs-se que o armazenamento inicial tanto do perfil do solo quanto do GW1 estavam vazios, ou seja, para a modelagem colocou-se zero. Na vazão de base foi utilizada a vazão calibrada do modelo diário como input para a modelagem, os outros dados se mantiveram. Na tabela 5.18 são apresentados os dados iniciais, lembrando que o período agora simulado é mais recente.

Dados de Entrada:

- Dados de chuvas das duas estações que apresentam dados diários da ANA representativas da bacia do rio Parque (W230), Itamarati e Rio da Cidade no período 2012- 2014
- Dados de vazões da estação Parque início, Agosto de 2012 até dezembro de 2014, lembrando que foram utilizados os dados médios de 7 e 17 horas, de maneira de criar dado médio diário de vazão.
- Dados de evapotranspiração mensais para o mesmo período (2012-2014) obtidos de Araújo (2016) pelo método de Camargo.
- Novo modelo de bacia da sub-bacia Parque.

Tabela 5.18 – Dados de entrada no modelo – Parâmetros iniciais

	Bacia Parque W230	W230
	Area (km ²)	263,2
	Tempo de Concentração (h)	7,26
CANOPY	Armazenamento Inicial (%)	0
Intercep. Vegetal	Máximo Armazenamento (mm)	5,3
SURFACE	Armazenamento Inicial (%)	0
Armaz.em depressões	Máximo Armazenamento (mm)	4,1
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	0
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	0
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35
	Impermeabilidade (%)	22
	C.Armazenamento no solo (mm)	245
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120
	Percolação no solo (mm.h ⁻¹)	8
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100
	Percolação no GW1(mm.h ⁻¹)	4
	Coeficiente de armazenamento GW1 (h)	48
TRANSFORM	SCS - Tlag. (min)	261
BASEFLOW	Descarga Inicial (m3.s ⁻¹)	5,4
	Constante de recessão	0,99

Simulação Inicial

Com os parâmetros na tabela acima apresentados foi feita a primeira simulação do modelo com dados horários de vazão representando dados diários. Cabe ressaltar a estação Petrópolis antigamente usada na simulação anterior (Dados diários) não foi mais utilizada pois está desativada e não apresenta dados para este novo período.

Nas Figuras 5.55 são apresentadas as vazões simuladas para o período de 10 de Agosto de 2012 até 10 de novembro de 2012 (três meses). O Coeficiente de eficiência

para esta simulação foi NSE: 0,455 e um R^2 : 0,463 no entanto, não houve uma boa validação para 2013 e nem para 2014, apresentando coeficientes baixos para esses anos.

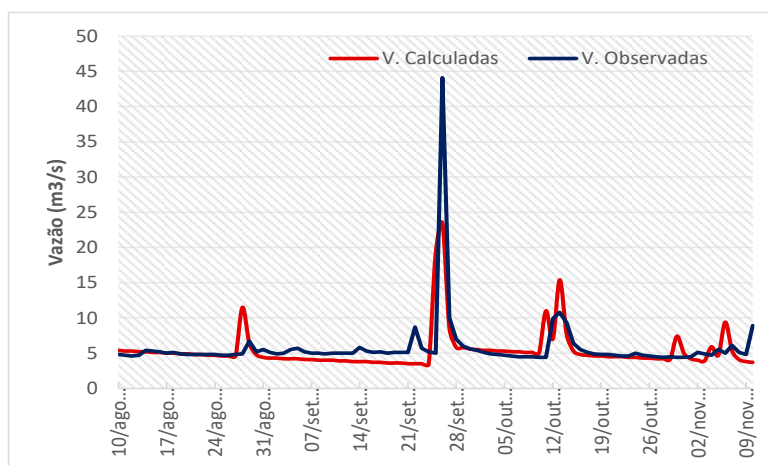


Figura 5.55 – Vazões geradas e vazões observadas – Simulação (Ago-Nov/2012)

Calibração e Validação:

Realizada a calibração dos parâmetros do modelo (Tabela 5.19), foi realizada a validação para o ano 2013 no mesmo período. Nas Figuras 5.56 e 5.57 são apresentadas as vazões calculadas e observadas do período, tanto para calibração quanto para validação.

Observa-se que esta calibração não foi muito adequada, a tabela 5.20 apresenta os coeficientes de eficiência que como pode-se observar são baixos. Cabe ressaltar que uma calibração somente para o período de 2012 foi feita apresentando resultados de coeficiente NSE:0,5 no entanto, quando era realizada a validação, estes parâmetros não proporcionavam comportamento adequado nem para o ano 2013 nem para o 2014. Isto pode ter uma explicação, além de estar-se usando vazões com leituras horárias simulando dados diários, e chuvas diárias num período de apenas 3 meses, os anos 2013 e 2014, foram anos bem diferenciados, em março de 2013 houveram chuvas extremas como apresenta Araújo (2016) no seu estudo, posteriormente no fim do ano houve um período de seca que só foi aumentando com o decorrer do tempo afetando assim, os anos 2014 e parte de 2015.

Tabela 5.19 - Parâmetros estimados e calibrados

Sub-bacia/Parâmetros		Estimado	Calibrado
		W230	W230
CANOPY	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Intercep. Vegetal	Máximo Armazenamento (mm)	5,3
SURFACE	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Armaz.em depressões	Máximo Armazenamento (mm)	4,1
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	0	0
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	0	0
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35	35
	Impermeabilidade (%)	22	18
	C.Armazenamento no solo (mm)	245	200
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120	100
	Percolação no solo (mm.h ⁻¹)	8	8
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100	100
	Percolação no GW1(mm.h ⁻¹)	4	4
	Coeficiente de armazenamento GW1 (h)	48	48
TRANSFORM	SCS - Tlag. (min)	261	261
BASEFLOW	Descarga Inicial (m3.s ⁻¹)	5,4	4
	Constante de recessão	0,99	0,9972

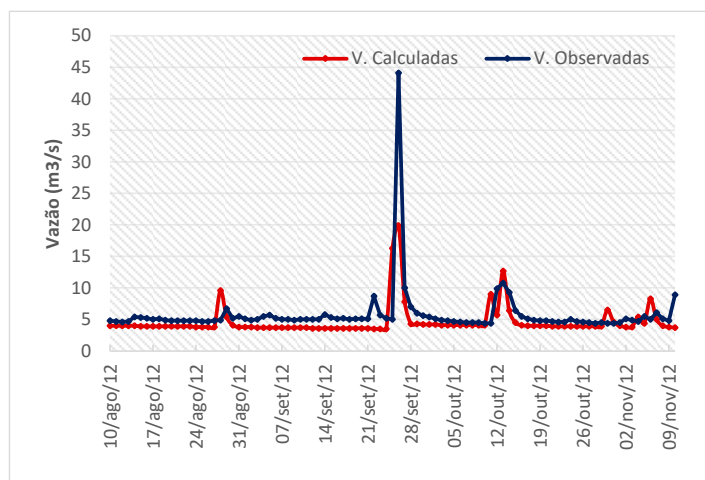


Figura 5.56 – Vazões geradas e vazões observadas – Calibração (Ago-Nov/2012)

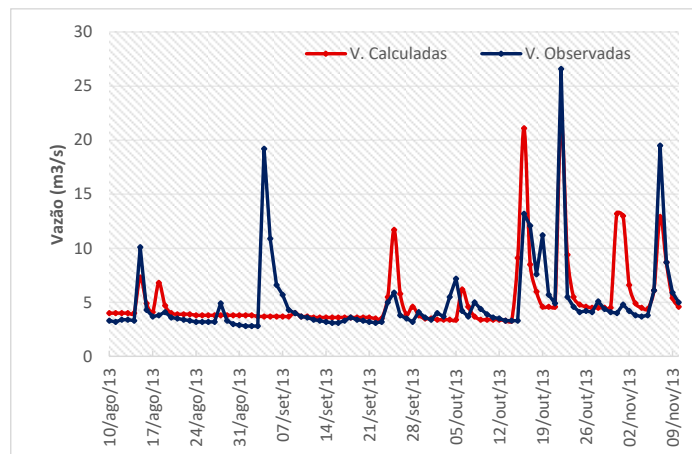


Figura 5.57 – Vazões geradas e vazões observadas - Validação (Ago-Nov/2013)

Na modelagem, na hora de visualizar a vazão de base, observa-se claramente esta situação, enquanto as vazões de base para o ano 2012 se mantem na casa de 5,4 m³.s⁻¹ para o período seco, em 2013 reduz para aproximadamente 3,5 m³.s⁻¹ e para 2014 ainda mais, isto pode ser observado na Figura 5.58.

Tabela 5.20 – Coeficiente de eficiência NSE e R²

Métricas/Séries	Simulação	Calibração	Validação
	2012	2012	2013
Nash Sutcliffe (NSE)	0,455	0,401	0,373
R ²	0,463	0,483	0,42

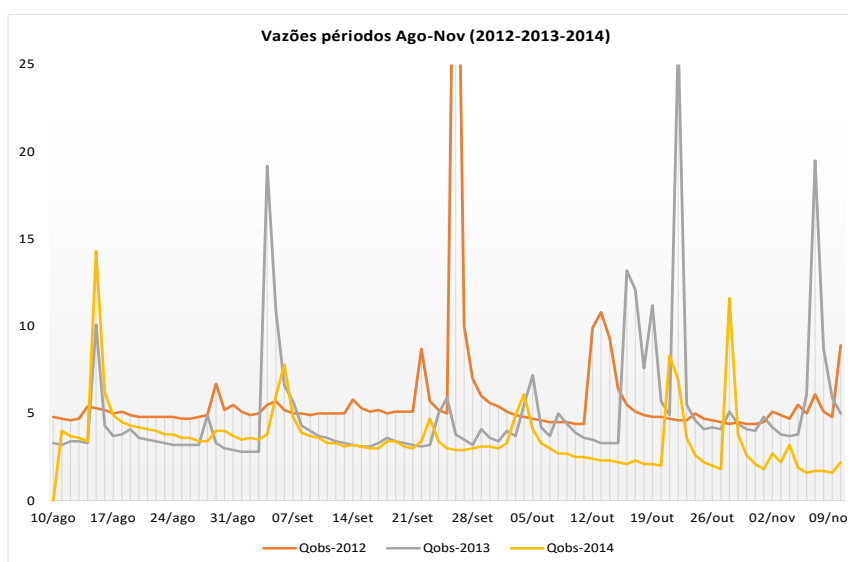


Figura 5.58 – Vazões do período (Ago-Nov)

5.6.3 Modelagem horaria com dados horários

Nesta modelagem os mesmos parâmetros de entrada foram utilizados (Tabela 5.18). A escala temporal das foi precipitações horária e das vazões também. A evapotranspiração continuou como a média mensal no período.

Na primeira modelagem horaria foram utilizadas as nove estações de chuvas distribuídas na bacia do Parque, os resultados da calibração e validação para os anos 2012 (calibração) 2013-2014 (validação) são apresentados nas Figuras 5.59, 5.60 e 5.61 respectivamente. Nesta modelagem se observa como a escala temporal melhora a modelagem. As figuras foram agrupadas para melhor entender e visualizar cada ano. Nas tabelas 5.21 e 5.22 encontram-se os parâmetros calibrados assim como, os coeficientes de eficiência NSE e R².

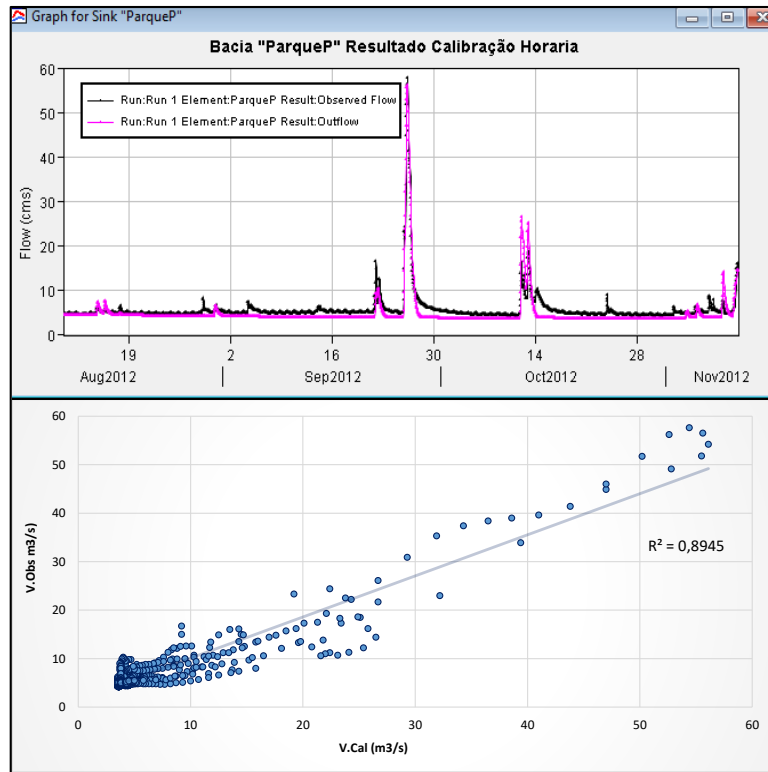


Figura 5.59 – Vazões geradas e vazões observadas – Calibração 2012

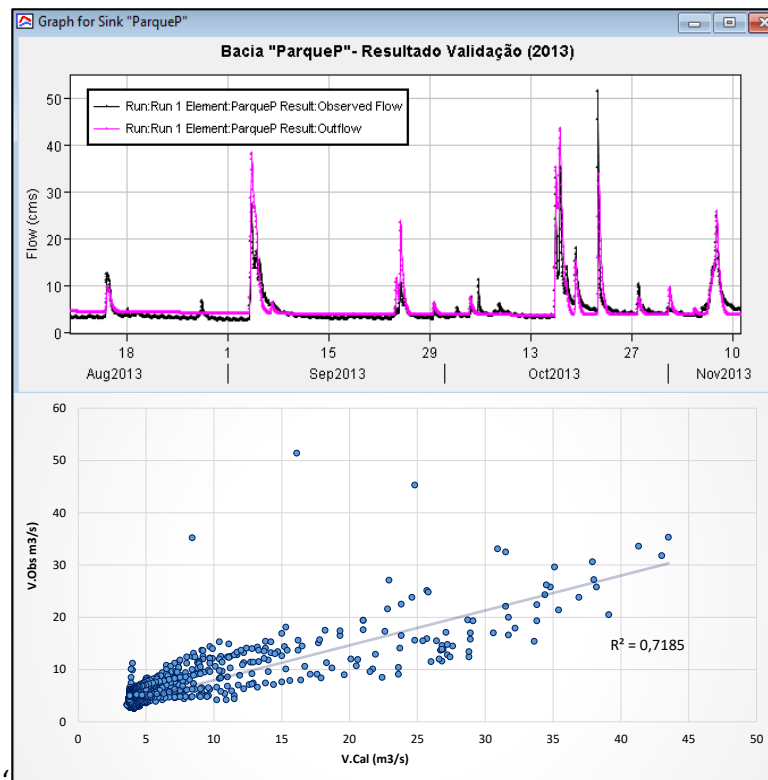


Figura 5.60 – Vazões geradas e vazões observadas – Validação 2013

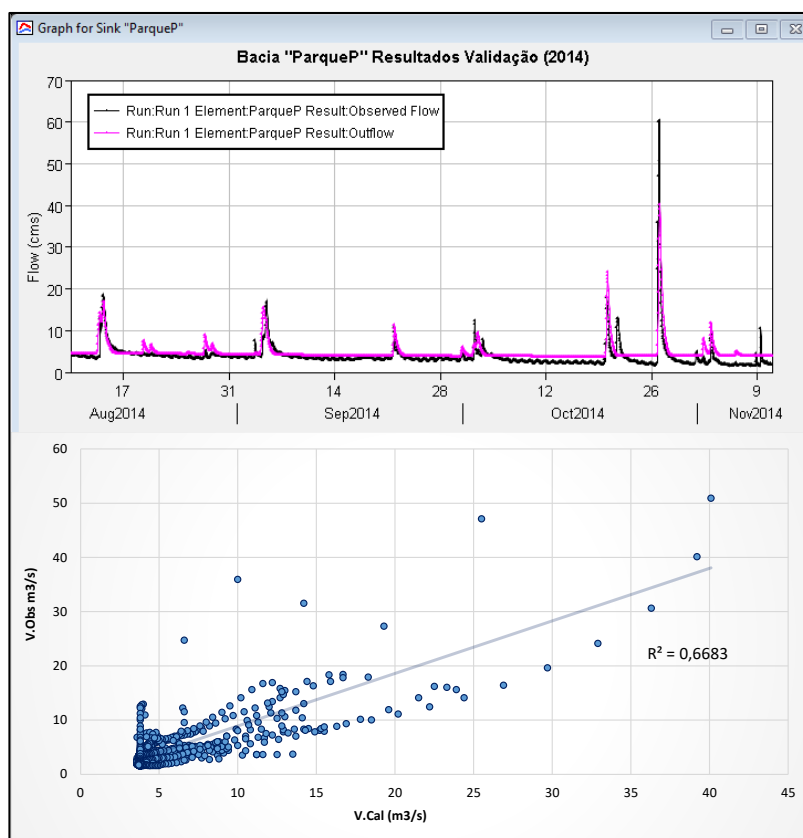


Figura 5.61 – Vazões geradas e vazões observadas – Validação 2014

Tabela 5.21 – Parâmetros estimados e calibrados (2012-2013-2014)

Sub-bacia/Parâmetros		Estimado	Calibrado
		W230	W230
CANOPY	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Intercep. Vegetal	Máximo Armazenamento (mm)	5,3
SURFACE	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Armaz.em depressões	Máximo Armazenamento (mm)	4,1
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	0	0
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	0	0
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35	30
	Impermeabilidade (%)	22	15,5
	C.Armazenamento no solo (mm)	245	240
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120	100
	Percolação no solo (mm.h ⁻¹)	8	8
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100	95
	Percolação no GW1(mm.h ⁻¹)	4	2
	Coeficiente de armazenamento GW1 (h)	48	30
TRANSFORM	SCS - Tlag. (min)	261	261
BASEFLOW	Descarga Inicial (m ³ .s ⁻¹)	5,4	4,5
	Constante de recessão	0,99	0,996

Tabela 5.22 – Coeficiente de Eficiência NSE e R² (2012-2013-2014)

Métricas/Séries	Calibração	Validação	Validação
	2012	2013	2014
Nash Sutcliffe (NSE)	0,816	0,521	0,594
R ²	0,895	0,719	0,668

5.6.4 Modelagem horaria com dados horários com estações escolhidas pelo método de agrupamento de dados WARD.

Com o intuito de verificar a influência das estações pluviométricas distribuídas na sub-bacia que aparentemente apresentam ter maior peso nas vazões de Parque, escolheu-se o agrupamento de estações horárias separadas pela metodologia de WARD em técnicas de mineração de dados, dessa maneira gerou-se mais uma modelagem com as estações do agrupamento AH2 (Figura 5.40). Os parâmetros de entrada para o modelo são os mesmos. Nas Figuras 5.62, 5.63 e 5.64 são apresentados os resultados para os anos 2012 (calibração) 2013-2014 (validação). Nas tabelas 5.23 e 5.24 encontram-se os parâmetros calibrados assim como, os coeficientes de eficiência NSE e R².

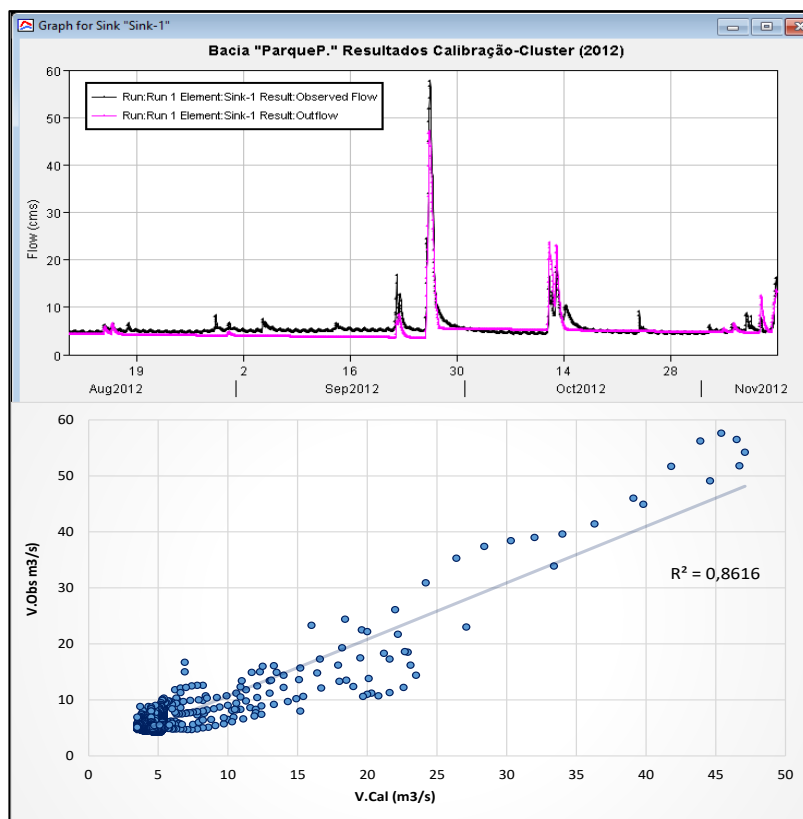


Figura 5.62 – Vazões geradas e vazões observadas – Calibração 2012

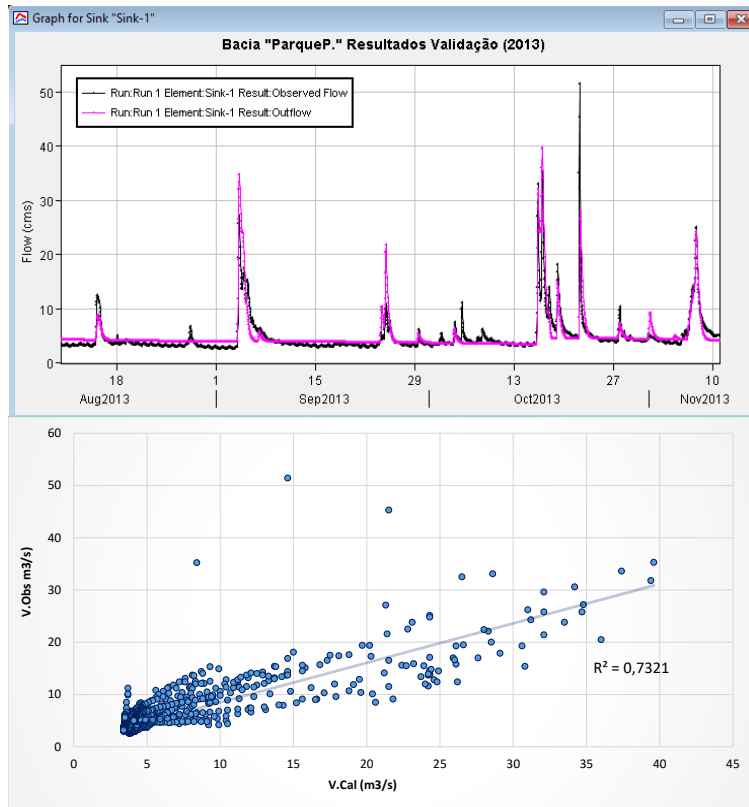


Figura 5.63 – Vazões geradas e vazões observadas – Validação 2013

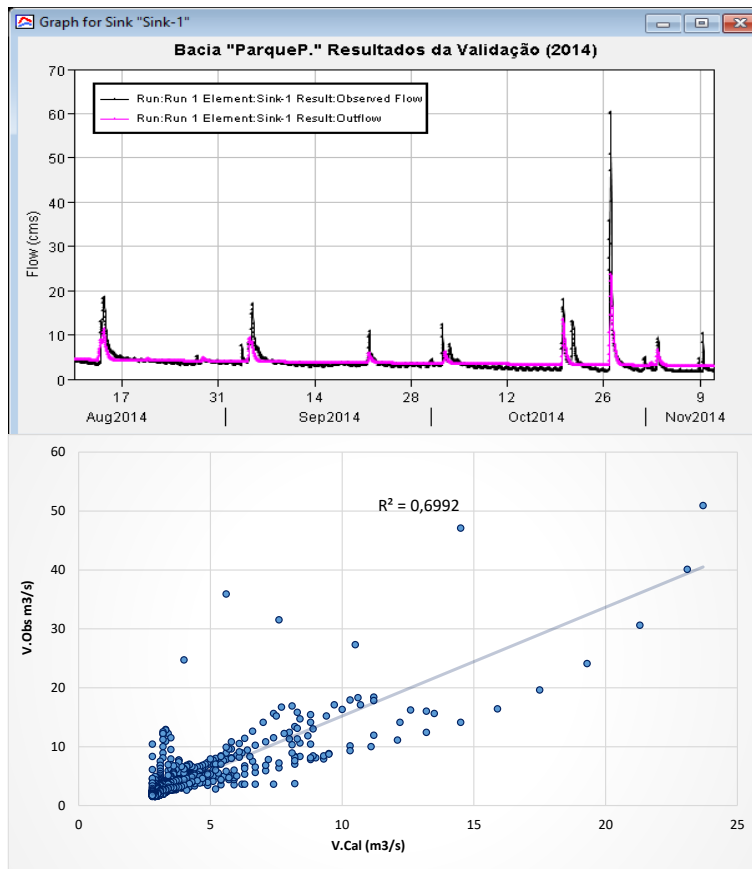


Figura 5.64 – Vazões geradas e vazões observadas – Validação 2014

Tabela 5.23 – Parâmetros estimados e calibrados – com variação de estações pluviométricas (2012-2013-2014)

Sub-bacia/Parâmetros		Estimado	Calibrado/Clusters
		W230	W230
CANOPY	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Intercep. Vegetal	Máximo Armazenamento (mm)	5,3
SURFACE	Armazenamento Inicial (%)	0	0
	Armaz.em depressões	Máximo Armazenamento (mm)	4,1
LOSS	C. Inicial de armazenamento no solo (%)	0	0
	C. inicial de armazenamento em GW1 (%)	0	0
	Max Infiltração (mm.h ⁻¹)	35	35
	Impermeabilidade (%)	22	15,4
	C.Armazenamento no solo (mm)	245	240
	C. Armazenamento na zona de Tensão (mm)	120	100
	Percolação no solo (mm.h ⁻¹)	8	8
	C. Armazenamento na GW1 (mm)	100	95
	Percolação no GW1(mm.h ⁻¹)	4	2
	Coeficiente de armazenamento GW1 (h)	48	30
TRANSFORM	SCS - Tlag. (min)	261	265
BASEFLOW	Descarga Inicial (m ³ .s ⁻¹)	5,4	4,25
	Constante de recessão	0,99	0,9956

Tabela 5.24 – Coeficiente de Eficiência NSE e R² (2012-2013-2014)

Métricas/Séries	Calibração	Validação	Validação
	2012	2013	2014
Modelagem Horaria com Cluster AH2			
Nash Sutcliffe (NSE)	0,835	0,648	0,552
R²	0,862	0,732	0,700

Observa-se que nessa nova modelagem, que os coeficientes de eficiência NSE e R² foram melhores do que na modelagem anterior, em que todas as estações pluviométricas eram levadas em consideração. O agrupamento de dados mostrou a semelhanças nas estações do grupo escolhido que refletiram melhor nas vazões da estação Parque, isto pode ser porque muitas vezes, na bacia, a variabilidade pluviométrica é grande. Já foi constatado que, apesar de ser uma bacia pequena, existem variações na espacialização das chuvas, como afirma Linsley et al. (1949) em áreas montanhosas, onde as feições topográficas criam um padrão típico de precipitação sobre a área, dados determinados por médias das estações ou polígonos de Thiessen podem ser considerados tão somente como um indicador da precipitação média da bacia.

CAPITULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

O objetivo principal deste estudo foi cumprido, constatando que, dados diários podem ajudar no estudos hidrológicos, porém, as medições em escala sub-diária de variáveis hidrológicas como altura de chuva e vazão, são muito importantes, uma vez que, como verificado na modelagem, representam de melhor maneira o comportamento hidrológico da bacia do rio Piabanha, que apresenta um tempo de concentração sub-diário.

O trabalho baseou-se inicialmente no levantamento e análise dos dados hidrológicos nas redes de monitoramento atuantes na área. Constatou-se que apesar da bacia contar com uma rede suficiente de estações, as mesmas, muitas vezes não apresentam dados ou estão desativadas, além disso ainda existe dificuldade no tratamento dos dados, seja pelas falhas nas séries históricas das estações mais antigas ou pelas séries ainda incipientes de estações recém colocadas.

A espacialidade dos dados também foi uma questão verificada, existem estações de diferentes instituições muito perto umas de outras, apesar de estas servirem de apoio na hora de preenchimentos de falhas, observa-se que existem regiões que precisam de um maior monitoramento como as sub-bacias do rio Preto e Fagundes pertencentes à bacia do Piabanha.

As ferramentas de mineração de dados utilizadas neste trabalho que geraram os *clusters* ou agrupamentos, evidenciam a necessidade de um estudo adequado para verificar a espacialidade das estações, já que foi constatado que existem variabilidade na distribuição das chuvas na bacia.

Os agrupamentos gerados pelo método de WARD foram uteis também na hora da modelagem, já que, observou-se que algumas estações podem ter maior influência do que outras na mesma bacia, não sendo, em alguns casos suficiente a divisão feita com os polígonos de Thiessen.

A ferramenta HEC-Geo HMS utilizada para a determinação das características da bacia, assim como para entrada do modelo, mostrou-se adequada para o estudo. No entanto, esta ferramenta pode ser mais útil no caso de ter maiores divisões de sub-bacias por ser uma ferramenta que prepara já o modelo de entrada para o HEC-HMS.

Um pontos que demandou maior trabalho foi a determinação dos parâmetros iniciais para o modelo SMA, uma tarefa difícil levando em consideração que não existem muitos dados de solos, entretanto, por ser um modelo concentrado esta tarefa fica mais plausível do que para um modelo distribuído

Contudo, o SMA mostrou que com uma melhor caracterização dos solos a modelagem pode resultar mais eficaz, estudar o comportamento dos fluxos de base é complexo, principalmente numa bacia que não apresenta muita informação sobre a dinâmica hidrológica do solos.

6.2 Recomendações

Por representar um dos primeiros trabalhos na bacia utilizando dados em escala horária de chuvas e vazões algumas questões ficaram para serem consideradas como recomendações. Entre elas destaca-se as seguintes;

- maiores esforços para manter as estações que apresentam os dados sub-diários na bacia são importantes, pois a série histórica, iniciada a partir de 2011, possui falhas para todo o ano 2015, isto faz com que aumente a dificuldade em estudar a variabilidade hidrológica na região.
- a problemática abordada neste estudo pode ser complementada com trabalhos futuros, com o uso de estatísticas multivariadas, para analisar o comportamento das chuvas em função do relevo da bacia e de outras características físicas.
- a realização de campanhas de campo na bacia é muito importante para trabalhos futuros, por possibilitar um maior contato com a bacia e facilidade de acesso, sendo uma bacia experimental que conta com apoio de da Universidade UFRJ e de outras instituições como a CPRM, INEA, comitê de bacia, entre outras.
- a campanha em campo, realizada na bacia, comprovou que que o tempo de concentração é muito curto entre alguns locais. Dentro desse contexto, indica-se que em trabalhos futuros seja empregado o uso de traçadores, para auxiliar a determinação de características importantes, como tempo de trânsito, vazão líquida, velocidade média entre outras.
- desenvolvimento de estudos que avaliem as características físicas da bacia também são muito importantes, maiores detalhes em questão de uso e cobertura de solos, tipo de solos, em escalas maiores passam a ser necessários devido as mudanças

que acontecem na bacia. Este foi um dos principais gargalos na aplicação do modelo SMA do HEC-HMS que está em função de vários parâmetros de solos.

- maiores estudos relacionados com a hidrogeologia da bacia, são essenciais, o estudo dos solos e seus estratos rochosos verificando a percolação nas camadas, a vazão lateral e vazão de base na bacia são informações importantes para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica pois indicam o comportamento das vazões mínimas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABBOTT, M.B. E REFSGAARD J.C. **Distributed hydrological modelling**, Holanda, Kluwer Academic Publisher, 1996.

AGRA, S. D., SOUZA, V. C. B., NEVES, M. G. F. P., CRUZ, M. A. S., Metodologias de regionalização de vazões: estudo comparativo na bacia do Rio Carreiro – Rs. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Curitiba-PR., 2003.

AMORIN, E. L. C., OLIVEIRA NETTO, A. P., MEDIONDO, E. M., 2005, Estudo de métodos para regionalização de vazão. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABRH/Acquacon, 2005.

ANA - AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Informações Hidrológicas. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em:
<<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoeshidrológicas/redehidro.aspx>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

ANDRADE, C. D. et al. Precipitation Analysis and the Influence of the El Niño Phenomenon on the Transboundary Basin of the Madeira River. **Water Resour Manage**, [s.l.], v. 30, n. 9, p.3077-3092, 6 maio 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1332-8>.

ANDRADE, C. D. **Análise pluviométrica da bacia transfronteiriça da bacia do rio Madeira**. 2008. 138 f. Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil, Coppe, Ufrj, Rio de Janeiro, 2008.

ANDRADE, E. A., Regionalization of small watersheds in arid and semiarid regions: cluster and andrews curve approaches, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 18, n.4, pp. 38-49, 1999.

ARAÚJO, L.M.N., **Identificação de Padrões Hidrológicos de Precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ**. 2016.250f. Tese – Doutorado em Engenharia Civil, Coppe, Ufrj, Rio de Janeiro, 2016

AYERS, J. C. **Water. Sustainability Science**, 2011. Disponível em:
<<http://www.vanderbilt.edu/Sustainability/book/S1C10.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

AZEVEDO, A. A. **Avaliação de Metodologias de Regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paraná**. Xf., 2004. Dissertação - Mestrado em ..., UFV, Visoça, 2004.

AZMAT, M. et al. Hydrological modeling to simulate streamflow under changing climate in a scarcely gauged cryosphere catchment. **Environ Earth Sci**, [s.l.], v. 75, n. 3, p.1-16, 25 jan. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-5059-2>

BAENA, L. G. N., DA SILVA, D. D., PRUSKI, F. F., CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em Modelo Digital de Elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul, **Engenharia Agrícola., Jaboticabal**, v. 24, n. 3 (Set - Dez), pp. 612-624, 2004.

BAPTISTA, A. C. **Análise da paisagem e identificação de áreas suscetíveis a Movimentos de massa na APA Petrópolis – RJ: Subsídio ao planejamento urbano**. Xf., 2005. Dissertação – Mestrado em..., Viçosa, 2005.

BASHAR, K.; ZAKI, A.f.. SMA Based Continuous Hydrologic Simulation of the Blue Nile. In: international conference of Unesco flanders, fust; towards a better cooperation, 1., 2005, Sharm Elshiekh, Egypt. **Anais...** .Sharm Elshiekh, Egypt: Unesco, 2005. p. 1 - 10.

BENNETT, T. H. Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center.

BERGSTRÖM, S; GRAHAM, L.P. On the scale problem in hydrological modelling. **J. Hydrology**, 211:253-265, 1998.

BERTONI J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2007. p.177-241

BEVEN, K. Changing ideas in hydrology – The case of physically based models, **Journal of Hydrology**, v. 105 n. 1-2 , pp. 157-172, 1989.

BEVEN, K., KIRKBY M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques**, v. 24, v. 1, pp. 43 – 69, 1979.

BEVEN, Keith. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. **Advances In Water Resources**, Lancaster, v. 1, n. 16, p.41-51, 1993.

BRITO P.L.C., **Desenvolvimento do módulo para representação de escoamento de base no modelo MODCEL** Xf. 2014. Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014

BRUSA, L. C. **Aprimoramento estatístico da regionalização de vazões máximas e médias. Aplicação a bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Xf., 2004. Tese – Doutorado em ..., IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.

CABRAL, Samuellson Lopez et al. Modelagem hidrológica continua de uma bacia hidrográfica do semiárido Brasileiro: Aplicação do modelo Soil Moisture Accounting HEC-HMS. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais do Simpósio**. Brasília: Sbrh, 2015. p. 1 - 9.

CAMARGO, A., 1971, **Balanco hídrico no Estado de São Paulo**. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24p. (Boletim, 116)

CANEDO, P. M. Hidrología Superficial. In: **Coleção ABRH de Recursos Hídricos**, Engenharia Hidrológica, 1ed., Capítulo 4, Rio de Janeiro, BR, Editora da UFRJ, 1989.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. 2006. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241 – 248, 2006.

CARVALHO JUNIOR, M. M. **Metodologia para determinação das áreas de preservação permanente das margens de cursos de água**: Um estudo de caso na bacia do rio Piabanha. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrj, Rio de Janeiro, 2013.

CARVALHO, J. C. et al. HIDROSAT – Sistema integrado para gerenciamento, processamento e difusão de dados hidrológicos obtidos a partir de monitoramento por satélites. In: XXI Simpósio Brasileiro de recursos hídricos - Segurança hídrica e desenvolvimento sustentável desafios do conhecimento e da gestão, 11., 2015, Brasília - Df. **Anais...** Brasília, 2015.

CARVALHO, R. C., MAGRINI, A. Conflicts over Water Resource Management in Brazil: A Case Study of Inter-Basin Transfers. **Water Resources Management**, n.20, pp.193-213, 2006.

CHAVES, H. M. L., ROSA, J. W. C., VADAS, R. G., OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, pp. 43-51. 2002,

CHIAPPORI, D. V. **Avaliação da Geração de Energia Elétrica na Bacia do Rio Piabanha em Relação aos Usos Múltiplos da Água**. 2015. 179 f. Dissertação - Mestrado em Engenharia Civil, Ufrj, Rio de Janeiro, 2015.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. **Hidrología Aplicada**. 2 ed. Bogotá, McGraw-Hill Interamericana, S.A. 1994.

CHOW, V.T. Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. **Engineering Experiment Station Bulletin**, n.462, 1962.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York. McGraw-Hill. 570 p., 1988.

COHN, J. M. Modelagem de escoamento superficial com base no hidrograma Tempo-Área Geoprocessado. 2014. 132 f. Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil, Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

COLLISCHONN, W.. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. 6. ed. Rio Grande do Sul: Iph Ufrgs, 2008. 274 p.

COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia. Projeto EIBEIX-I: Estudos Integrados de Bacias Experimentais – Parametrização Hidrológica na Gestão de Recursos Hídricos das Bacias da Região Serrana do Rio de Janeiro. **Relatório Técnico Parcial 2, Chamada Pública MCT/FINEP/CT-HIDRO**. COPPETEC-COPPE-UFRJ e IGEO-UFRJ-UERJ-CPRM-SERLA (INEA), 2010.

COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Relatório Contratual R-7 PSR-010-R0**, ANA, LabHid COPPE/UFRJ, Fundação COPPETEC, 2006.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da **Sub-bacia 58. Relatórios Síntese de Regionalização de Vazões, 2002**.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Isoietas Médias Anuais de 1977 a 2006 na escala 1:5.000.000**. In: Atlas Pluviométrico do Brasil. Maceió. CD, 2011

DARIANE, A. B.; JAVADIANZADEH, M. M.; JAMES, L. D. Developing an Efficient Auto-Calibration Algorithm for HEC-HMS Program. **Water Resour Manage**, [s.l.], v. 30, n. 6, p.1923-1937, 15 fev. 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1260-7>.

DE PAULA, T. P., **Diagnóstico e Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Trecho do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil., 2011.

DEPINÉ, H.; CASTRO, N. M. R.; PINHEIRO, A.; PEDROLO, O. Preenchimento de falhas de dados horários de precipitação utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** (Aceito), 2014

DI BELLO, R. C. **Análise do comportamento da umidade do solo no modelo chuva-vazão SMAP II – versão com suavização hiperbólica: Estudo de caso: região de barreiras na bacia do rio Grande-BA.** *Xf.*, 2005. Dissertação – Mestrado em , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

DIAS, A. S. **Ecologia de epífitas vasculares em uma área de mata atlântica do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Teresópolis, RJ.** *Xf.*, 2009. Dissertação – Mestrado em , IF/UFRRJ, Rio de Janeiro. RJ, Brasil, 2009

DOOGE, J.C.I. Synthetic unit hydrographs based on triangular inflow. Iowa State University, 1956. 103 p. Thesis.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in Environmental Planning.** New York: W.H. Freeman and Company, 1978.

EHLERS, W. **Transpiration efficiency of oat.** *Agronomy Journal*, Madison, v.81, p.810-817. 1989.

EIBEX I - Estudos Integrados em Bacias Experimentais I. **Bacias Experimentais – Parametrização hidrológica - Bacias Representativas 04/2005 (2005-2010),** MCT/FINEP/CT-HIDRO - -COPPEUFRJ, 2010.

EIBEX I - Estudos Integrados em Bacias Experimentais I. **Bacias Experimentais – Parametrização hidrológica.** Bacias Representativas 04/2005 (2005-2010),- MCT/FINEP/CT-HIDRO, 2005.

ELESBON, A. A. A. **Gestão de recursos hídricos: Análises estatísticas multivariadas em suporte à regionalização de vazões e proposta metodológica para avaliação, rearranjo e otimização de redes de monitoramento hidrométrico.** *Xf.* , 2011. Tese – Doutorado em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2011.

ELETROBRÁS (Brasil)- Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrals hidrelétricas.** Rio de Janeiro, BR, 1985b.

EMBRAPA (Brasil). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA (Brasil). **Levantamento pedológico, vulnerabilidade e potencialidade ao uso das terras: quadrículas de Silva J.** [s. L.]: Embrapa Solos, 2001. 221 p.

EMBRAPA (Brasil). **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ).** Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **Hot issues: water scarcity**. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/issues/scarcity.html>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

FELICIDADE, N., MARTINS, R. C., LEME, A. A., "A água como valor social". In: Felicidade, N., Martins, R. C., Leme, A. A. (eds), **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil**. 1ed., capítulo 1, São Carlos, SP, Brasil, RiMa, 2001.

FERNANDES, M.C. **Desenvolvimento de rotina de obtenção de observações em superfície real: uma aplicação em análises geoecológicas**. 256 p., 2004. Tese - Doutorado em Geografia, IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FILL, H. D. Informações hidrológicas. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo, Nobel/ABRH, p. 95- 210, 1987.

FIOREZE, A. P., OLIVEIRA, L. F. C., FRANCO, A. P. B. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 3, n. 2, pp.62-76, 2008.

FNMA - INSTITUTO ECOTEMA. **Zoneamento Ambiental da APA Petrópolis**. Petrópolis, 451p., 2001.

FRANCHINI, M., SUPPO, M. Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. *Water Resource Management*, v. 10, pp. 199-218, 1996.

FRANCISCO. C. N., **Subsídios à gestão sustentável dos recursos hídricos no âmbito municipal: O caso de Angra dos Reis, RJ**. Tese D.Sc. GEOQUÍMICA/UFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.,2004

FRANCISCO. C. N., CARVALHO, C. N. Avaliação da sustentabilidade hídrica de municípios abastecidos por pequenas bacias hidrográficas: O caso de Angra dos Reis, RJ. **1º Congresso Acadêmico sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro. Anais...** RJ, Dezembro. 2004.

FUNKHOUSER, J.E., ENG, K., MOIX, M.W. Low-flow characteristics and regionalization of low-flow characteristics for selected streams in Arkansas: U.S. **Geological Survey Scientific Investigations Report**, Virginia, , 2008.

GALÉA, G.; MIC, R.; GHIOCA, M.. Modélisation statistique des modules annuels et des étiages du bassin roumain du Timis-Bega, similitudes régionales avec la Moselle française. **Revue Des Sciences de L'eau**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.71-88, 2007. Doi: <http://dx.doi.org/10.7202/015738ar>.

GARCÍA, A. et al. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 356, n. 3-4, p.312-326, jul. 2008. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.019>.

GAUTAM, N. P. Flow routing with Semi-distributed hydrological model HEC- HMS in case of Narayani River Basin. **Journal Of The Institute Of Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.45-58, 31 jul. 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.3126/jie.v10i1.10877>.

GAUTAM, Narayan Prasad. Flow routing with Semi-distributed hydrological model HEC- HMS in case of Narayani River Basin. **Journal Of The Institute Of Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.45-58, 31 jul. 2014. Nepal Journals Online (JOL). <http://dx.doi.org/10.3126/jie.v10i1.10877>.

GIBSON, C. C.; OSTROM, E.; AHN, T. K.. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey, **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 32, p. 217-239, 2000.

GOBIERNO VASCO. I. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (Org.). **Estudio de Evaluación de los Recursos Hídricos totales en el ámbito de la CAPV**. País Vasco: Dirección de Águas, 2003. 242 p.

GOMES, Tiago Filipe Guimarães. **Aplicação de uma ferramenta de modelação hidrológica em contínuo na gestão de recursos hídricos em zonas urbanas**. 2008. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008.

GONÇALVES, R. C. **Modelagem Hidrológica do tipo chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha/RJ**. Xf., 2008. Dissertação – Mestrado em, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

GUERRA, A. J. T., GONÇALVEZ, L. F. H., LOPEZ, P. B. M. Evolução Histórico-Geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.1, pp. 35-43, 2007

HARDEN , C. P.; SCRUGGS, P. D. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* [S.l.], v. 55, p. 5-24, 2003.

HEC - Hydrologic Engineering Center. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual**. California: U.s. Army Corps Of Engineers, 2000. 155 p.

HEC - Hydrologic Engineering Center. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Manual do usuário**. 4. ed. Washington Dc: U.s. Army Corps Of Engineers, 2013. 442 p.

HEC Hydrologic Engineering Center. **HEC-GEOHMS 10.1: HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. 10.1** ed. Davis, California: Us Army Corps Of Engineers, 2013. 193 p. Disponível em: <www.hec.usace.army.mil>. Acesso em: 11 dez. 2014.

HERING, J. G.; INGOLD, K. M.. Water Resources Management: What Should Be Integrated?. **Science**, [s.l.], v. 336, n. 6086, p.1234-1235, 7 jun. 2012.

HORTON, R. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. New York: Geological Society of American Bulletin, 1945. v.56. p. 807-813.

HORTON, R.E., 1933. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. Trans. Amer. Geoph. Union, 14: 446-460.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010 - Resultados definitivos**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/RJ2010.pdf> Acesso em: 28 Agosto 19:44:00.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto dos municípios - 2005-2009**. 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2005_2009/pibmunic2005_2009.pdf> Acesso em 30 Agosto 15:47:00.

IBRAHIM, H. **Development soil parameters for hydrologic modelling upper Sungar Muar**.2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia, 2010. Disponível em: <<http://eprints.utm.my/15310/1/HabibilbrahimMFKA2010.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

INPE. **TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 12 dez. 2014.

KIM, S. H. et al. Balancing global water availability and use at basin scale in an integrated assessment model. **Climatic Change**, [s.l.], v. 136, n. 2, p.217-231, 22 jan. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1604-6>.

KIM, U., KALUARACHCHI J. J. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. **Jornal of Hydrology**, n. 362, pp. 39 – 56, 2008.

KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **Journal of Civil Engineering**, v.10, n.6, 1940.

KLING, A.S.M. **Aplicação do Método Battelle na avaliação do impacto ambiental na bacia hidrográfica do rio Piabanha**. Xf., 2005. Dissertação – Mestrado em Ciências da Área de Saúde Pública da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca. FIOCRUZ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

LAWALL, S., **Modificações na hidrologia dos solos em resposta às alterações de uso e cobertura na bacia hidrográfica do Bonfim, Região Serrana do Rio de Janeiro**. XXIII, 197 p. Dissertação de Mestrado em Geografia. Instituto de Geociências (IGEO). UFRJ. Rio de Janeiro. 2010

LEE, R. **Forest Hydrology**. [s. L.]: Columbia University Press, 1980. 349 p.

LENCASTRE, A. E FRANCO, F. M., 1984, Lições de Hidrologia. Lisboa: Ed. FCT, Universidade Nova de Lisboa. 451p.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia Florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2008. 253 p.

LIMBRUNNER, J. F., VOGEL, R. M., CHAPRA, S. C., A parsimonious watershed model. In: Singh, V. P., Frevert, D. F. (eds), **Watershed Models**, Capítulo 22, Colorado, USA, CRC Press, 2005.

LOU, R.F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. Xf., 2010. Dissertação – Mestrado em, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

MACHADO, F. W. **Modelagem chuva-vazão mensal, utilizando Redes Neurais Artificiais**. Xf. , 2005. Dissertação – Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental, UFP, Curitiba, PR, Brasil, 2005.

MAMUN, A. A.; HASHIM, A.; DAOUD, J. I.. Regionalisation of low flow frequency curves for the Peninsular Malaysia. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 381, n. 1-2, p.174-180, fev. 2010. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.039>.

MANZIONE, R. L. Incorporação de incertezas associadas à predições de modelos hidrológicos aos instrumentos de gestão em Recursos Hídricos. **Cpg Caderno Prudentino de Geografia: Seção local Presidente Prudente**. Presidente Prudente, Sp, 05 fev. 2014. p. 215-227. Disponível em: <<http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/viewFile/2647/2673>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

MARCUZZO, F. F. N.; MELATI, M. D. Densidade de estações fluviométricas com descarga líquida na sub-bacia da Lagoa dos Patos segundo os critérios da Organização Mundial de Meteorologia. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbsr, 2015. p. 310 - 317.

MAYS, L.W.; TUNG, Y-K. (1992). Hydrosystems engineering and management. McGraw-Hill Inc., New York, 1992, 530 pp.

MCCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.110, n.7, p. 887-904, 1984.

MEHAIGUENE, M., MEDDI M., LONGOBARDI, A., TOUMI, S. Low flows quantification and regionalization in North West Algeria, **Journal of Arid Environments**, n. 87 (jul), pp. 67-76, 2012.

MELO NETO, J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. Xf. 2012. Dissertação - Mestrado em Recursos Hídricos, Universidade de Lavras, Lavras, Minas Gerais. 2012

MENEZES, P. M. L; COELHO NETTO, A. L. "Escala: Estudo de Conceitos e Aplicações". In: **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**, Recife, CD

MIOTO, C.I. et al. Morfometria de Bacias Hidrográficas Através de SIGs Livres e Gratuitos. **Anuário Igeo Ufrj**, [s.l.], v. 372, n. 2, p.16-22, 28 nov. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_16_22.

MITCHEL DUTRA, R. M., SPERANDIO, M. ; COELHO, J. « O Método WARD de Agrupamento de Dados e sua Aplicação em Associação com os Mapas Auto-Organizáveis de Kohonenp . In: I WorkComp Sul - Workshop de Ciências da Computação e Sistemas da Informação da Região Sul. **Anais...** UNISUL, Florianópolis, 2004.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/água/recursos-hidricos/água-subterraneas/ciclo-hidrologico>> . Acessado em: 2015.

MODARRES, R.; SARHADI, A.. Statistically-based regionalization of rainfall climates of Iran. **Global And Planetary Change**, [s.l.], v. 75, n. 1-2, p.67-75, jan. 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.10.009>.

MOLINARI, B. S. **Modelagem espacial da qualidade de água na bacia do rioPiabanha/RJ**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R. J., Brasil.,2015

MOREIRA, D. M., ARAUJO, L. M. N., ALMEIDA I. S. Apoio Cartográfico a Estudos Hidrológicos Utilizando Ferramentas de Geoprocessamento. In XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. **Anais...** 1 CD-ROM.

MOREIRA, M. C. **Gestão e planejamento dos recursos hídricos: Regionalização de vazões e proposição de índices para identificação de conflitos pelo uso da água.** Xf., 2010. Tese – Doutorado em Engenharia Ambiental, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2010.

MORGAN M. G.; HENRION M. **Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis.** 6. ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

NAGHETTINI, M. PINTO, E.J.de A. **Hidrología Estadística**, 1ed, Belo Horizonte, MG.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. **J. Hydrol.**, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.

NERC, Flood Studies Report. V. 1: **Hydrological studies.** Natural Environmental Research Council, London, 1975.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de Sensores Orbitais e a metodologia Sebal na bacia do rio São Francisco.** 2008. 337 f. Tese – Doutorado em Engenharia Civil, Ufrj, Rio de Janeiro, 2008.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**, 2ed., IBGE, Rio de Janeiro, 1989.

NOVAES, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. Xf., 2005. Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2005.

OELKERS, E. H.; HERING, J. G.; ZHU, C.. Water: Is There a Global Crisis?. **Elements**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.157-162, 1 jun. 2011.
DOI:<http://dx.doi.org/10.2113/gselements.7.3.157>

OLIVERA, Francisco. Extracting hydrologic information from spatial data for HMS Modeling. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [s. L.], v. 6, n. 6, p.534-530, 27 jul. 2001.

OMM – Organização Meteorológica Mundial. **Observando o Meio Ambiente: tempo, clima e água**, OMM, 1994.

PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. Xf., 2004. Tese – Doutorado em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2004.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p.301-307, mar. 2001.

RAMEH, I. M., FREITAS, V. A. L., CIRILO, J. A. A importância da escolha das variáveis explicativas na regionalização de vazões em áreas com escassez de dados. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...** Curitiba, 2003.

RANGEL, E. B. **Simulação do escoamento com o modelo NAVMO e regionalização hidrológica no sistema Piranhas/PB-AÇU/RN**. Xf., 2009. Dissertação – Mestrado em, CTRN /UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2009.

RAZMKHAH, H. et al. Rainfall-Runoff modeling considering Soil Moisture Accounting algorithm, Case study: Karoon III river basin. **Water Resources**, [s. L.], v. 43, n. 4, p.699-710, jul. 2016.

RAUDKIVI, A. J. **Hydrology**: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. Oxford: Pergamon Press Ltd. 1979. 471 p

RENNÓ, C. D., SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 2000.

RIBEIRO NETO, A. et al. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio UNA em Pernambuco: Simulação hidrológica - hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos: RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p.394-403, abr. 2015. Trimestral.

RIBEIRO, C. B. M., MARQUES, F. A., DA SILVA, D. D. **Estimativa e Regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce**. *Engenharia na Agricultura*, v.13, n. 2, pp. 103-117, 2005.

RIBEIRO, G. Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte: tempo de concentração. **Revista do Clube de Engenharia**, n. 294, p. 16-19, 1961.

RODRIGUES, R. G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. Tese – Doutorado em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2008.

ROTTUNNO FILHO, O. C., Modelo hidrológico e sensoriamento remoto. In: Magrini, A., Dos Santos, M. A. (eds), **Gestão ambiental de bacias hidrográficas**, Capítulo I – Parte III, Rio de Janeiro, BR, COPPE-UFRJ, 2001.

SALAS, J.a. Jimenez; ALPAÑES, J.I. de Justo. **Geotecnia y cimientos.I.propiedades de suelos y de rocas**. 2. ed. [s. L.]: Rueda, 1996. 498 p.

SALEH, Arekhi; GHOBAD, Rostamizad; NOREDIN, Rostami. Evaluation of HEC-HMS Methods in Surface Runoff Simulation: Case study: Kan Watershed, IRAN. **Advances In Environmental Biology**, [s. L.], v. 6, n. 5, p.1316-1321, 2011

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**, 167f, 2009. Tese de doutorado – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. **Atmospheric Science Letters**, [s.l.], v. 16, n. 3, p.185-192, 16 set. 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/asl2.535>.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos - hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n.3, pp. 1-19, 2009.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SARAIVA I. S., **Regionalização de parâmetros de modelos de simulação hidrológica**. Xf., 2010. Dissertação – Mestrado em Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.

SEA. Zoneamento Ecológico Econômico. **Análise e Qualificação Sócio-ambiental do Estado do Rio de Janeiro (escala 1:100.000): subsídios ao ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico**. Vol. 03. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.semadur.rj.gov.br/download_ze/Relatorio%204/ZEE-RJ%20Relatorio%2004.pdf>. Acesso em 25 de jul. 2012, 14:13:25

SETTI, A. A., LIMA J. E. F. W., CHAVES, A. G. M., PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos**. 2ed, Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001.

SILVA JÚNIOR, O. B., BUENO, E. O., TUCCI, C. E. M., CASTRO, N. M. R., 2003, Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n. 1, pp. 21-37, 2003.

SILVA, M. M. G. T. de; WEERAKOON, S. B.; HERATH, Srikantha. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal Of Hydrologic Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 4, p.800-806, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000846](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000846).

SILVA, P. V. R. M. **Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no rio Piabanha/RJ**. 2013. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, PEC, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, R. V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do rio Pequeno – PR**.Xf., 2005. Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola, UFSC, Florianópolis, PR, Brasil, 2005.

SILVEIRA, A. L. L., SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: Paiva, J. B. D., Paiva, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p 125-164, 2001.

SILVEIRA, A.L.L. Performance of time of concentration formulas in urban and rural basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, p.5-23, 2005.

SILVEIRA, G. L. **Quantificação de vazão em pequenas bacias com carência de dados fluviométricos**. Xf., 1997. Tese – Doutorado em ,IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil,1997.

SINGH, W. R.; JAIN, M. K. Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. **Journal Of Water Resource And Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.398-408, 1 out. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5963/jwrhe0404011>.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R.M. E FOUFULA-GEORGIOU, E. Regionalization, in Maidment, D.R. (ed): **Handbook of Hyddrology**. New York, McGraw-Hill, p 18.33-18.66. 1992.

SOUSA, R. M. **Estimativa de vazões mínimas na bacia do altíssimo rio Negro, região Sul-Brasileira, com aplicação do modelo SWAT**. Xf., 2011. Dissertação – Mestrado em Geografia, UFP, Curitiba, PR, Brasil, 2011.

STEYAERT, L.T. A perspective on the state of environmental simulation modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, 1993.

SUPE, M. S.; TALEY, S. M.; KALE, M. U.. Rainfall - Runoff Modeling using HEC HMS for Wan river basin. **International Journal Of Research In Engineering: Science and Technologies (IJESTs) Civil Engineering**, [s. L.], v. 1, n. 8, p.21-29, dez. 2015.

THYER, M.; KUCZERA, G.; BATES, B. C. (1999). "Probabilistic optimization for conceptual rainfall – runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms". *Water Resources Research* 35(3), pp. 767-773.

TONELLO, K. C. et al. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das pombas, Guanhães - MG1. **Revista árvore: Journal of Brazilian Forest Science**, Minas Gerais, v. 30, n. 5, p.849-859, 05 abr. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v30n5/a19v30n5.pdf>>. Acesso em: 5 maio 2015.

TRAMBLAY, Yves et al. Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 380, n. 3-4, p.305-317, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.006>.

TUCCI, C. E. M. (Org.), 2009, **Hidrologia. Ciências e aplicação**. 4. Ed., Porto Alegre, Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP,.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 1 ed., Porto Alegre, Editora da Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização das Vazões**. 1 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS, 2002.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M., **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Capítulo 15, p. 573-619. Porto Alegre, BR, Editora da Universidade – UFRGS, 1993.

USDA, 1972. National Engineering Handbook. Section 4, **Hydrology**. Soil

VEIGA, A. M., MELO, D., MARCUZZO, F. F. N., CARDOSO, M. R. D. Métodos de regionalização de vazões em cotas baixas de referência para o rio Teles Pires na Bacia Amazônica. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...**, Maceió, Alagoas, Brasil, 2011.

VERMA, A. K.; JHA, M. K.; MAHANA, R. K.. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. **Paddy And Water Environment**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.131-144, 3 dez. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-009-0192-8>.

VEZZA, P., COMOGLIO, C., ROSSO, M., VIGLIONI, A. Low Flows Regionalization in North - Western Italy. **Water Resour Manage**, v.24, pp.4049–4074, 2010.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p

VIOLA, H. **Gestão de águas pluviais em áreas urbanas – o estudo de caso da cidade do Samba**. Xf., 2008. Dissertação – Mestrado em , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,2008.

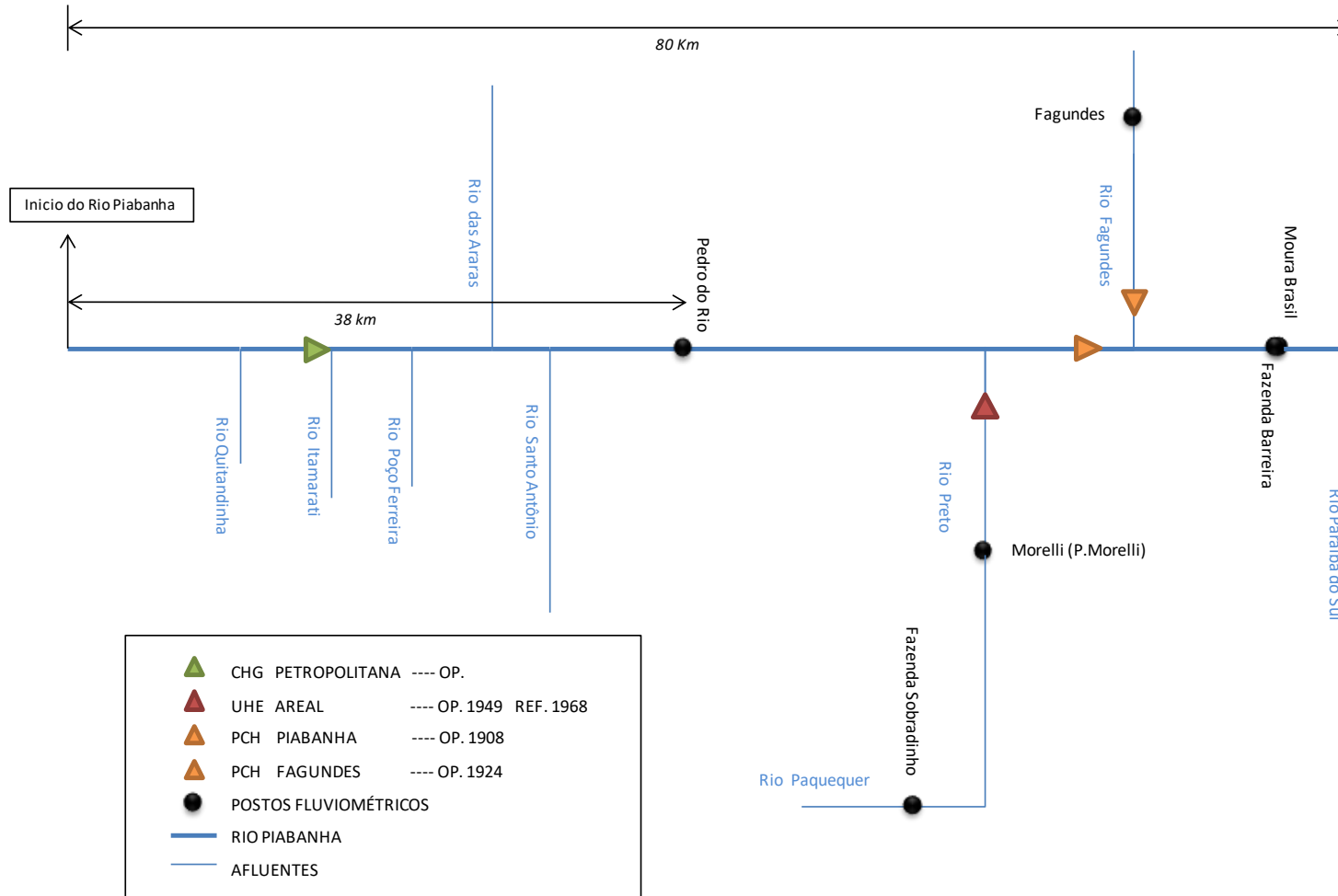
WARD, J. H., Jr. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, **Journal of the American Statistical Association**, 58, 236–244,1963.

ZHANG, H. L. et al. The effect of watershed scale on HEC-HMS calibrated parameters: a case study in the Clear Creek watershed in Iowa, US. **Hydrology And Earth System Sciences**, [s.l.], v. 17, n. 7, p.2735-2745, 15 jul. 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2735-2013>.

APÉNDICE I

**ESTATÍSTICA DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E
FLUVIOMÉTRICAS NA BACIA DO RIO PIABNAHA**

DIAGRAMA UNIFILIAR BACIA DO RIO PIABANHA



ANEXO 1
TAXA DE INFILTRAÇÃO BÁSICA

Dados de autoria, tipo de solo, textura, método, e resultados de TIB – LAWALL (2010)

AUTORES/ LOCALIZAÇÃO	TIPO DE USO	TEXTURA	MÉTODOS	TIB (CM H-1)	ANÁLISE QUALITATIVA
JORDÁN et al. (2008) - Espanha (Mediterrâneo)	Vegetação de altitude	Franco-argilo-arenosa	Indireto - Diferença entre precipitação simulada e escoamento superficial	4.50	Pastagem teve 15% de redução da infiltração com relação a floresta de carvalho e mista
	Floresta de Carvalho	Franco-arenosas		4.63	
	Misto de carvalho e oliveira	Franco-argilosas		3.12	
	Pastagem	Argilo-arenosas		2.93	
BORMAN e KLAASSEN(2008) Alemanha	Floresta temperada	franco-arenosas /	direto - infiltrometro de anel duplo	16.65	Floresta- 20% > agricultura e 120% > pastagem
	agricultura (milho)			12.97	
	pastagem			6.8	
	Floresta temperada	areia franca (estudados dois tipos de solos-com mesmo uso)		33.24	Pastagem 20% > floresta, e 100% maior que agricultura.
	agricultura (milho)			3.12	
pastagem	38.42				
HARDEN e SCRUGGS (2003) Equador - USA - Porto Rico	Equador- Floresta Tropical	franca	Infiltrômetro de anel com simulador de chuva acoplado	0 a 20.6	O máximo visto no Equador foi 100% maior que Porto Rico e EUA
	Porto Rico - Floresta Tropical	argilosa		0 a 10.6	
	EUA- Floresta temperada mista	franco-sitosa		1.6 a 11.7	
ANTONELI e THOMAZ (2009) Brasil (Paraná)	Floresta com araucaria	sem dados	infiltrômetro de anel duplo	2.46	A pastagem teve redução acima de 70% com relação a floresta, reflorestamento, erva-mate e agricultura, e proxima a 50% na capoeira e faxinal
	reflorestamento eucalipto			2.41	
	capoeira			1.80	
	faxinal			1.98	
	erva-mate			2.31	
	agricultura (aveia)			2.80	
	pastagem			0.75	
SOUZA et al (2004) Brasil -Amazônia	Floresta com araucaria	argilosa	infiltrômetro de anel duplo	3.4	A pastagem reduziu em 80% (aprox.) em relação a floresta, seguida da laranja e pupunha. A agricultura (milho) reduziu em 20%.
	capoeira			2.9	
	guaraná			2.7	
	milho			1.8	
	laranja			0.8	
	pupunha			1.0	
	pastagem			0.5	
	EGUCHI e tal (2003) Brasil - Lavras (MG)			pastagem	
COSTENARO et al(2009) Brasil - Viçosa (MG)	Mata- recuperação avançada	franco arenosos	Infiltrômetro de Anel - modelo Turf Tec	117.5	Mata recente regeneração foi 40% menor que a avançada, e mais de 100% com relação a trilha
	Mata - recuperação recente			79.0	
	trilha			20.8	
SILVA et al (2005) Brasil -Alagoas	Mata	argilosa	Método indireto - permeâmetro de carga constante de laboratório	130	Houve redução de 50% da mata para os cultivos com maior infiltração em sistema de vinhaça
	Cana-de-açúcar (sequeiro)			58	
	Cana-de-açúcar (irrigado)			60	
	Cana-de-açúcar (vinhaça)			62	
ZIMMERMANN et al. (2006) Brasil - Rondônia	Floresta	Franco-arenosa	Infiltrômetro de Tensão (hood infiltrometer)	153,3	A pastagem teve TIB 79% menor que a floresta nativa. Da floresta para clareira a redução foi de 10%, banana aprox. 35%, capoeira 45% e replanteio, próximo a 50%
	clareira com pastagem			129,5	
	Banana			111,5	
	capoeira			103,3	
	Teca (<i>T. Grandis</i>) replanteio			83,4	
	pastagem			12,2	