



MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM
GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

WALTER CORRÊA CARVALHO JUNIOR

**ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ALTA PERMANÊNCIA EM BACIAS
COM POUCAS INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA DO RIO COXIPÓ/MT**

Linha de Pesquisa: Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos

Tipo de Produto: Orientação Técnica

PORTO ALEGRE-RS

JANEIRO DE 2019

WALTER CORRÊA CARVALHO JUNIOR

**ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ALTA PERMANÊNCIA EM BACIAS
COM POUCAS INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA DO RIO COXIPÓ/MT**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFAGUA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^o Dr. André Luiz Lopes da
Silveira

PORTO ALEGRE-RS

JANEIRO DE 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Carvalho Junior, Walter Corrêa
Estimativa de vazões de alta permanência em bacias
com poucas informações hidrológicas: Estudo de caso da
bacia do rio Coxipó/MT / Walter Corrêa Carvalho
Junior. -- 2019.
100 f.
Orientador: André Luiz Lopes da Silveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Estimativa de vazões com alta permanência. 2.
Bacias com dados escassos. 3. Método Silveira. I.
Silveira, André Luiz Lopes da, orient. II. Título.

WALTER CORRÊA CARVALHO JUNIOR

ESTIMATIVA DE VAZÕES DE ALTA PERMANÊNCIA EM BACIAS COM POUCAS
INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO
COXIPÓ/MT

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFAGUA), pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovado em: Porto Alegre/RS, 23/01/2019.

Orientador: Prof^o Dr. André Luiz Lopes da Silveira (IPH/UFRGS)

Banca Examinadora:

Prof^o Dr. Carlos André Bulhões Mendes (IPH/UFRGS)

Prof^o Dr. Fernando Dornelles (IPH/UFRGS)

Trecho da conversa entre Alice e o Gato

- Você pode me ajudar? Disse Alice.
- Sim, pois não? Responde o gato.
- Para onde vai este caminho? Indaga Alice.
- Depende para onde você quer ir? Retruca o gato.
- Não sei, estou perdida! Exclama Alice.
- Para quem não sabe para onde vai, qualquer caminho serve!!! Finaliza o gato.

Lewis Carrol (1865). Alice no País das Maravilhas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida. Enquanto com saúde seguiremos em frente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Aos meus amados pais pelo apoio familiar e emocional. Norteiam minhas decisões e são minhas referências para toda a vida.

Especial agradecimento a minha mãe, Maria Luiza, a quem devo muito respeito e admiração, a quem dedico este trabalho.

À minha amada esposa Solange, sempre companheira, entusiasmando-me e animando-me. Agradeço seus conselhos... fundamentais. Sou seu fã!

Aos meus tesouros Sofia e Luiza, minhas filhas, luz da minha vida e motivo para que eu lute por um mundo melhor... para elas!

À Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT) pelo apoio e licença de qualificação concedida. Especificamente aos meus colegas de serviço pela importância da convivência. Cito os nomes: Nédio Carlos, Fernanda Ferreira, Ariane Rodrigues, Everaldo Pina, Rafael de Melo, Ellen Pantoja, Gino Colman, Silbene, Giselle Abadia, Marcio Martins, Cleciani Comelli, Marizeth de Matos, Talita Menezes. É uma dádiva trabalhar com todos. Considero como os melhores “hidrólogos” e “hidrogeólogos” de Mato Grosso, quiçá do país, entre os órgãos gestores de recursos hídricos.

Outros colegas de profissão ao qual também devo muito gratidão: Cláudio Barreto, Renato Paschoal, Edilair Adriana, Luiz Henrique Noquelli, Lilian Apoitia e Rafael Poletto.

Ao IPH e a seus professores e funcionários, em especial ao professor Dr. André Luiz Lopes da Silveira, meu orientador e ao professor Dr. Carlos André Bulhões Mendes pela convivência e ensinamentos de vida. Para mim, é uma honra ter contato com todos do IPH.

Agradeço ao Me. José Pedro Garcia da Rocha, do Departamento de Engenharia Sanitária da Universidade Federal de Mato Grosso (DESA/UFMT) pela disponibilidade dos dados que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Ibraim Fantin da Cruz, também da DESA/UFMT, pelo apoio técnico e amizade, fundamentais no início do trabalho. Foram essenciais para motivação à continuidade da pesquisa.

Ao professor Me. Rafael Pedrollo de Paes também da DESA/UFMT, pelo companheirismo e amizade. Nossas conversas sempre resultam em “chuva de ideias”.

Ao Centro Universitário de Várzea Grande (UNIVAG) pelo apoio. Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Civil do UNIVAG em nome do Coordenador do Curso Alexandre de Oliveira, pois sempre me deram apoio e incentivo a não desistir da caminhada.

Um imenso agradecimento ao professor Dr. Eldemir Pereira de Oliveira, também do corpo docente do UNIVAG e meu amigo, pelo apoio e companheirismo, sempre com palavras de motivação.

A Agência Nacional de Águas (ANA) também pelo apoio, principalmente dos técnicos com altíssimo gabarito. Uma especial gratidão ao prof. Dr. Bruno Collischonn, especialista em recursos hídricos da ANA, que sempre foi muito atencioso mesmo nas dúvidas mais triviais e ao qual tenho grande admiração.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho. Todas as pessoas com quem convivo têm parcela nele. Que Deus nos abençoe sempre e... “vamo que vamo”.

Acknowledgement¹

The data used in this study were acquired as part of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The algorithms were developed by the TRMM Science Team. The data sets and related data products and services are provided by NASA's Distributed Active Archive Centers (DAACs), which are parts of NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) managed by NASA's Earth Science Data and Information System (ESDIS) project. TRMM is an international Project jointly sponsored by the Japan National Space Development Agency (NASDA) and the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Sciences.

¹ Este reconhecimento é solicitado pela NASA's Earth Science Enterprise (ESE) quando do uso de seus produtos, incluindo do TRMM.

RESUMO

Mesmo após vinte anos da promulgação da Política Nacional de Recursos Hídricos, existe dificuldade de gerenciamento em bacias hidrográficas com pouca ou nenhuma informação hidrológica, infelizmente ainda é uma realidade nacional, principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste. Uma possibilidade de sanar esta deficiência é a realização de modelagens hidrológicas do tipo chuva-vazão, então, neste trabalho buscou-se analisar critérios e cenários para realizar a simulação de vazões de alta permanência se utilizando do Método Silveira (*MS*). Buscou-se uma bacia de médio porte com área de até 1000 km² com disponibilidade de dados hidrológicos, para realizar simulações e comparação com os dados reais observados. Os critérios de utilização são baseados em protocolos existentes e, através de cenários de entrada dos dados necessários à modelagem, se deu a identificação das melhores técnicas em função da exatidão dos resultados e facilidade de aquisição dos dados. Os três critérios e cenários se mostraram eficientes dentro de suas particularidades. Vale salientar que diante da situação nacional de carência de dados hidrológicos, não se deve menosprezar nenhum dos cenários de utilização de precipitação e evapotranspiração. Referente a exatidão nos resultados, por ordem de eficiência, estão os cenários que utilizam: dados monitorados em campo por estação climatológica; média de precipitação de estações pluviométricas na bacia hidrográfica; e dados de chuva estimada por satélite. O *MS* é aplicável e recomendável como ferramenta complementar ao planejamento de recursos hídricos, em que fornece informações relevantes e condizentes à situação local da bacia hidrográfica. Destaca-se que o grande mérito do *MS* é ser uma modelagem célere e robusta o suficiente para possibilitar melhorias na gestão de recursos hídricos, ou seja, é uma modelagem simples, porém funcional.

Palavras-chave: Estimativa de vazões com alta permanência, bacias com dados escassos, Método Silveira.

ABSTRACT

Even after twenty years of promulgation of the National Water Resources Policy, there is management difficulty in watersheds with little or no hydrological information, unfortunately it is still a national reality, mainly in the North and Central-West regions. One possibility to remedy this deficiency is to perform hydrological modeling of the rainfall-flow type, so, in this work we sought to analyze criteria and scenarios to perform the simulation of high-permanence flows using the Silveira Method (MS). A medium-sized basin with an area of up to 1000 km² was searched, with hydrological data available, to perform simulations and comparison with actual observed data. The use criteria are based on existing protocols and, through the input scenarios of the data needed for the modeling, the best techniques were identified based on the accuracy of the results and the ease of data acquisition. The three criteria and scenarios were efficient in their particularities. It is worth noting that in view of the national situation of lack of hydrological data, none of the scenarios for the use of precipitation and evapotranspiration should be overlooked. Regarding the accuracy in the results, in order of efficiency, are the scenarios that use: data monitored in the field by climatological season; average precipitation of rainfall stations in the hydrographic basin; and estimated rainfall data by satellite. The MS is applicable and recommended as a complementary tool to water resources planning, in which it provides information relevant to and consistent with the local situation of the river basin. It should be emphasized that the great merit of the MS is to be a model that is fast and robust enough to allow improvements in the management of water resources, that is, it is a simple but functional modeling.

Keywords: Estimation of flows with high permanence, basins with scarce data, Silveira Method.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 HIPÓTESES	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 O MÉTODO SILVEIRA	23
2.2 PARÂMETROS DO MODELO E DADOS DE ENTRADA	25
2.2.1 O Coeficiente C _{inf}	26
2.2.2 O Parâmetro K _{sub}	26
2.2.3 Média de precipitação na bacia	29
2.3 O <i>SOFTWARE SISPB</i>	30
2.4 PROTOCOLOS EXISTENTES	31
2.5 METODOLOGIAS APLICADAS A PEQUENAS BACIAS COM POUCAS INFORMAÇÕES (<i>PREDICTION UNGAUGED BASINS - PUB</i>)	33
2.6 ESTIMATIVA DE VAZÕES EM BACIAS COM POUCAS INFORMAÇÕES NO BRASIL	34
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	37
3.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO	37
3.2 USO E OCUPAÇÃO NA BACIA	40
3.3 CARACTERIZAÇÃO FLUVIOMORFOLÓGICA	44
3.4 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA	46
3.5 SELEÇÃO DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS E DE EVAPORAÇÃO	49
3.6 MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO DISPONÍVEL	51
4. METODOLOGIA	54
4.1 ÁREA DE ESTUDO	55
4.2 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO	56

4.2.1	Pluviometria	56
4.2.2	Média de precipitação na bacia	59
4.2.3	Dados de evaporação ou evapotranspiração	61
4.2.4	Dados de satélite	62
4.3	CRITÉRIOS E CENÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	64
4.2	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO	66
5.	RESULTADOS	67
5.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	70
5.1.1	Resultados do Critério 1 (C1)	70
5.1.2	Resultados do Critério 2 (C2)	75
5.1.3	Resultados do Critério 3 (C3)	79
5.2	ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM	84
5.3	COMPARAÇÃO DA VAZÃO SIMULADA E VALORES ADOTADOS PELO ÓRGÃO GESTOR DE RECURSOS HÍDRICOS	88
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
7.	ORIENTAÇÕES TÉCNICAS	92
8.	REFERÊNCIAS	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características fisiográficas da bacia do rio Coxipó	45
Quadro 2. Características climatológicas da região de Cuiabá.	46
Quadro 3. Características das estações pluviométricas estudadas.....	49
Quadro 4. Totais anuais de precipitação e disponibilidade temporal.	58
Quadro 5. Pesos de cada posto pluviométrico pelo Método de Thiessen.....	59
Quadro 6. Evapotranspiração de referência mensal e evaporação real mensal para Cuiabá-MT.	62
Quadro 7. Resumo dos critérios definidos para realizar a simulação.....	69
Quadro 8. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C1.....	72
Quadro 9. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C1.....	73
Quadro 10. Estatísticas quanto à variação dos parâmetros C _{inf} e K _{sub} para o Critério 1.....	74
Quadro 11. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C2.....	77
Quadro 12. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C2.....	77
Quadro 13. Estatísticas quanto à variação dos parâmetros C _{inf} e K _{sub} para o Critério 2.....	78
Quadro 14. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C3.....	81
Quadro 15. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C3.....	82
Quadro 16. Estatísticas quanto à variação dos parâmetros C _{inf} e K _{sub} para o Critério 3.....	83
Quadro 17. Comparação entre os resultados das simulações e valor da Regionalização de Vazão de Mato Grosso em relação ao valor real monitorado.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico sistêmico completo.....	21
Figura 2. Ciclo hidrológico sistêmico simplificado.....	22
Figura 3. Comportamento do hidrograma perante a interação com a precipitação.	27
Figura 4. Exemplo de resultado da simulação da disponibilidade hídrica no Sispb.	31
Figura 5. Bacia hidrográfica do rio Coxipó.....	38
Figura 6. Mapa de altimetria da bacia do rio Coxipó utilizando o MDE de 30 metros.....	39
Figura 7. Mapa de uso e ocupação dos solos da área de estudo.	41
Figura 8. Comparação do uso e ocupação dos solos da área de estudo entre os anos 1988, 2000 e 2010.	42
Figura 9. Distribuição espacial dos solos na área de estudo.....	43
Figura 10. Classes de declividade na bacia do rio Coxipó.	45
Figura 11. Valores médios mensais de precipitação e evaporação na região de Cuiabá.....	47
Figura 12. Isoietas de precipitação para o Estado de Mato Grosso.....	48
Figura 13. Espacialização das estações pluviométricas analisadas.	50
Figura 14. Disponibilidade temporal dos postos pluviométricos na região de estudo.	51
Figura 15. Série de vazões e curva de permanência para o rio Coxipó.....	52
Figura 16. Gráfico box-plot para vazões do rio Coxipó.....	52
Figura 17. Histograma de frequência para o rio Coxipó e resumo das estatísticas descritivas.....	53
Figura 18. Página do <i>Site Earth Explorer</i> do USGS com a área do MDE selecionada.	55
Figura 19. Distâncias dos postos até o ponto de monitoramento de vazão no rio Coxipó.....	59
Figura 20. Áreas de influência dos Postos Pluviométricos na bacia do rio Coxipó e isoietas de precipitação em mm/ano.....	60
Figura 21. Página do <i>Giovanni</i> NASA e sequência para obtenção de dados de satélite.....	63
Figura 22. Quadriculas de monitoramento pelo satélite TRMM da NASA.....	64
Figura 23. Diagrama em caixa (box-plot) explicado.....	66
Figura 24. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 1.....	71
Figura 25. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 2.....	75
Figura 26. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 3.....	80

Figura 27. Exemplo 1 de resultados das simulações	86
Figura 28. Exemplo 2 de resultados das simulações	87
Figura 29. Erro padrão do modelo pelos resíduos da simulação	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARCGIS	<i>Software</i> de Informação Geográficas
BDMEP	Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do INMET
CAPES	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior do Governo Brasileiro
CMORPH	<i>Climate Prediction Center Morphing Technique</i> , modelo climático
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DESA/UFMT	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMT
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, atual ANEEL
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FAOCLIM	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IAHS	<i>International Association of Hydrological Sciences</i>
IDNR	<i>Illinois Department of Natural Resources of USA</i>
IDW	Método do Inverso do Quadrado da Distância
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFGRS
IPH-2	Modelo Hidrológico Chuva-Vazão do IPH
LUCA	<i>Let Us Calibrate</i> , <i>software</i> complementar para calibração de modelos hidrológicos
MATLAB	Linguagem computacional <i>Matrix Laboratory</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGB-IPH	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
MS	Método Silveira, modelo hidrológico
NASA	<i>North-American Aerospace Agency</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PBIAS	Porcentagem de erro do valor simulado em relação ao valor observado
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

PUB	<i>Prediction Ungauged Basins</i> , predição de vazão em bacias sem dados
PROFÁGUA	Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
SCE	<i>Shuffled Complex Evolution</i> , algoritmo para calibração de modelo hidrológico
SEMA/MT	Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Mato Grosso
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIMLAM	Sistema de Monitoramento e Licenciamento Ambiental da SEMA/MT
SISPB	Sistematização da metodologia de estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias da ANA
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i> , modelagem hidrológica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> da NASA
SWAT	<i>Soil & Water Assessment Tool</i> , modelagem hidrológica
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> , satélites da NASA
TH	Método do Polígono de Thiessen
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
USA	<i>United States of America</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

1. INTRODUÇÃO

Conforme Bloschl *et al.* (2013) *apud* Horn (2016) a carência de dados é um problema a nível mundial que tem mobilizado diversos pesquisadores a tentarem solucionar esta problemática da hidrologia, ou seja, o preenchimento de lacunas de séries de vazões monitoradas por séries geradas por meio da utilização de modelos matemáticos.

A Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS – *International Association of Hydrological Sciences*) lançou em 2003 a chamada Década IAHS 2003 – 2012, dedicada a Predição em Bacias sem Dados (*Prediction Ungauged Basins* – PUB). O objetivo geral desse programa foi incentivar o meio científico no desenvolvimento de métodos para a determinação de informações hidrológicas em locais com inexistência de monitoramento com a redução das incertezas existentes (ARHEIMER & LINDSTRO, 2013 *apud* HORN, 2016; FRIEDRICH, 2017).

Mesmo após o término da década IAHS 2003 – 2012, ainda se sente a carência de metodologias para pequenas e médias bacias hidrográficas com poucos dados disponíveis ou com total ausência, como se verifica em Comini (2017) e Friedrich (2017). Portanto, necessita-se de uma metodologia simples, porém robusta o suficiente para garantir bons resultados e fomentar o gerenciamento dos recursos hídricos.

A técnica de regionalização hidrológica, que é uma das técnicas mais utilizadas no cenário nacional, requer uma série de vazões observadas de no mínimo cinco anos. Em caso de haver falhas na série, não se recomenda preenchê-las por regressão devido à possibilidade de introduzir alguma tendenciosidade. Já se as falhas ocorrem sempre em períodos do ano de baixas vazões, o posto de observação deve ser descartado, portanto analogamente, não se utiliza postos de observação de vazões que não possuem períodos de pelo menos 5 anos de dados de vazão representativos (TUCCI, 2002). Isto é uma limitação para utilização de postos fluviométricos.

Ainda assim, vários estados brasileiros possuem Estudo de Regionalização para os corpos hídricos estaduais, sendo que, às vezes, o método possui restrições em seu uso como, por exemplo, o Estado de Mato Grosso (SEMA, 2008) que limita a utilização para bacias com menos de 500 km² de área de drenagem.

Diversos autores têm advertido que há a necessidade de maior celeridade no que tange aos processos de licenciamento e outorga do uso da água (SILVEIRA, 1997; CRUZ, 2001; PESSOA, 2010; HORN, 2016). A carência de informações hidrológicas, no entanto, tem dificultado esse equacionamento, pois por um lado há necessidade da tomada de decisão em

um relativo curto espaço de tempo, por outro, não há dados disponíveis para a determinação de variáveis hidrológicas como as vazões de alta permanência de forma eficiente (TUCCI, 2005; BASSO et al, 2016).

Alguns estudos na área de simulação chuva-vazão, como Perrin *et al.* (2001) conforme citado em Horn (2016), concluem que é possível obter resultados aceitáveis de simulações com modelos chuva-vazão simplificados e com amostras reduzidas.

Diante deste cenário, sobressai a Metodologia Silveira (1997), que será denotado apenas como *MS* e será explicitada mais adiante.

Devido às demandas e falta de monitoramento hidrológico é fundamental o estabelecimento da disponibilidade hídrica por uma metodologia simples e célere, mas suficientemente robusta para fomentar a eficiência na gestão dos recursos hídricos.

De maneira geral, há uma lacuna no pleno funcionamento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) mesmo após 20 anos de sua existência, pois boa parte dos instrumentos ainda não foram implementados na sua totalidade como relata Rodriguez (2015) e, mesmo instrumentos já estabelecidos como a Outorga, ainda carece de aprimoramento na estimativa da disponibilidade hídrica, entre outros.

Partindo destes entendimentos, pretende-se analisar a aplicação do Método Silveira (*MS*) em uma bacia de médio porte, comparando dados simulados e observados e, possibilitar uma orientação técnica referente à estimativa de vazão com alta permanência. Destarte este estudo se insere na Linha de Pesquisa 1.2 Instrumentos de Gestão em Recursos Hídricos do PROFÁGUA, pólo IPH/UFRGS, no tema de interesse da Agência Nacional de Águas (ANA): *Desenvolvimento de metodologias de estimativa da disponibilidade hídrica e demandas em locais com poucas informações.*

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Orientar sobre a estimativa de vazão de alta permanência em bacias de médio porte (com área entre 500 km² e 1000 km²) com dados escassos com base na Metodologia Silveira (MS).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Calcular vazões de alta permanência pelo MS considerando critérios estabelecidos em protocolos existentes;
 - Comparar o resultado gerado com o resultado da série de vazões observadas;
 - Verificar a melhor alternativa de entrada de dados em termos de facilidade de acesso e exatidão no resultado, considerando o ingresso das seguintes informações:
 - Precipitação medida por um único pluviômetro situado na bacia e evaporação média na bacia;
 - Precipitação Média calculada pelo Método Combinado (COM) entre os Polígonos de Thiessen e isoietas de precipitação e dados de evaporação na bacia/evapotranspiração de referência;
 - Precipitação Média calculada pelo Método de Ponderação pelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW) e dados de evaporação na bacia/evapotranspiração de referência;
 - Precipitação estimada por satélite e evapotranspiração de referência;
- Verificar a influência da correção do parâmetro K_{sub} nos resultados da modelagem;
- Estabelecer os melhores critérios e cenários de entrada de dados para possibilitar orientações técnicas acerca do uso da modelagem;

1.2 JUSTIFICATIVA

É fato que a escassez de dados hidrológicos repercute diretamente na Gestão dos Recursos Hídricos (SILVEIRA, 1997; CRUZ, 2001; COLLISCHONN, 2006; DA SILVA, 2007; RAVANELLO, 2007; HORN, 2016; FRIEDRICH, 2017).

No Estado de Mato Grosso existe estudo de regionalização hidrológica. Porém, o Estudo de Regionalização de Vazões para o Estado de Mato Grosso não é indicado para bacias hidrográficas menores que 500 km², consideradas bacias pequenas, pois os postos fluviométricos que fundamentaram a regionalização de vazões possuem área de drenagem sempre maior que a referida. Inclusive, este caso é recorrente no cenário nacional.

Porém, também se identifica grandes incertezas quanto a real disponibilidade hídrica em bacias consideradas de médio porte, com áreas de drenagem entre 500 km² e 1000 km².

É notório que devido ao alto grau de burocracia e acúmulo de atribuições dos órgãos gestores, concorrendo com o déficit no número de técnicos necessários ao bom funcionamento da máquina pública, sem mencionar o déficit em qualificação profissional, convive-se com a escassez de tempo e recursos suficientes para realizar uma modelagem mais apurada de aferição da disponibilidade hídrica e possibilitar uma gestão dos recursos hídricos de forma positiva.

Existe também uma dificuldade proeminente de ampliação do monitoramento hidrológico devido à logística. Por exemplo, o Estado de Mato Grosso, que é o 3º maior do país em termos dimensionais e enfrenta repercussões da atual crise financeira, dificultando e até exaurindo possibilidade de ampliação de postos hidrométricos.

Também existem relatos das dificuldades de aquisição de dados de estações fluviométricas, mesmo em áreas com monitoramento relativamente elevado, sendo esta uma limitação forte a aplicação de técnicas de transformação chuva-vazão (PADUA, 2015), sendo que o mesmo se estende-se a dados de precipitações (MELLO et al, 2001; MARCUZZO et al, 2010; EMBRAPA, 2011; BASSO et al, 2016).

Entende-se então que uma alternativa comedida é a aplicação da estimativa de vazões com alta permanência pelo *MS*. É salutar que a metodologia utilizada deva ser consistente e embasada o suficiente para garantir a confiança nos resultados. Neste prisma, nada melhor que uma ancoragem hidrológica local para calibração de um modelo simplificado, mas com uma precisão aceitável dentro dos padrões brasileiros de deficiência em monitoramento hidrológico.

Vale salientar também que em boa parte das bacias hidrográficas não há dados hidrológicos disponíveis na rede fluviométrica oficial, disponibilizada pela ANA. Isto fundamenta a necessidade da aplicação de métodos alternativos para melhorar a aplicação de Estudos de Regionalização.

Identifica-se tecnologias disponíveis para inferência de parâmetros hidrológicos como Modelo Digital de Elevação (MDE) que gera facilmente a área de drenagem, bem como há disponível técnicas de monitoramento por satélite, para estimativa da evapotranspiração e chuva, fato que permite uma relativa rápida aquisição dos dados de entrada de modelos mesmo em locais com total ausência de monitoramento.

Esta é a fundamentação para utilização de metodologias alternativas no enfrentamento do desafio na melhoria na gestão dos recursos hídricos.

1.3 HIPÓTESES

O *MS* como modelagem chuva-vazão originalmente brasileira, pode-se tornar uma alternativa viável para aprimorar o gerenciamento dos recursos hídricos, desde que se fundamente na qualidade dos dados de entrada do modelo quando da utilização por parte dos órgãos públicos.

Neste prisma, têm-se diversas possibilidades de entrada de dados de precipitação e evapotranspiração, podendo ser citado: dados de órgãos oficiais, dados coletados individualmente, estimativa por satélite, valores de referência disponível em bibliografias específicas, dentre outros.

Diante deste cenário e perante a necessidade de agilidade na análise de processos, dar-se-á a seguinte indagação:

Qual(is) melhor(es) procedimento(s) para entrada de dados na modelagem *MS* em termos de exatidão do resultado e facilidade na aquisição dos dados?

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, há grande carência de dados hidrológicos para pequenas bacias. A instalação e coleta de dados tiveram como seu principal agente o setor de geração de energia elétrica. Desta forma, há poucos postos em bacias com menos de 500 km². O monitoramento das pequenas bacias reveste-se, portanto, de fundamental importância para a complementação da rede de informações hidrológicas, além de sua natural vocação para estudo do funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes no ciclo hidrológico (PAIVA et al, 2016). Também se sente esta mesma carência de dados em bacias de médio porte (TUCCI, 2005; BASSO et al, 2016; FRIEDRICH, 2017)

Uma questão apresentada por Padua (2015) é o custo e tempo necessário para que uma dada estação fluviométrica passe a dispor de uma amostra suficientemente grande para produzir estimativas confiáveis de grandezas hidrológicas características de projeto ou gestão, o que por vezes inviabiliza ações na bacia hidrográfica.

Tucci (2009), Silveira (1997) bem como Paiva et al (2016) já analisavam que três alternativas científicas estão freqüentemente disponíveis para estimativa do comportamento hidrológico em uma bacia carente de dados fluviométricos:

- i) regionalização hidrológica, que se vale de informações fluviométricas e climatológicas de postos com dados e informações fisiográficas de bacias da região;
- ii) simulação chuva-vazão que se utiliza de dados climatológicos para transferir parâmetros de modelos chuva-vazão ajustados em bacias próximas; e,
- iii) medidas isoladas de vazão de estiagem no local de interesse e uso de metodologias específicas que as aproveitem.

Os modelos de regionalização de vazões que definem a curva de permanência na forma parametrizada podem provocar erros nas estimativas do ramo inferior da curva, o dos escoamentos menores, embora possa apresentar um bom ajuste global. O uso de modelos do tipo interpolativo minimizam este erro pela estimativa de ponto a ponto da curva no trecho de interesse. (SILVEIRA, 1997)

O mesmo autor identifica que existe alta incerteza associada à regionalização de vazões, sendo fatores limitantes:

1. Pelas diferenças nas escalas espaciais e temporais dos mecanismos de transformação chuva-vazão nas pequenas e grandes bacias;

2. Pelas dificuldades de caracterização de regiões hidrologicamente homogêneas devido às especificidades locais do meio-físico. Quando a área da bacia diminui, baixa a escala de detalhamento, e mais difícil fica a caracterização de regiões homogêneas, ou seja, a heterogeneidade das pequenas bacias é muito grande;
3. Devido à dificuldade de obtenção de dados confiáveis convencionais para as vazões mínimas. Muitas vezes ao priorizar vazões médias e máximas, os segmentos inferiores das curvas-chave dos postos fluviométricos deixam a desejar. A mobilidade do leito é uma das causas destas incertezas.

O Método Silveira avalia a disponibilidade hídrica com base no comportamento da bacia na estiagem, já que o deplecionamento fluvial é retrato do seu comportamento após a ocorrência das precipitações.

Segundo Oliveira (2012), as limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos. Um diagrama esquemático do processo de escoamento da bacia hidrográfica com a escala modelada local é apresentado na Figura 1.

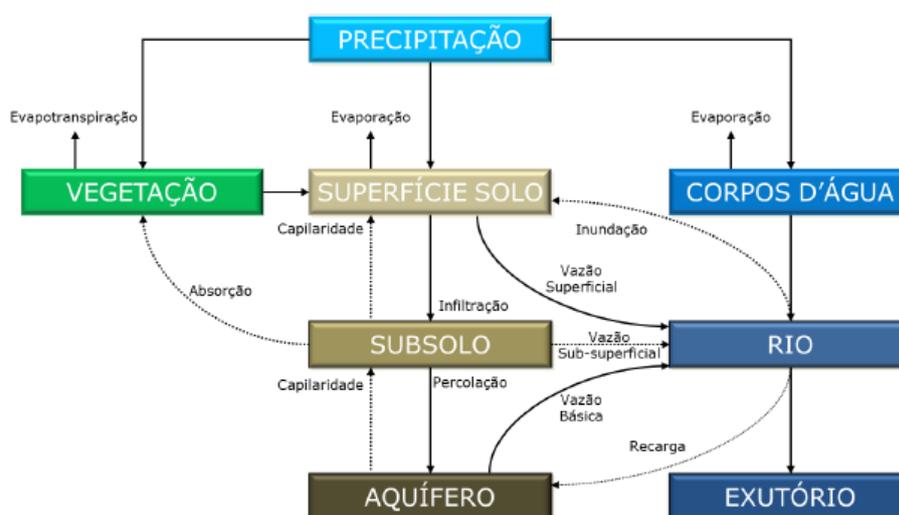


Figura 1. Ciclo hidrológico sistêmico completo. Fonte: OLIVEIRA (2012).

Segundo USACE (2000) *apud* Oliveira (2012), no sistema hidrológico natural, a maioria da água que cai como precipitação retorna para a atmosfera através da evaporação da vegetação, superfície do solo e corpos d'água, e transpiração da vegetação. Durante o evento de uma tempestade, esta evaporação e transpiração estão limitadas.

Alguma precipitação na vegetação cai através das folhas ou desce pelo caule, galhos e troncos para a superfície do solo, aonde se junta à precipitação que caiu diretamente sobre a superfície. A água pode empoeçar e, dependendo do tipo de solo, cobertura do terreno, umidade anterior e outras propriedades da bacia hidrográfica, uma porção pode infiltrar. Esta água infiltrada estará armazenada temporariamente na camada superior do solo parcialmente saturada. De lá, ela sobe novamente para a superfície pela ação da capilaridade, se move horizontalmente como escoamento sub-superficial apenas debaixo da superfície, ou ela percola verticalmente para o aquífero de água subterrânea. O escoamento sub-superficial eventualmente se move para dentro do curso do canal. A água no aquífero se movimenta vagarosamente, mas eventualmente, alguma retorna para o canal como escoamento básico.

A água que não empoça ou infiltra se movimenta pela superfície do solo até o curso do canal. O curso do canal é o ponto de encontro para o escoamento superficial, a precipitação que cai diretamente sobre o corpo d'água, e o escoamento sub-superficial e básico. Assim, o resultado do escoamento no canal é o total da saída da bacia hidrográfica.

Porém nem todas as análises necessitam do detalhamento completo do balanço hídrico na bacia podendo ser omitidos algumas partes do ciclo resultando uma modelagem reducionista (*e.g.* O Método Silveira entende que a movimentação do subsolo para o aquífero é insignificante no tempo de maneira que possa ser desconsiderada além de simplificar a modelagem de infiltração da água no solo a uma calibração do parâmetro C_{inf} e identificar este volume como recarga direta do aquífero) conforme representada na Figura 2.

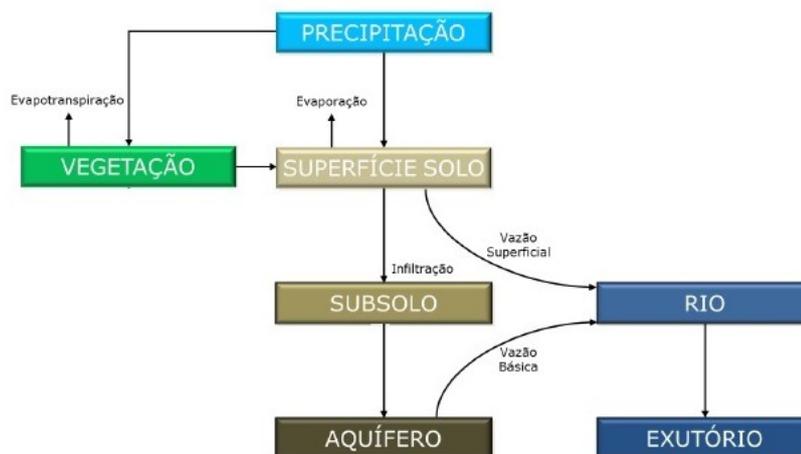


Figura 2. Ciclo hidrológico sistêmico simplificado.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

Mcintyre *et al* (2005) analisam a viabilidade dos modelos chuva-vazão identificando que os erros desconhecidos nos dados de entrada e saída podem impossibilitar a análise do

desempenho do modelo. O problema é agravado pela elevada quantidade de parâmetros do modelo, de modo que uma grande quantidade de conjuntos diferentes leva a resultados quase equivalentes. Lembrando que a incerteza do modelo é inerente ao processo e, portanto, a melhor prática é empregar um conjunto de modelos viáveis para dar um conjunto correspondente de previsões.

De fato, a obtenção dos dados necessários para realizar a modelagem é um obstáculo na sua viabilidade, sendo necessário proporcionar esta aquisição de maneira efetiva. Na sequência será explicitado mais profundamente o Método Silveira (1997).

2.1 O MÉTODO SILVEIRA

Como exemplo de modelagem hidrológica tem-se o *MS* que se trata de uma metodologia de transformação chuva-vazão com uma ancoragem hidrológica baseada em medidas de vazões *in loco*. Esta modelagem hidrológica vem crescendo no cenário nacional devido ainda existir regiões com grande carência de dados hidrológicos, fato que desvia o foco do desenvolvimento da gestão dos recursos hídricos.

Conforme descrito por Friedrich (2017), o ponto fundamental e o mérito do *MS* referem-se ao processo de ajuste-calibração-verificação comumente utilizado nos modelos chuva-vazão. O método não necessita de ajuste – verificação como na maioria dos modelos chuva-vazão, tais como o IPH-2, MGB-IPH, SMAP, SWAT, etc., conforme descrito por Silveira (1997) e observado por Horn (2016), trazendo uma simplicidade e determinante para a expectativa de celeridade na análise de processos de outorga e licenciamento ambiental, ou seja, possibilita a continuidade no processo de fomento à gestão de recursos hídricos, mesmo em locais com poucos dados.

A estratégia desenvolvida por Silveira (1997) foge de uma abordagem convencional dos modelos hidrológicos, os quais necessitam de uma série de vazões observadas para realizar o ajuste-calibração-verificação (HORN, 2016). Além disso, nesse método é necessária a determinação de apenas dois parâmetros, o C_{inf} e o K_{sub} , cujos valores resultam do ajuste da depleção medida ou observada (SILVEIRA, 1997; HORN, 2016).

Conforme descrito em Collischonn e Pante (2011), o *MS* foi proposto para representar o comportamento homogêneo de pequenas bacias em período de estiagem, mas, percebe-se a potencialidade da utilização em bacias consideradas médias, de até 1000 km² de área (HORN, 2016; FRIEDRICH, 2017). Contando com algumas medições de vazão disponíveis, a modelagem chuva-vazão é calibrada para gerar série de vazões com alta permanência. O

modelo é para ser rodado com passo de tempo diário. A modelagem com dados calculados em mm se dá por:

$$P_{liq}(i) = P(i) - E(i) \quad (1)$$

$$V(i) = P_{liq}(i) \cdot C_{inf} \quad (2)$$

$$R(i) = P_{liq}(i) - V(i) \quad (3)$$

$$Q_{base}(i) = Q_{base}(i-1) \cdot e^{-1/K_{sub}} + V(i) \cdot \left(1 - e^{-1/K_{sub}}\right) \quad (4)$$

Sendo,

P_{liq} a precipitação líquida,

P a precipitação monitorada,

E a evaporação monitorada ou evapotranspiração potencial (podendo-se utilizar uma média mensal),

V é o volume infiltrado,

R é o escoamento superficial (runoff),

Q_{base} = vazão de base ou escoamento subterrâneo.

C_{inf} = representa o coeficiente de infiltração ou fator de perda.

K_{sub} = relação de decaimento das vazões ao longo do tempo, liberadas pelo reservatório subterrâneo.

Sendo a vazão superficial, dada em m³/s, pela equação:

$$Q(i) = \frac{[Q_{base}(i) + R(i)] \cdot A}{86,4} \quad (5)$$

Em que,

A é a área de drenagem em km².

Uma possibilidade de avaliar a calibração do modelo é escolher uma função objetivo, sendo que no trabalho de Collischonn e Pante (2011) foi escolhida uma função similar ao erro padrão do modelo:

$$EP = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Q_{medida}(j) - Q(j))^2} \quad (6)$$

O cálculo do Erro Padrão (EP) deve ser realizado para as vazões medidas *in loco* (Q_{medida}) e as vazões calculadas na mesma etapa de tempo, visando reduzi-la. A modelagem foi desenvolvida em *software* com linguagem MATLAB® e será utilizada neste trabalho.

Basicamente são três dados de entrada para o modelo:

1. Histórico de precipitações regionais;
2. Histórico de evaporações/evapotranspirações regionais;
3. Mínimo de 3 medições de vazões locais;

2.2 PARÂMETROS DO MODELO E DADOS DE ENTRADA

Conceitualmente, os dados climáticos necessários ao modelo *MS* são precipitação e evapotranspiração, porém, a realidade brasileira conduz a alguns problemas emblemáticos. No caso dos dados de precipitação, o monitoramento pluviométrico é o mais disseminado, sendo que somente algumas regiões mais desenvolvidas, geralmente as grandes capitais, possuem postos pluviográficos e, em menor proporção ainda, se dispõe de radares meteorológicos.

Conforme trata Tucci (2005), a estimativa da distribuição temporal e espacial é fundamental para que o modelo represente adequadamente o hidrograma de saída correndo o risco de apresentar hidrogramas tendenciosos e prognósticos inadequados já que o usuário acaba corrigindo os parâmetros para compensar os erros.

Segundo o mesmo autor, ocorre dificuldade de estimativa da média de chuva na bacia quando a predominância é de precipitação orográfica e convectiva, trazendo grande variabilidade espacial. Uma possibilidade é considerar a topografia e reduzir a influência dos postos com alta precipitação. Uma maneira de retirar esses erros sistemáticos espaciais é realizando a média de precipitação na bacia com uma combinação do Método de Thiessen e Método das isoietas.

Já para evapotranspiração, a obtenção de dados é ainda mais complexa. Sendo inclusive relatado em Tucci (2002) que tanto a evapotranspiração potencial quanto a evaporação apresentam uma relativa incerteza na sua determinação devido ao reduzido número de postos climatológicos e imprecisão de muitos métodos utilizados. O autor recomenda identificar quais postos mais representativos das condições de cada bacia e determinar valores médios para utilização.

Normalmente instituições de ensino possuem postos de monitoramento de evaporação, quando é de sua conveniência, sendo que segundo Basso et al (2016), nas regiões Centro-Oeste e Norte há déficit até para o monitoramento de precipitações. Após os itens sobre os coeficientes dos modelos, serão explanadas as principais técnicas para obtenção de dados de precipitação e evaporação/evapotranspiração potencial.

Percebe-se nos estudos já realizados (SILVEIRA, 1997; COLLISCHONN E PANTE, 2011; HORN, 2016; FRIEDRICH, 2017) que o foco principal na modelagem é dada aos

dados de precipitação, relegando a evapotranspiração a um segundo plano, considerando que as medições de vazão são essencialmente para calibração do modelo. O fato é que houve pouco avanço no monitoramento hidrológico nestes últimos 20 anos principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste do país, conforme relata Basso et al (2016).

Sendo que Paiva et al (2016) ainda faz uma análise sobre as incertezas do *MS*:

1. Se o registro de precipitação do período com vazões contiver erros, os mesmos são transferidos aos parâmetros e aos resultados;
2. Conjunto de três vazões ajusta melhor o parâmetro K_{sub} e o C_{inf} depende muito do evento de estiagem ocorrido;
3. Coeficiente K_{sub} pode variar entre o período chuvoso e a estiagem, à medida que diferentes partes do aquífero contribuam para a vazão de saída e,
4. Modelo despreza a evapotranspiração do solo, e no caso em que a camada superior do solo retém muita umidade, e a perda por evapotranspiração, esta limitação pode comprometer o balanço.

2.2.1 O Coeficiente C_{inf}

Conforme relata Silveira (1997), o volume de infiltração é considerado alimentando diretamente o aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e geralmente de pequena profundidade na cabeceira das bacias.

Como resume Horn (2016), este coeficiente assume para cada aplicação do método, o percentual da precipitação, descontado da evapotranspiração, que vai gerar escoamento de base na bacia. Também traz embutidas correções de volumes escoados, devido às incorreções de avaliação das áreas das bacias, representatividade dos dados de precipitação e possibilidades de ganhos ou perdas de água subterraneamente. Em resumo acaba sendo o percentual da precipitação, descontada da evapotranspiração, que vai gerar escoamento de base na bacia, sendo que seu complemento define o volume de água que vai gerar escoamento superficial.

Originalmente este coeficiente C_{inf} é calibrado de maneira iterativa.

2.2.2 O Parâmetro K_{sub}

O parâmetro K_{sub} considera a propagação dos volumes no meio subterrâneo do modelo do reservatório linear simples que é uma teoria bastante difundida em estudos de depleção do escoamento superficial.

Segundo Mello e Garcia (2015), entende-se que a bacia hidrográfica pode ser representada simplificadamente por dois reservatórios lineares. Para o trecho de recessão do hidrograma, o reservatório que representa o escoamento superficial direto não contribui mais com o escoamento, portanto, a bacia fica representada apenas pelo reservatório subterrâneo que decai lentamente quando não há recarga, ou seja, sem chuva.



Figura 3. Comportamento do hidrograma perante a interação com a precipitação.
Fonte: Adaptado de Mello e Garcia, 2015.

A teoria parte da equação da continuidade que remete a diferença entre a vazão afluente e efluente ao reservatório sendo igual a taxa de variação do armazenamento ao longo do tempo:

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$

Admitindo que não haja mais precipitação, ou seja, sem afluxo ($I = 0$) e que o armazenamento proporcional à vazão é uma maneira razoável para se explicar o fenômeno hidrológico em pauta.

$$S = K_{sub} \cdot Q$$

Então temos:

$$0 - Q = k_{sub} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

Isolando a vazão:

$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{K_{sub}} \cdot dt$$

Integrando de t_0 a t :

$$\int \frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{K_{sub}} \cdot \int dt$$

$$\ln Q \Big|_{Q_0} = -\frac{1}{K_{sub}} \cdot t \Big|_{t_0}$$

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = -\frac{1}{K_{sub}} \cdot (t - t_0)$$

E por fim, a equação (7) pode ser representada na forma:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{k_{sub}} \cdot (t-t_0)} \quad (8)$$

Esta equação é justamente a vazão de base (Q_{base}) sem contribuição do volume infiltrado (V) na escala de tempo. Originalmente este parâmetro K_{sub} é calculado pela média entre os dias de medição de vazão, conforme a seguir:

$$K_{1sub} = \Delta t \cdot \ln Q_1/Q_2; K_{2sub} = \Delta t \cdot \ln Q_2/Q_3 \quad (9)$$

$$k_{sub} = (K_{1sub} + K_{2sub})/\Delta t \quad (10)$$

Como o K_{sub} deve representar o decaimento do hidrograma, devem-se buscar vazões decrescentes, ou seja, a vazão Q_1 maior que a vazão Q_2 e sucessivamente a vazão Q_2 maior que a vazão Q_3 .

Analisando analiticamente a Equação [9], quando as vazões são crescentes, a vazão Q_2 maior que a vazão Q_1 ou a vazão Q_3 maior que a vazão Q_2 , o resultado será um K_{sub} negativo e isto ocasionará um produto final inadequado da vazão de base. Da mesma maneira, também se produz um efeito inadequado quando a vazão Q_1 é igual a vazão Q_2 ou a vazão Q_2 é igual a vazão Q_3 .

Pela teoria, o K_{sub} não necessita ser corrigido, sendo que nos casos de resultado inadequado, deveria ser procurado outro período de estiagem para posteriormente continuar a modelagem.

Mas fica a indagação: Se o propósito desta modelagem é proporcionar celeridade nas análises de disponibilidade hídrica, um efeito inadequado do K_{sub} não gera morosidade, pelo fato de consumir mais tempo na busca de outro período de estiagem? Será possível corrigir o parâmetro K_{sub} e assim evitar um resultado inadequado do modelo, considerando que seu comportamento pode não ser linear?

Estas indagações permitem a discussão sobre a correção do parâmetro K_{sub} no *MS*, até porque dependendo das características hidrológicas da região, pode-se ter um tempo relativamente demorado até o próximo período de estiagem. Sendo assim, neste trabalho também é procurado verificar se a correção deste parâmetro pode melhorar o resultado da modelagem.

2.2.3 Média de precipitação na bacia

O método mais utilizado é o método clássico de Thiessen ou também denominado Polígonos de Thiessen (TH), que segundo Tucci (2009) é um método que considera a não-uniformidade da distribuição espacial dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia. A descrição da metodologia pode ser encontrada na bibliografia referenciada, não obstante, a ideia principal do método é de formar polígonos correspondendo a área de influência de cada posto utilizado e a precipitação média pode ser calculada pela Equação [11].

$$TH = \frac{\sum_{i=1}^n P_i.A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (11)$$

Sendo,

P_i = altura pluviométrica no posto i ;

A_i = área de influência do posto i .

Uma alternativa ao Método de Thiessen que é muito utilizada é o Método da ponderação pelo inverso do quadrado da distância ou no original em inglês “*Inverse Distance Weighting Method*” (IDW) e considera a lógica de ponderar pelo inverso do quadrado da distância do posto pluviométrico ao local de medição ou foz da bacia. Desta maneira quanto mais longe estiver o posto utilizado menor será sua influência na precipitação média da bacia. Este indicador pode ser calculado conforme Equação [12].

$$IDW = \frac{\sum_{i=1}^n P_i.d_{ij}^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2}} \quad (12)$$

A execução da metodologia IDW pode ser facilitada com o auxílio de softwares Gis livres a exemplo do Google Earth que possui ferramentas amigáveis para medição de distâncias. Neste trabalho foi utilizado o software ArcMap ® 10.1 do ArcGis da Esri.

Outro método bastante reconhecido é o das Isoietas de precipitação que, conforme Tucci (2009), se tratam de curvas de igual precipitação, sendo seu traçado bastante simples, assemelhando-se ao traçado de curvas de nível, onde alturas de chuva, totalizadas no tempo mensal ou anual substituem a cota do terreno.

O interessante das isoietas é que dependendo da experiência do hidrólogo quanto à bacia em análise, pode-se considerar o efeito orográfico e até de predominância de chuvas convectivas na região.

Também se estudou a possibilidade de utilizar uma combinação entre os métodos de Thiessen e isoietas para retirar erros sistemáticos espaciais nos casos de grande influência de chuvas orográficas e convectivas.

Essa combinação é descrita conforme Tucci (2005), obtendo-se o peso w_i^1 dos Polígonos de Thiessen e traçando as isoietas com base na experiência e outras informações da bacia como efeitos orográficos. A respectiva área A_i das isoietas terá precipitação P_i e um novo peso $w_i^2 = P_i / P_m$, onde P_m é a precipitação média, geralmente anual. Então, o peso a ser aplicado a cada posto no cálculo da precipitação é:

$$W_i = \frac{w_i^1 \times w_i^2}{\sum_{i=1}^n (w_i^1 \times w_i^2)} \quad (13)$$

e a precipitação média do intervalo de análise fica

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i \quad (14)$$

2.3 O SOFTWARE SISPB

O *software Sispb* advindo de “sistematização da metodologia de estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias” é uma ferramenta em linguagem MATLAB® para cálculo da modelagem *MS*, desenvolvido por especialistas em Recursos Hídricos da ANA disponibilizado para órgãos gestores a fim de auxiliar no cálculo de disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas.

O *Sispb* foi confeccionado em forma de aplicativo, portanto, é um arquivo auto-executável, necessitando apenas de um compilador da linguagem MATLAB®. O modelo necessita como dados de entrada a precipitação diária e evapotranspiração (ambos em mm). As medições de vazão são utilizadas para calibrar o modelo através da variação dos parâmetros C_{inf} e K_{sub} .

O aplicativo é bastante intuitivo facilitando a interação com o técnico analista de recursos hídricos. Já possui como *default* o estudo prévio da ANA que resultou nos dados de evapotranspiração real média com 80% de probabilidade de ocorrência calculada através de Polígonos de Thiessen com dados do *FAOCLIM*, não obstante, é possível a inserção de dados. Os dados de precipitação diária devem ser inseridos no formato de planilha *Microsoft Excel*.

Todos os itens são avaliados em uma tela única onde são representados os gráficos de precipitação e vazão já que se trata de uma modelagem chuva-vazão.

A entrada de dados de precipitações pode ser de três tipos:

- série de chuvas diárias preparada em formato Microsoft Excel®;
- leitura direta de chuva no formato Hidroweb;
- leitura das estimativas de precipitação pelo satélite TRMM.

Após a inserção dos *inputs* (chuva e evapotranspiração), é necessário informar o tamanho da área de drenagem da bacia hidrográfica e as três medições de vazão para calibração do modelo, incluindo a data.

A lógica do sistema é de ir se alterando os parâmetros C_{inf} e K_{sub} minimizando o erro padrão e ajustando o gráfico da vazão as medições locais. A Figura 4 apresenta o resultado de uma simulação no *Sispb*.

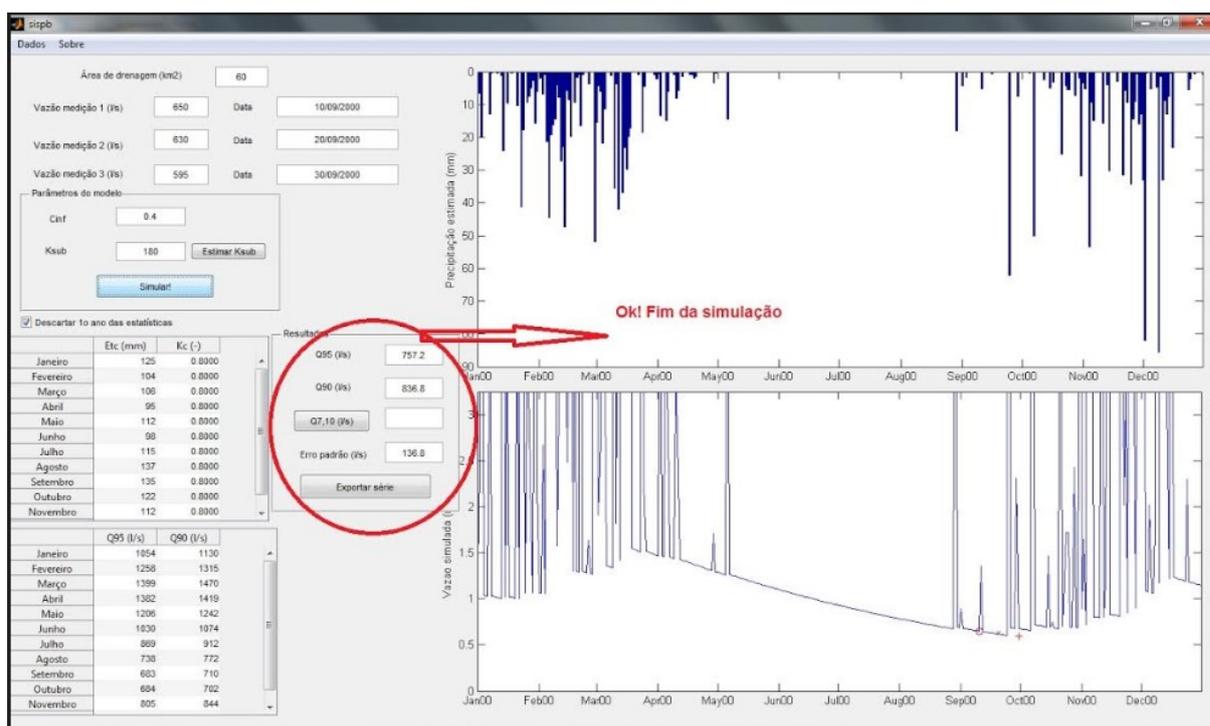


Figura 4. Exemplo de resultado da simulação da disponibilidade hídrica no *Sispb*.

2.4 PROTOCOLOS EXISTENTES

Inicialmente Silveira (1997) propôs uma alternativa capaz de suprir a ausência de metodologia para a quantificação de vazões medianas e mínimas de pequenas bacias, fato que conduzia ao uso abusivo e irrestrito de estudos de regionalização hidrológica. Destarte, foi apresentado um procedimento prático baseado em medições locais no período de estiagem. Este método é denominado neste trabalho como *MS*, tratando-se de uma simulação chuva-vazão.

O referido estudo se utilizou de série histórica reduzida de vazão, três anos de monitoramento. Foram estabelecidas algumas condicionantes para utilização do método:

- Dispor do conhecimento de no mínimo dois eventos de estiagens subsequentes;
- A avaliação das chuvas precedentes deve ocorrer na própria bacia em análise;

- Utilização com parcimônia para bacias com áreas de drenagem maiores que 100 km²;
- Ocorrer o acumulado de precipitações de até 15 mm nos 7 dias antecedentes à medição das descargas.

Buscando ampliar a aplicabilidade do *MS* para bacias com área de drenagem de até 1000 km², Horn (2016) estudou uma rede de 12 bacias hidrográficas com o objetivo de estabelecer um protocolo de uso. Os resultados do estudo foram:

- As vazões medidas devem representar um decréscimo exponencial, caso contrário, a estimativa do método deve ser procurada por outro evento;
- A estabilização do K_{sub} é o fator mais importante na modelagem, então recomenda-se que a diferença relativa de avaliação deste parâmetro nas três medições locais não exceda 100%;
- O parâmetro C_{inf} deve estar situado entre 0,1 e 0,6;
- O *MS* não apresentou diferenças significativas relativo à situação de aquíferos sedimentares ou fraturados;
- O *MS* apresenta resultados satisfatórios para bacias com área de drenagem até 1000 km²;
- Ocorrer o acumulado de precipitações de até 30 mm nos 14 dias antecedentes à medição das descargas, nenhuma excedendo a 5 mm por dia.

Tem-se também o protocolo proposto por Friedrich (2017) ao se analisar a influência da precipitação para bacias hidrográficas com áreas entre 800 a 1000 km². O autor estudou a influência quanto ao número de postos pluviométricos na bacia bem como a disposição espacial. Da análise dos resultados obtidos para bacias hidrográficas situadas no Rio Grande do Sul, foi proposto o seguinte protocolo:

- 1- Dias sem chuvas antecedentes a primeira medição: 14 dias antecedentes as três campanhas de medições locais;
- 2- Total de chuvas neste período: admitindo até 30 mm, desde que não ultrapasse um total de 5 mm diários;
- 3- Em relação ao parâmetro K_{sub} : recomenda-se que a diferença relativa entre as três medições locais não exceda 100%;
- 4- Em relação ao parâmetro C_{inf} : recomenda-se que a faixa de valores do C_{inf} seja em um intervalo entre 0,1 e 0,6;

- 5- Quanto à disposição espacial dos postos na bacia: não representou um condicionante, convergindo para o uso de séries de dados de postos que independem de sua posição espacial, desde que esteja localizado na área ou no entorno da bacia de interesse;
- 6- Recomenda-se que se utilize série de dados de precipitação de pelo menos duas estações pluviométricas em bacias na escala do estudo.

Percebe-se que as recomendações de Friedrich (2017) são praticamente as mesmas de Horn (2016), exceto pelo fato do aprofundamento no estudo da precipitação média na bacia com a inserção de mais de um posto pluviométrico.

2.5 METODOLOGIAS APLICADAS A PEQUENAS BACIAS COM POUCAS INFORMAÇÕES (*PREDICTION UNGAUGED BASINS - PUB*)

De maneira geral, a nível internacional ainda se sente a deficiência no monitoramento em certos locais do mundo e isto tem gerado apreensão nos pesquisadores da área. Desta maneira serão relatadas algumas pesquisas na área de estimativa de vazões em bacias com poucas informações (chamadas de “*PUB*” no inglês).

Palanisamy e Worman (2014) utilizaram uma função de transferência hidrológica invariante no tempo para a previsão do fluxo de vazão em bacias sem dados, relatando inclusive a carência de metodologias acuradas para estimativa de vazões. Foi realizada a transferência das vazões na Bacia do Rio Kentucky/USA através de uma função temporal média com sistema de tempo-invariante (ATF) em relação a área de drenagem baseada na equação de Chow et al (1988), conforme citado pelos autores. A ATF foi regionalizada por análise de regressão múltipla de 194 combinações de área de drenagem de diferentes topografias, terrenos e geologia.

A performance do método proposto foi testada pela equação de Nash-Sutcliffe (NSE) que mede a eficiência de predição do método proposto comparando o fluxo simulado com o fluxo observado. O resultado foi considerado muito bom concluindo que a ATF obtida se provou como um método rápido e simples para avaliação de vazões para operação de modelos hidrológicos.

Christiansen et al (2017) utilizaram um sistema de modelagem chuva-vazão no Oeste do Iowa/USA para simular vazões diárias em 12 sub-bacias do Rio Missouri. O modelo utilizado foi construído pela cooperação do USGS com o IDNR, denominado de *Precipitation-Runoff Modeling System* (USGS PRMS) e pode ser considerado como

determinístico, com parâmetros distribuídos calculados em minibacias chamadas de unidades de resposta hidrológica (URH), baseado nos processos físicos, para avaliar a resposta da drenagem para várias combinações de clima e uso do solo. As características físicas e hidrológica utilizadas no modelo são a altitude, a inclinação, o aspecto, o tipo de vegetação e a cobertura, o uso da terra, a morfologia do solo, a geologia, os limites de drenagem, a distribuição das precipitações, a temperatura, a radiação solar e a direção do fluxo.

Emprega-se o algoritmo de evolução complexa *Shuffled Complex Evolution* (SCE) para calibração inicial com o software chamado *Let Us Calibrate* – LUCA (Hay and Umemoto, 2006) e posteriormente o refinamento é manual. Dos 42 locais de calibração para as 12 bacias, o resultado foi satisfatório em 36 locais com base nos resultados estatísticos. Foi considerado que o modelo é voltado para o passo de cálculo diário, portanto, eventos de curta duração não estão bem representados. Além disso, quanto melhor o refinamento dos parâmetros de entrada do modelo melhor a representação do processo e performance do modelo.

Farmer e Koltun (2017) utilizaram três metodologias para estimar vazões com probabilidade de não-excedência (permanência no tempo) sendo elas: método de índice único (método do vizinho mais próximo), mapa de correlação direta de vazões e ferramentas geoespaciais (krigagem ordinária). Os métodos foram avaliados através da realização de validações cruzadas do tipo *leave-one-out* e eficiência de Nash-Sutcliffe baseadas em análises de quase 7 anos de dados diários de vazão de 79 corpos hídricos em Ohio e estados vizinhos.

O método de krigagem ordinária com o semivariograma pelo modelo esférico se mostrou substancialmente melhor, apresentando média de Nash-Sutcliffe de 0,87 em comparação com 0,79 dos outros dois métodos.

2.6 ESTIMATIVA DE VAZÕES EM BACIAS COM POUCAS INFORMAÇÕES NO BRASIL

Percebe-se que os pesquisadores nacionais possuem grande interesse nos estudos de regionalização de vazão que se trata de uma técnica de transferência de dados de uma região para outra. Em contrapartida, encontram-se poucos trabalhos sobre estimativa de vazões em locais que não possuem dados ou possuem poucos dados.

Um dos principais trabalhos é o de Collischonn (2006) que avaliou vazões simuladas no modelo hidrológico distribuído MGB-IPH com a utilização de estimativa de precipitações obtidas a partir do satélite TRMM e com dados da rede pluviométrica oficial. Foram estudadas a bacia do Rio São Francisco até a UHE Três Marias que possui uma alta densidade

de postos pluviométricos e a bacia do Rio Tapajós com uma densidade precária de postos pluviométricos.

A aferição da qualidade do modelo foi realizada pela eficiência de Nash-Sutcliffe, o coeficiente de Nash-Sutcliffe utilizando o logaritmo das vazões e pelo erro de volume. Conclui-se que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM são consistentes reproduzindo com bastante fidelidade o regime de chuvas de bacias hidrográficas brasileiras.

Nas duas bacias analisadas, o satélite superestimou sistematicamente as precipitações médias nas estações secas, porém a diferença com o valor real não foi muito acentuada. Os resultados das vazões simuladas com dados do satélite foram bastante bons, mas com um desempenho inferior aos dados de pluviômetros. O trabalho conclui que as estimativas com satélite podem ser uma fonte de dados alternativa para simulação hidrológica chuva-vazão.

Araújo (2006) também estudou simulação hidrológica com chuvas estimadas por satélite, porém com um enfoque de avaliar o impacto das incertezas em sistemas de alerta de cheias na bacia do Rio Iguaçu em União da Vitória/PR. As chuvas de satélite foram obtidas pelo algoritmo CMORPH disponibilizado pelo *NOAA*, que utiliza dados de diversas fontes para estimar a chuva global na área.

O modelo hidrológico utilizado no estudo foi o 3R descrito em Guetter et al. (1996) *apud* Araújo (2006), se tratando de um modelo semi-distribuído e calcula a propagação das vazões pela modelagem do tipo onda cinemática. A validação dos dados de chuva indicou que a frequência e duração dos eventos foram muito semelhantes tanto no monitoramento pela rede de pluviômetro, quanto pelo satélite.

Já quanto a análise do modelo hidrológico para vazões concluiu-se que a resposta do modelo depende significativamente do tipo de dado de chuva usado, sendo que no estudo o produto do satélite superestimou a chuva média, causando uma saturação mais rápida da bacia e conseqüentemente aumentando os picos dos hidrogramas. De qualquer maneira, as chuvas de satélite apresentam grande potencial para serem usadas em diversas aplicações hidrológicas.

O uso de precipitação por satélite também foi estudado por Gonçalves (2011) para se estabelecer relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) a partir de estimativas do satélite TRMM com resolução temporal de 3 horas. Foram geradas curvas IDF e comparadas com as relações estabelecidas com dados pluviográficos. Salienta-se que o resultado da relação IDF é o principal fator para estimativa de vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas com dados precários.

No caso das intensidades máximas, os dados por satélite subestimaram as precipitações por pluviógrafos, mesmo assim os resultados puderam ser considerados satisfatórios. As estimativas por satélite são uma potencial fonte de dados em locais sem monitoramento e também servem para extensão de séries monitoradas.

Machado (2016) também propôs a confecção de mapa estadual de dispersão em curvas de vazões mínimas através de krigagem ordinária para servir como ferramenta de coleta de informações de vazões de referência, em Mato Grosso do Sul, como forma de solucionar a deficiência nos postos fluviométricos.

Foram utilizados dados de 87 estações fluviométricas com mais de cinco anos de dados e gerados os mapas para Bacia do Rio Paraguai e Bacia do Rio Paraná. As áreas de drenagem das estações variam de 315 a 804000 km². Anos com falhas ou sem valores observados foram descartados para não haver a necessidade de realizar o preenchimento de falhas. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios com base na validação cruzada, onde foram obtidos coeficientes de dispersão em torno de 0,70. Os erros médios obtidos variaram de 1,26% a 177,70%, dependendo da quantidade de dados disponíveis perto da região em análise.

E para finalizar, Comini (2017) estudou modelagem hidrológica em pequenas bacias hidrográficas com ausência de séries históricas de vazões, se tratando de uma proposta análoga ao estudo proposto neste trabalho.

O autor supracitado aplicou e avaliou a modelagem *MS* para a bacia do ribeirão São Bartolomeu em Viçosa-MG. Para aplicação do *MS* utilizou-se 351 dados diários de vazão, observados entre 2014 e 2016. A ênfase do estudo foi nas vazões de permanência 50% e 95% e analisando como potencial para alocação de vazões em situação de escassez.

Comini (2017) obteve os seguintes resultados:

- A utilização de diferentes critérios para seleção dos períodos de estiagem permite analisar maior número de cenários;
- As curvas de permanência simuladas apresentaram tendência de subestimativa em comparação aos valores observados;
- O *MS* pode ser adotado como ferramenta complementar para planejamento de recursos hídricos em situação de escassez hídrica, fornecendo informações que permitem a adoção de práticas de gestão mais adequadas as condições da bacia.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Por questão de disponibilidade de dados e logística, definiu-se como área de estudo a Bacia Hidrográfica do Rio Coxipó, sub-bacia do Rio Cuiabá na Região Hidrográfica do Paraguai. Este é um rio que abrange os municípios de Chapada dos Guimarães e Cuiabá passando por dentro da zona urbana da capital matogrossense.

3.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Coxipó possui uma área de drenagem de 694 km², localizando-se entre as coordenadas geográficas de 15° 20' a 15° 40' de latitude sul e 55° 36' a 56° 10' de longitude oeste de Greenwich. Suas nascentes possuem uma altimetria em torno de 800 metros na formação geológica planalto dos Guimarães e sua foz no Rio Cuiabá ocorre na altimetria 160 metros na depressão Cuiabana percorrendo em torno de 80km (ROCHA, 2003; SILVA, 2009). Na Figura 5 é apresentado o desenho desta bacia hidrográfica.

Particularmente esta bacia é importante por ser um polo de turismo e Unidade de Conservação no Estado de Mato Grosso e seu rio atravessar boa parte da zona urbana da capital.

A maior parte da Bacia do rio Coxipó, a montante da área urbana de Cuiabá em torno de 60%, segundo Maitelli (1994) *apud* Rocha (2003), é protegida por parques e áreas de conservação ambiental, tais como: Parque Nacional de Chapada dos Guimarães, Área de Proteção Ambiental de Chapada dos Guimarães, Estrada Parque Cuiabá-Chapada dos Guimarães e Unidade de Conservação do Horto Florestal Municipal, cujos objetivos são: evitar a destruição da natureza, preservar os ecossistemas, recursos hídricos, sítios arqueológicos e proporcionar ao público lazer, turismo e educação ambiental.

A área apresenta forma alongada, formando um arco orientado para a direção leste. Sua rede de drenagem é formada pelo rio Coxipó e seus afluentes, sendo os mais importantes os rios: Coxipózinho, Claro, Mutuca, dos Peixes e córregos: Buriti, Manjolinho, Salgadeira, Independência, Paciência, Três Barras, Gunitá e Moinho pela margem direita e córregos Coxipó Mirim, Tijuca e Castelhana na margem esquerda (ROCHA, 2003).

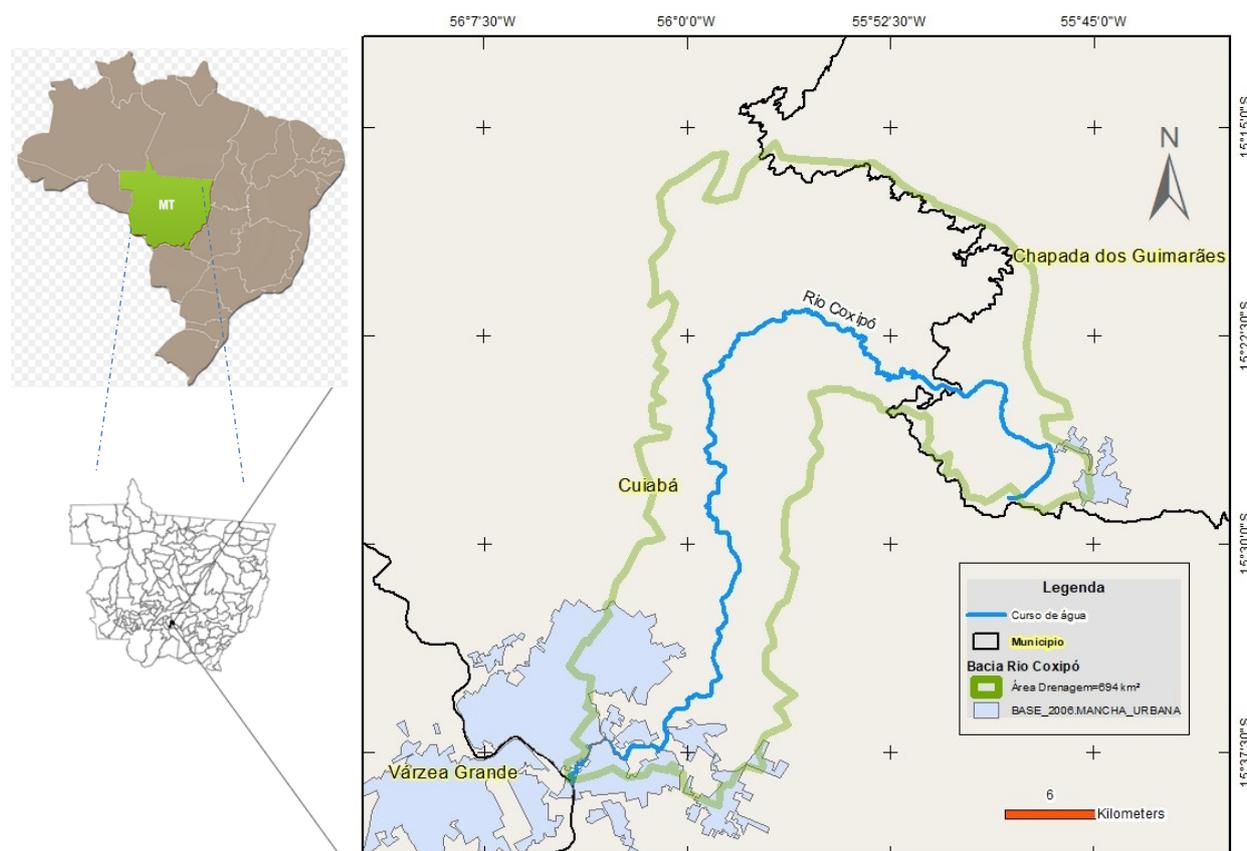


Figura 5. Bacia hidrográfica do rio Coxipó. Datum: SIRGAS 2000.

Ainda com Rocha (2003), a bacia começa no Planalto dos Guimarães e sua maior parte está numa área que sofreu rebaixamento, Baixada Cuiabana, constituída basicamente em rochas sedimentares das Formações Ponta Grossa, Botucatu e Grupo Cuiabá.

O rio Coxipó tem sua nascente próxima à estrada que vai para localidade de Água Fria com altitude aproximada de 868 metros, a noroeste da cidade de Chapada dos Guimarães – MT, junto a Serra de Atmã, apresentando duas características hidráulicas, ou seja, rio de Planalto e de Planície Pantaneira. Nasce como rio de Planalto com velocidades altas formando corredeiras e ressaltos, devido às estruturas geológicas, possuindo várias quedas naturais, tais como: Cachoeirinha com 18 metros de desnível, Salto Véu de Noiva de 75 metros e várias outras (FEMA, 1997 *apud* ROCHA, 2003).

A Figura 6 apresenta o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Coxipó com resolução espacial de 30 metros incluindo o resultado da obtenção da rede de drenagem.

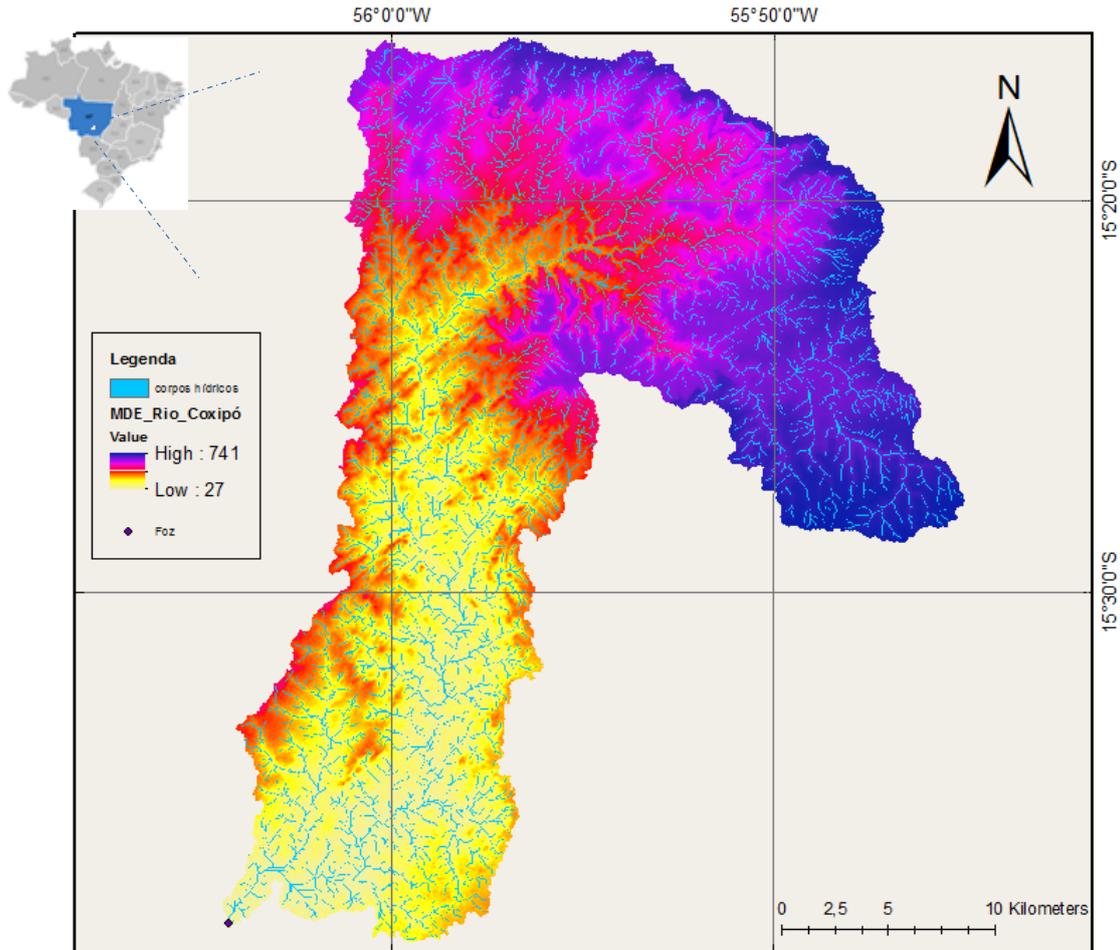


Figura 6. Mapa de altimetria da bacia do rio Coxipó utilizando o MDE de 30 metros.

Projeção das Coordenadas: DATUM SIRGAS 2000. Fonte: própria.

Depois de descer aproximadamente 400 metros num percurso em torno de 4 km recebe um de seus afluentes, denominado córrego Independência. Nessa área encontra-se a gruta, Casa de Pedra com Formação Rochosa de Arenito de Furnas, drenada pelo mesmo curso d'água e seus afluentes com várias cachoeiras, tais como: cachoeira Sonrisal, do Pulo, dos Malucos, das Andorinhas e outras, bem com a existência de Monumentos Ecológicos, local de atrações com muitas belezas cênicas, até atingir a uma cota em torno de 180 m, tornando-se um rio com características de Planície até sua foz com aproximadamente 130 m de altitude, na margem esquerda do rio Cuiabá. No município de Cuiabá drena vários bairros, tais como: Recanto dos Pássaros, Jardim Universitário, Três Barras, Morada da Serra, Jardim dos Ipês, Santa Cruz, Boa Esperança, Tijucal, Altos do Coxipó, Morada do Ouro CPA I, II, III e IV e outros, num total de 44 bairros, num segmento longitudinal de aproximadamente 15 km (IPDU, 2000 *apud* ROCHA, 2003).

Este é o manancial responsável pelo abastecimento de água de metade da população cuiabana e também recebe quase que a totalidade dos efluentes originados na cidade, ou seja, é um corpo hídrico com múltiplos usos da água.

Também é um dos corpos hídricos estaduais com maior aporte de estudos, em que um dos estudos de vanguarda foi o Projeto “*Monitoramento da Quantidade e da Qualidade da Água na Bacia do Rio Coxipó (Cuiabá-MT) e Implementação da Gestão Participativa dos Recursos Hídricos*” executado pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) que gerou grande quantidade de dados na referida bacia, sendo que alguns dados mais significantes para esta pesquisa serão apresentados nos itens a seguir.

3.2 USO E OCUPAÇÃO NA BACIA

Estudos de Thomé Filho *et al.* (2006) *apud* Silva (2009), utilizando-se de imageamento de satélite do ano de 2005 identificou as principais formas de uso e ocupação do solo, retratado na Figura 7, resultando nas seguintes percentagens de uso: Pastagem (6%), Campo Cerrado, Cerrado e Cerradão (60%), Mata Ciliar (9%), Agricultura (25%), Solo Exposto (<1%) e Água (<1%).

Segundo os autores, a agricultura é praticada e desenvolvida em áreas localizadas sobre o Planalto dos Guimarães e apresenta características do sistema de *plantation*, ou seja, é desenvolvida em grandes extensões de terra com predomínio de uma única cultura que geralmente é destinada ao abastecimento de mercados externos.

Continuam explicando que a pecuária é desenvolvida em áreas de pastagem localizadas sobre a Depressão Cuiabana. Essa atividade fornece carne aos frigoríficos da baixada cuiabana que por sua vez abastecem a população da região e exportam para mercados externos.

Não faz parte do escopo do trabalho estudar o uso e ocupação do solo, não obstante avaliou-se estudos de Couto (2011), devido as grandes influências nas vazões do corpo hídrico pela intensificação de usos dos recursos hídricos.

O referido autor realizou uma análise geoambiental na bacia hidrográfica e afirma que a principal alteração de uso do solo se deu no baixo curso do rio Coxipó resultante de grande concentração humana, processos de desmatamento das matas ciliares para implantação de vias e edificações, impermeabilização do solo e lançamento de efluentes sanitários nos córregos tributários. Tudo isso tem causado um aumento no escoamento superficial no baixo curso do rio Coxipó.

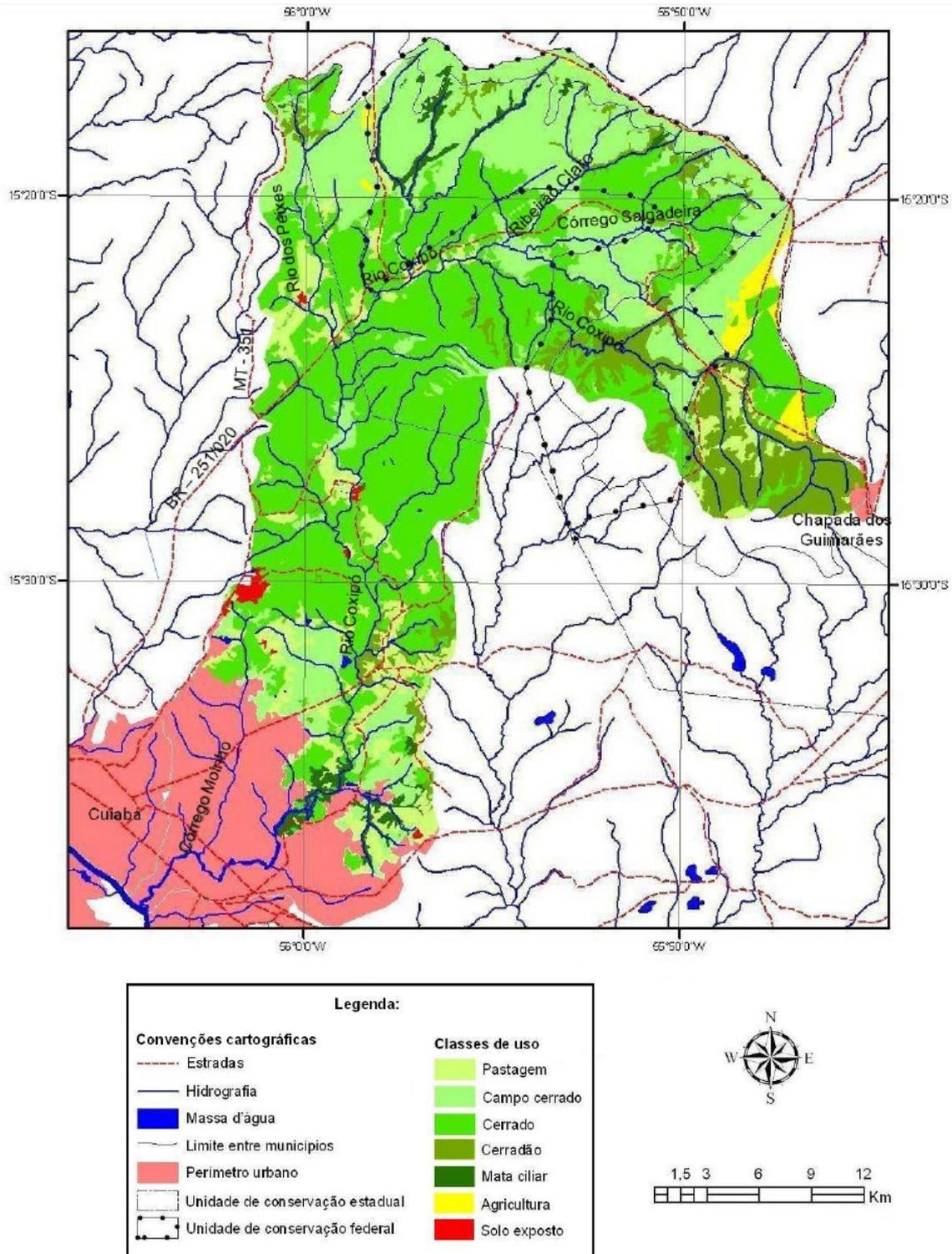


Figura 7. Mapa de uso e ocupação dos solos da área de estudo.

Fonte: THOMÉ FILHO *et al.* (2006) *apud* SILVA (2009).

Mesmo com a intensificação do uso do solo no baixo curso do rio Coxipó, Couto (2011) relata que ao longo de 22 anos de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica, a característica principal é de pequenas mudanças, como demonstra o mapa de comparação entre os anos 1988, 2000 e 2010 na Figura 8.

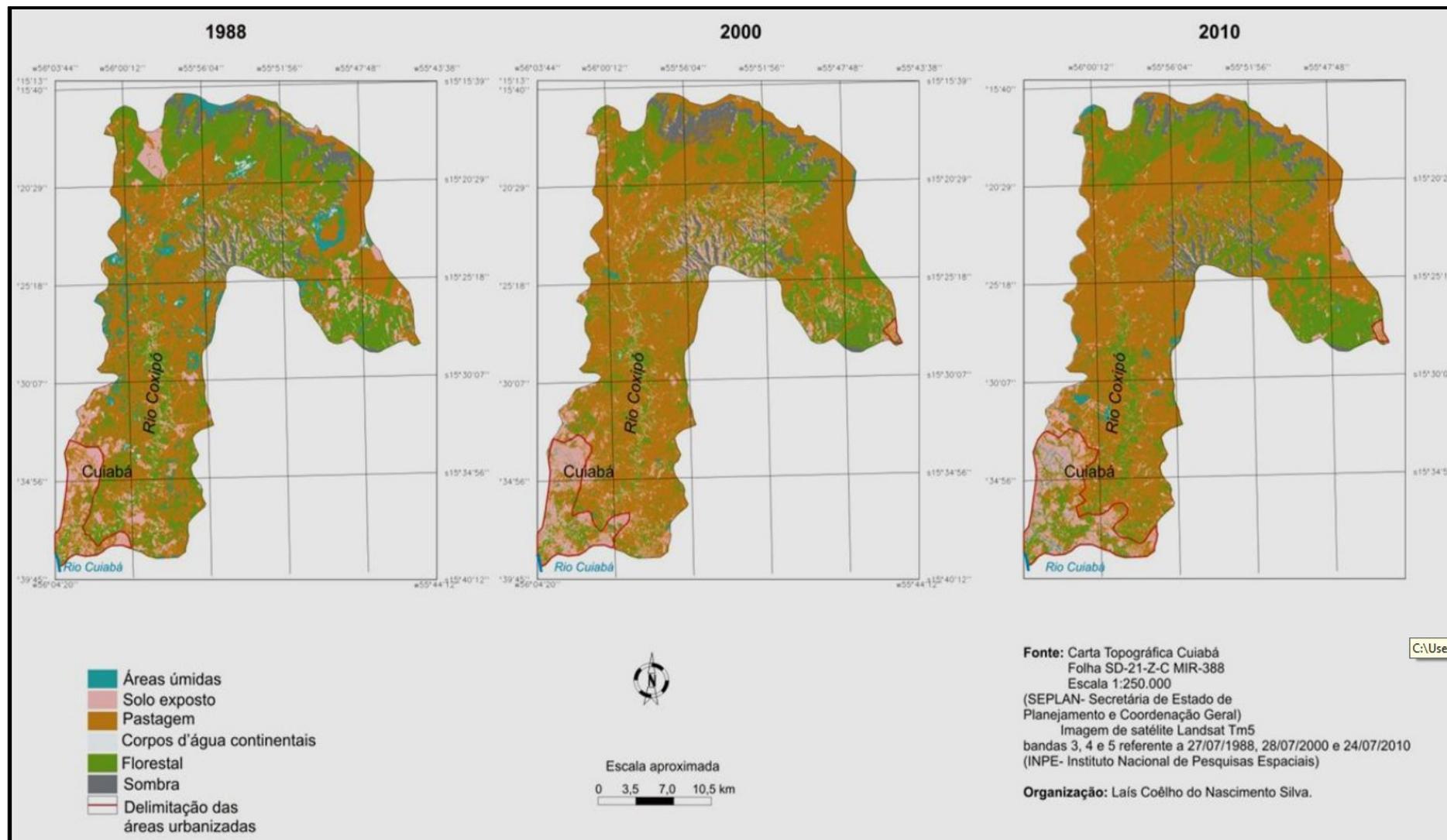


Figura 8. Comparação do uso e ocupação dos solos da área de estudo entre os anos 1988, 2000 e 2010.

Fonte: Adaptado de COUTO (2011).

Percebem-se alterações significativas apenas nas áreas urbanizadas com grande aumento da mancha urbana a partir do ano 2000. De qualquer maneira, entende-se que a estimativa da disponibilidade hídrica será em relação às vazões naturalizadas já que a única série histórica de vazões disponível remete a um período anterior a essa intensificação de usos do solo.

Estudos do RADAM BRASIL (1982) identificaram a distribuição espacial dos solos presentes na bacia do rio Coxipó, conforme Figura 9, resultando em: Areia Quartzosas (12%), Cambissolo (28%), Latossolo (11%), Plintossolo (<1%), Podzólico (3%), Concrecionário (33%) e Litólico (13%).

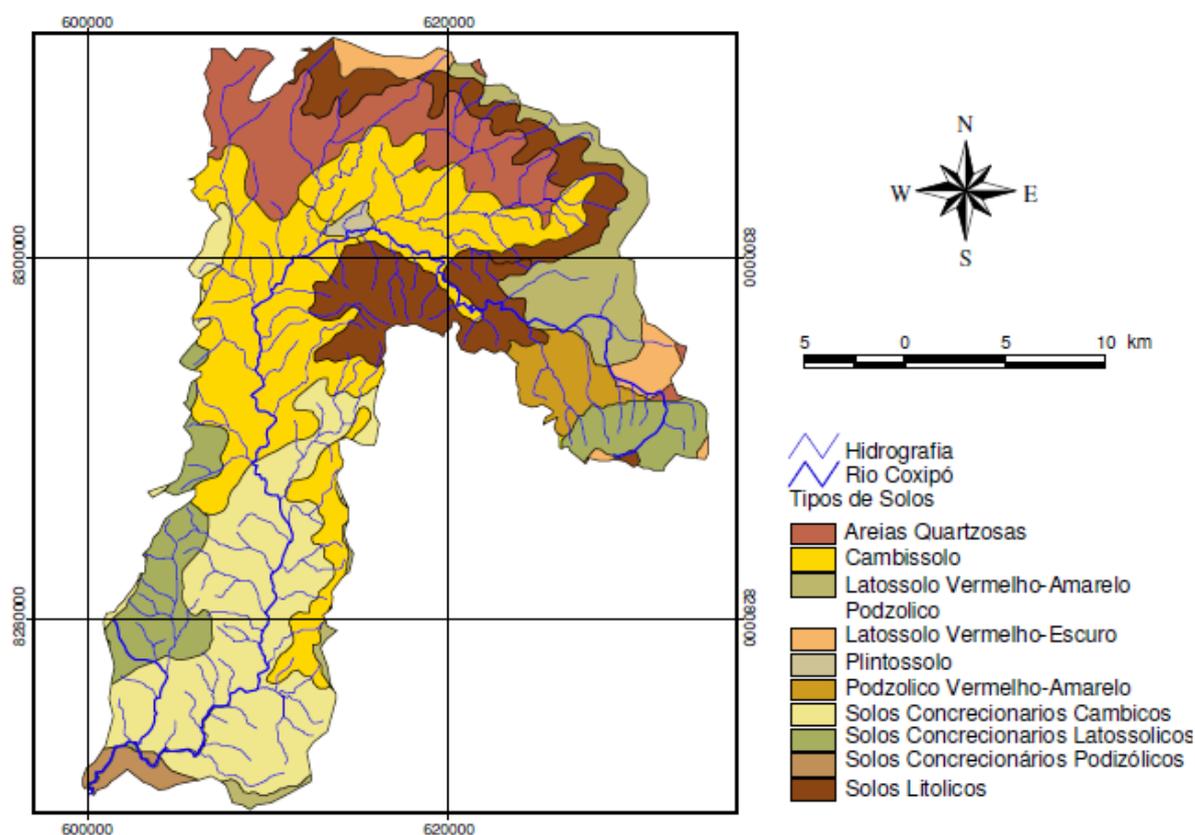


Figura 9. Distribuição espacial dos solos na área de estudo.

Fonte: Adaptado de RADAM BRASIL (1982).

A região mais ao Norte e nordeste da bacia, constituída basicamente por areias quartzosas e latossolos, há grande potencial de infiltração de água da chuva caracterizando como uma área de recarga do aquífero subterrânea e possibilita uma manutenção das vazões de base na bacia. Esta região é delimitada até o início das quedas d'águas e cachoeiras. Remetendo ao mapa de altimetria, Figura 6, a região de planalto é exposta pelas cores vermelhas e arroxeadas e representam cerca de 60% da área da bacia, caracterizando como o alto curso do rio Coxipó.

O restante da bacia composto pelo médio e baixo curso do rio Coxipó, 40% da área, é exposta na Figura 6 pela cor amarela e é formada basicamente por solos concrecionários, representando uma hidráulica de planície com baixa infiltração de água e alto nível freático.

Em estudos realizados pela SEPLAN (1997) *apud* Silvino (2008), indicam que os solos da baixada cuiabana são ácidos e pobres em nutrientes de maneira geral, também possuem pouca quantidade de matéria orgânica, baixos valores de pH e elevados teores de alumínio. Desta maneira, devido seu relevo possui alta susceptibilidade à erosão e baixa permeabilidade.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FLUVIOMORFOLÓGICA

Foi realizado um mapa de declividade superficial por Silva (2009) com base no Modelo Numérico de Terreno (MNT) do SRTM com resolução espacial de 90 metros conforme observado na Figura 10, logo mais adiante.

Percebe-se que a parte do Planalto de Chapada dos Guimarães possui relevo de superfície plana com pequena amplitude, baixa declividade (inferior a 6%) e que segundo Silva (2009) tem um solo predominante do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo que possibilita boa infiltração da água, mas tem um nível freático profundo.

Segundo o mesmo autor, a bacia apresenta uma faixa entre as cotas altiméricas 680 a 720 metros formados por colinas amplas de declividade suave a média variando de 0% a 12% e mesmo comportamento hídrico do planalto. Também possui uma faixa de escarpas entre as altitudes 320 e 680 metros com grande amplitude, alta declividade (superior a 30%) e baixa densidade de drenagem.

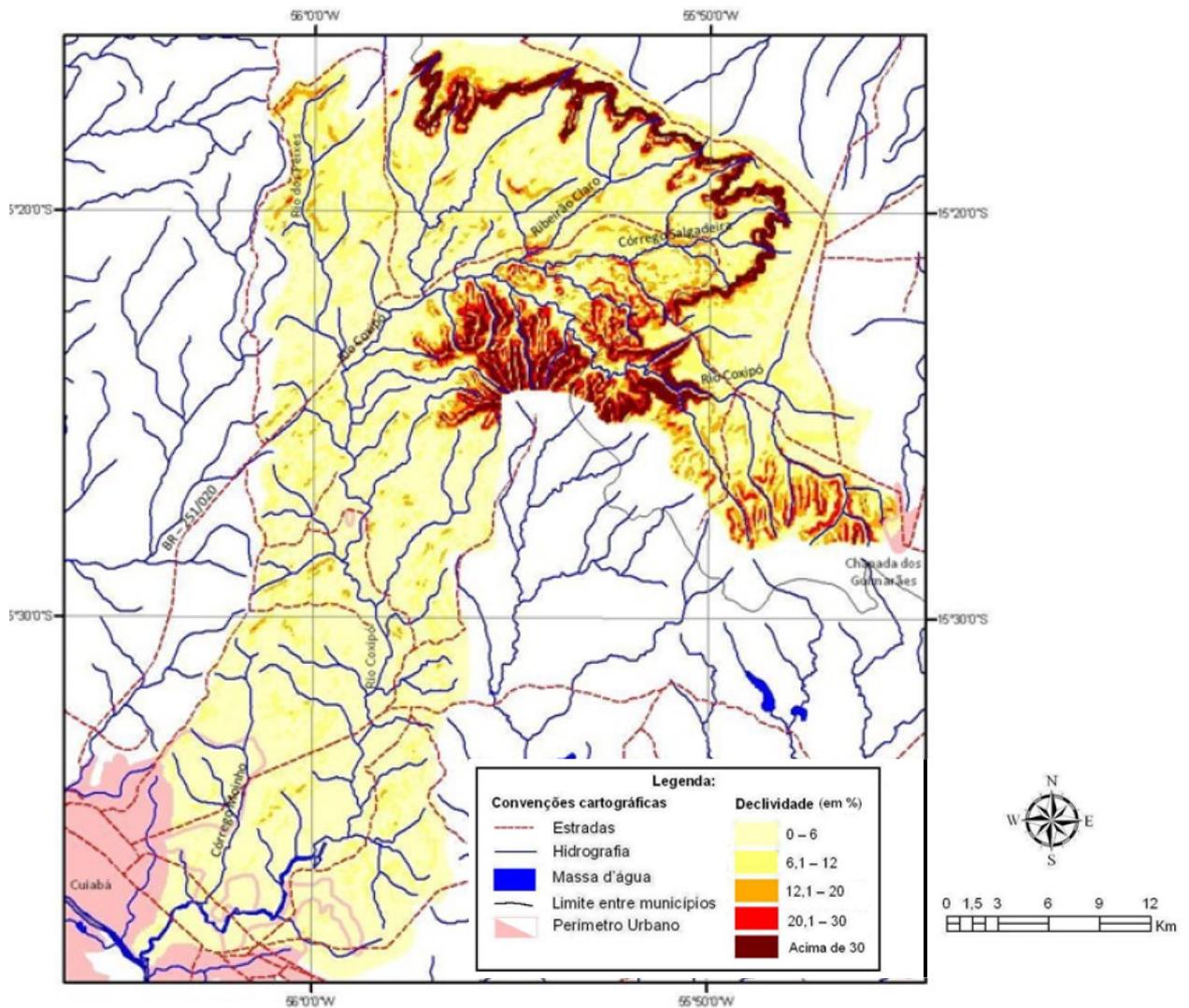
Continua apresentando que entre as cotas altimétricas 200 a 400 metros possui área de morros e morrotes com relevo suave a fortemente ondulado, declividade média a alta (predominante de 12,1% a 20%), vertentes com perfil variando de retilíneos a convexas, interflúvios médios. E o restante do relevo da bacia até a foz varia de plano a ondulado com baixa declividade (predominantemente inferior a 6%) com nível freático aflorante.

O quadro 1 a seguir apresenta as principais características fisiográficas calculadas por Rocha (2003).

Quadro 1: Características fisiográficas da bacia do rio Coxipó.

Ordem	Parâmetro	Valor	Unidade
L	Comprimento Axial do Curso d'água Principal	81,50	Km
I	Largura Média de Extensão da Bacia	8,00	Km
A	Área de Drenagem da Bacia	694,0	Km ²
Tc	Tempo de Concentração	12,55	h
Q	Vazão de Escoamento da Bacia	8,85	m ³ /s
q	Vazão Específica da Bacia	13,28	l/s
Ic	Índice de Compacidade da Bacia	1,65	
Dd	Densidade de Drenagem da Bacia	0,12	Km/Km ²
N	Ordem de Curso d'água	5,00	
Ip	Índice de Proteção	0,80	
D	Declividade Média da Bacia	24,70	%

Fonte: ROCHA (2003).

**Figura 10.** Classes de declividade na bacia do rio Coxipó.

Fonte: Adaptado de SILVA (2009).

3.4 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

Todos os dados desta caracterização foram obtidos na estação Climatológica da Universidade Federal de Mato Grosso, denominada Estação Mestre Bombled, localizada no campus da universidade e operada pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Segundo Rocha (2003), a região possui duas estações bem definidas; a seca que vai de maio a agosto e a chuvosa de setembro a abril. A precipitação média anual é de 1363,5 mm, cujos meses de janeiro a março são os mais chuvosos, junho a julho os mais secos. A temperatura média anual é de 26 °C, máximas médias diárias entre 36 °C e 38 °C, em setembro e as mínimas em torno de 15 °C em julho. A umidade relativa do ar tem média anual de 79%, pressão atmosférica média anual de 993,54 mb e os ventos predominantes com direção Norte e Nordeste.

Segundo Weska *et al.* (1991) e Nimer (1997), *apud* Rocha (2003) e CPRM (2006), o clima local, conforme suas características estão enquadradas como Aw na classificação Köppen, sendo dominante na região o tipo tropical, quente, semi-úmido, com quatro a cinco meses secos e duas estações bem definidas, uma seca (outono-inverno) e outra chuvosa (primavera-verão).

No Quadro 2 são apresentadas as principais características climáticas da região de Cuiabá conforme calculado por CPRM (2006) com dados das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET pela média histórica de trinta anos (1961 a 1990). E na Figura 11, a comparação entre evaporação média no “tubo de Piché” com a precipitação total.

Na região de planície, que abarca aproximadamente 40% da área da bacia, há predominância de chuvas convectivas na estação chuvosa (de outubro a março). Geralmente se verifica chuvas frontais nos meses de maio e junho caracterizando o inverno cuiabano.

Quadro 2: Características climatológicas da região de Cuiabá².

Característica ⁽¹⁾	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
T _{méd} (°C)	26,7	25,3	26,5	26,1	24,6	23,5	22,0	24,7	26,6	27,4	27,2	26,6	25,6
T _{mín} (°C)	23,2	22,9	22,9	22,0	19,7	17,5	16,6	18,3	22,1	17,1	22,9	23,0	20,6
T _{máx} (°C)	32,6	32,6	32,9	32,7	31,6	30,7	31,8	34,1	34,1	34,0	31,1	32,5	32,5
ET (mm)	89,4	76,2	78,1	40,5	93,2	106,2	132,8	173,6	156,2	143,4	111,0	92,7	1293
UR (%)	80,7	81,6	81,0	79,5	74,2	73,7	65,4	57,3	61,8	69,9	74,2	78,5	73,1
PT (mm)	202	194	206	127	52	21	6	15	56	120	164	195	1.391

Fonte: INMET *apud* CPRM (2006).

²T_{med} = temperatura média; T_{mín} = temperatura mínima; T_{máx} = temperatura máxima; ET = evaporação no Tanque “Classe A”; UR = umidade relativa do ar; PT = precipitação total.

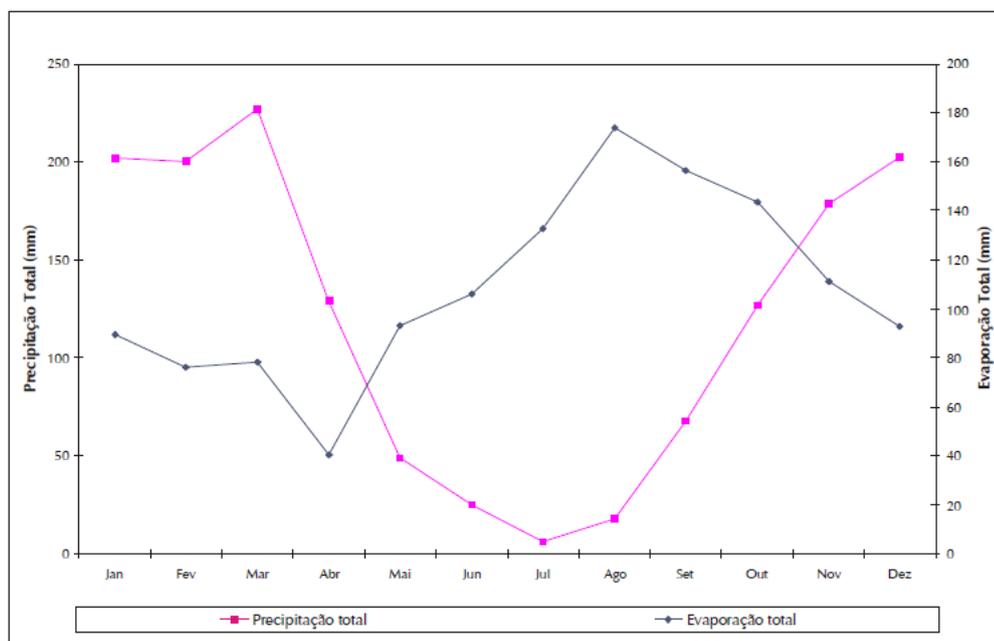


Figura 11. Valores Médios mensais de precipitação e evaporação na região de Cuiabá.

Fonte: CPRM (2006).

Utilizou-se também o estudo de pluviosidade no Estado de Mato Grosso, disponível no Plano Estadual de Recursos Hídricos (MATO GROSSO, 2009). O estudo aponta que Mato Grosso recebe um total pluviométrico anual que varia entre 1000 mm e 2500 mm, sendo que os totais anuais de chuva diminuem de norte para noroeste, em direção ao sul e sudoeste. A porção norte do Estado concentra os maiores totais pluviométricos (até 2500 mm), enquanto a diminuição é gradual em direção ao pantanal, caindo para até 1000 mm.

A capital matogrossense recebe precipitações médias da ordem de 1400 mm/ano com predominância de chuvas convectivas com contribuição da orografia. A cidade de Chapada dos Guimarães, que compreende as nascentes da bacia do rio Coxipó, recebe totais pluviométricos da ordem de 2100 mm/ano. A Figura 12 apresenta as isoietas para Mato Grosso.

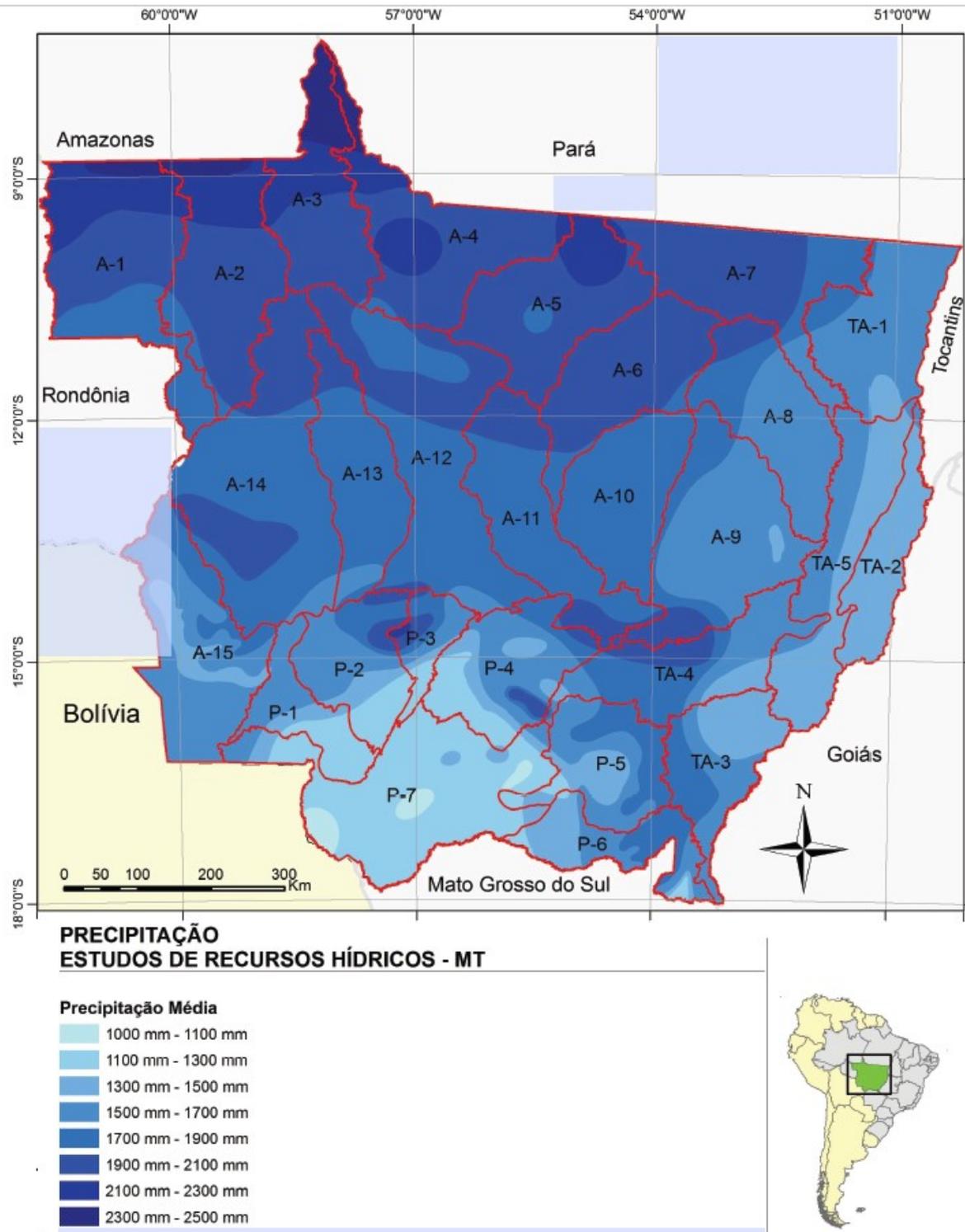


Figura 12. Isoietas de precipitação para o Estado de Mato Grosso.

Fonte: ZSEE (2002) *apud* MATO GROSSO (2009).

3.5 SELEÇÃO DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS E DE EVAPORAÇÃO

A seleção preliminar dos postos pluviométricos e evaporimétricos incluídos no estudo foram através da lógica de satisfazer os critérios elencados a seguir:

- i. O período de dados disponíveis com pelo menos cinco anos; e,
- ii. Preferência para utilização de dados consistidos e representativos da região baixada cuiabana ou depressão cuiabana;

O estudo foi realizado com base em dados dos postos pluviométricos existentes na região. O levantamento das estações pluviométricas bem como os dados de evapotranspiração/evaporação foi realizado em órgãos responsáveis pelo monitoramento hidrológico como ANA (Hidroweb), INMET/INPE (BDMEP), CPRM, INPE (SIDA) e UFMT.

As características das estações pesquisadas e a espacialização são apresentadas no Quadro 3 e na Figura 13, respectivamente. Percebe-se que há uma concentração de postos de monitoramento na cidade de Cuiabá.

Quadro 3: Características das estações pluviométricas estudadas.

Estação Pluviométrica			Entidade Operativa	Altitude (m)	Localização		Dados Históricos Consistidos		Média Anual (mm)
Código	Nome	Município			Latitude	Longitude	Incício	Fim	
01555000	Ponte Alta	Chapada dos Guimarães	CPRM	610	15:24:28	55:17:48	Jan/1967	Jan/2001	1910,0
01555001	Chapada dos Guimarães	Chapada dos Guimarães	FURNAS	529	15:28:08	55:43:44	Jul/1968	Dez/2012	2277,8
01555010	Rio Quilombo	Chapada dos Guimarães	FURNAS	297	15:12:49	55:38:28	Abr/2001	Dez/2011	1497,4
01556002	Cuiabá	Várzea Grande	INMET	160	15:37:12,5	56:06:32	Jan/1961	Dez/2015	1390,6
01556004	Cuiabá	Várzea Grande	DEPV	186	15:38:00	56:06:00	Mai/1963	Dez/1984	1209,4
01556006	Fazenda Seco	Barão de Melgaço	CPRM	156	15:38:07	56:36:42	Dez/1969	Dez/2006	1352,7
01556007	Santa Edwiges	Jaciara	CPRM	169	15:41:55	55:08:08	Abr/1975	Dez/2006	1410,4
01556009	Mestre Bombled	Cuiabá	UFMT	182	15:36:25,5	56:03:39	Jan/1989	Dez/2012	1396,3
01556010	Estância Bela Vista	Cuiabá	FURNAS	188	15:16:28	56:07:42	Out/2006	Dez/2007	--
01556013	MT-351/ Soberbo	Cuiabá	FURNAS	270	15:11:36	56:00:01	Out/2006	Dez/2007	--
³ 01556015	CUIABÁ	Cuiabá	ANA	155	15:37:00	56:06:36	Dez/2013	Dez/2017	1487,2
³ 01556016	Rio Coxipó – ABB	Cuiabá	SEMA	158	15:37:03	56:03:04	Dez/2013	Dez/2017	1323,1

³Estação com dados pluviográficos, disponível no portal Telemetria da ANA.

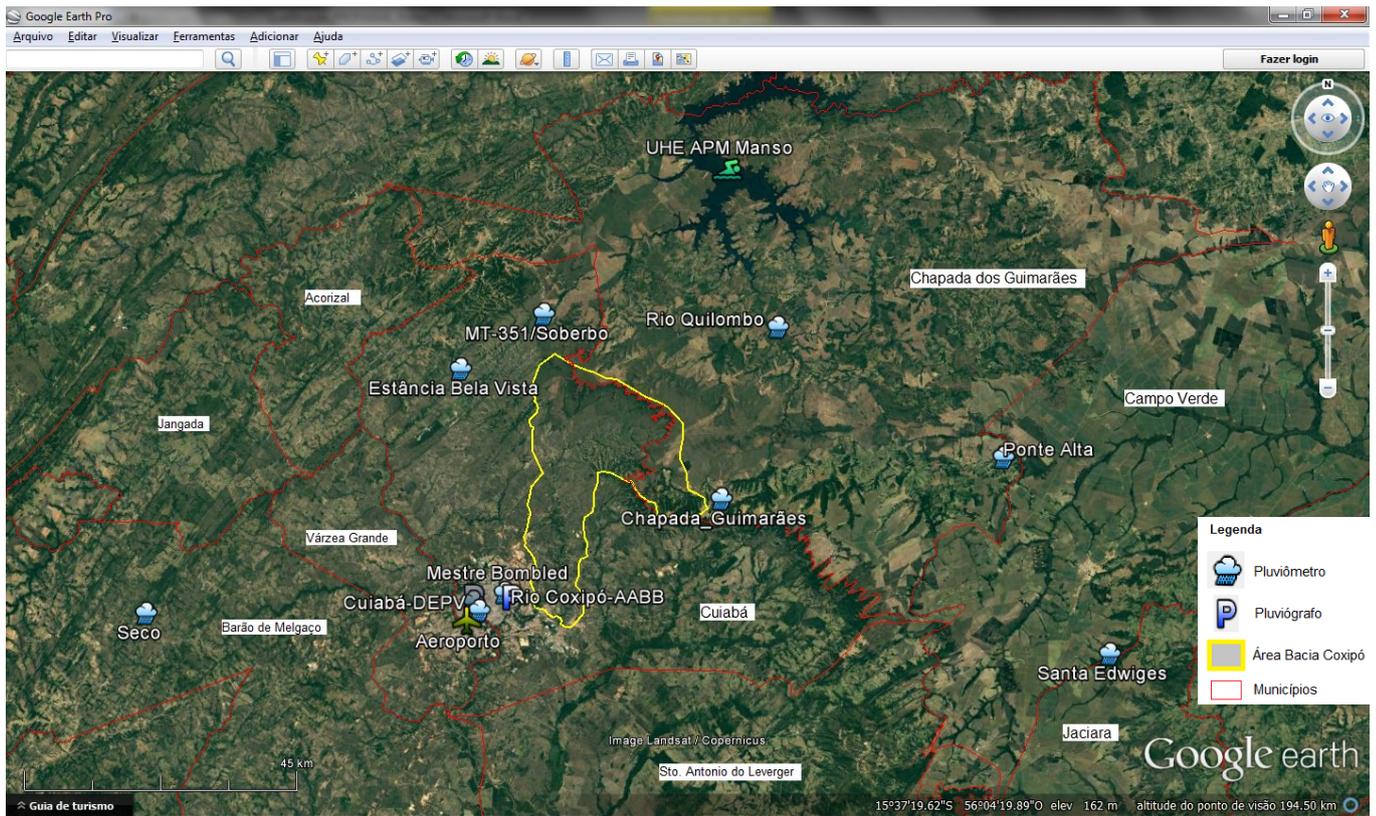


Figura 13. Espacialização das estações pluviométricas analisadas.

Os dados foram trabalhados no software “Manejo de dados Hidroweb”, versão 4.5, do grupo de pesquisa MGB-IPH da UFRGS, disponível para download no seguinte endereço: <<https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/downloads/mgb-iph-2017>>. Esta ferramenta visa facilitar o uso de dados de chuva, vazão, clima e cota disponibilizada pela ANA. Basicamente, no tocante aos dados de precipitação, a ferramenta converte os dados do Hidroweb em colunas e apresenta o gráfico de disponibilidade temporal dos postos, porém sem distinguir dados brutos dos consistidos. Na Figura 14 é apresentado este gráfico para os postos estudados.

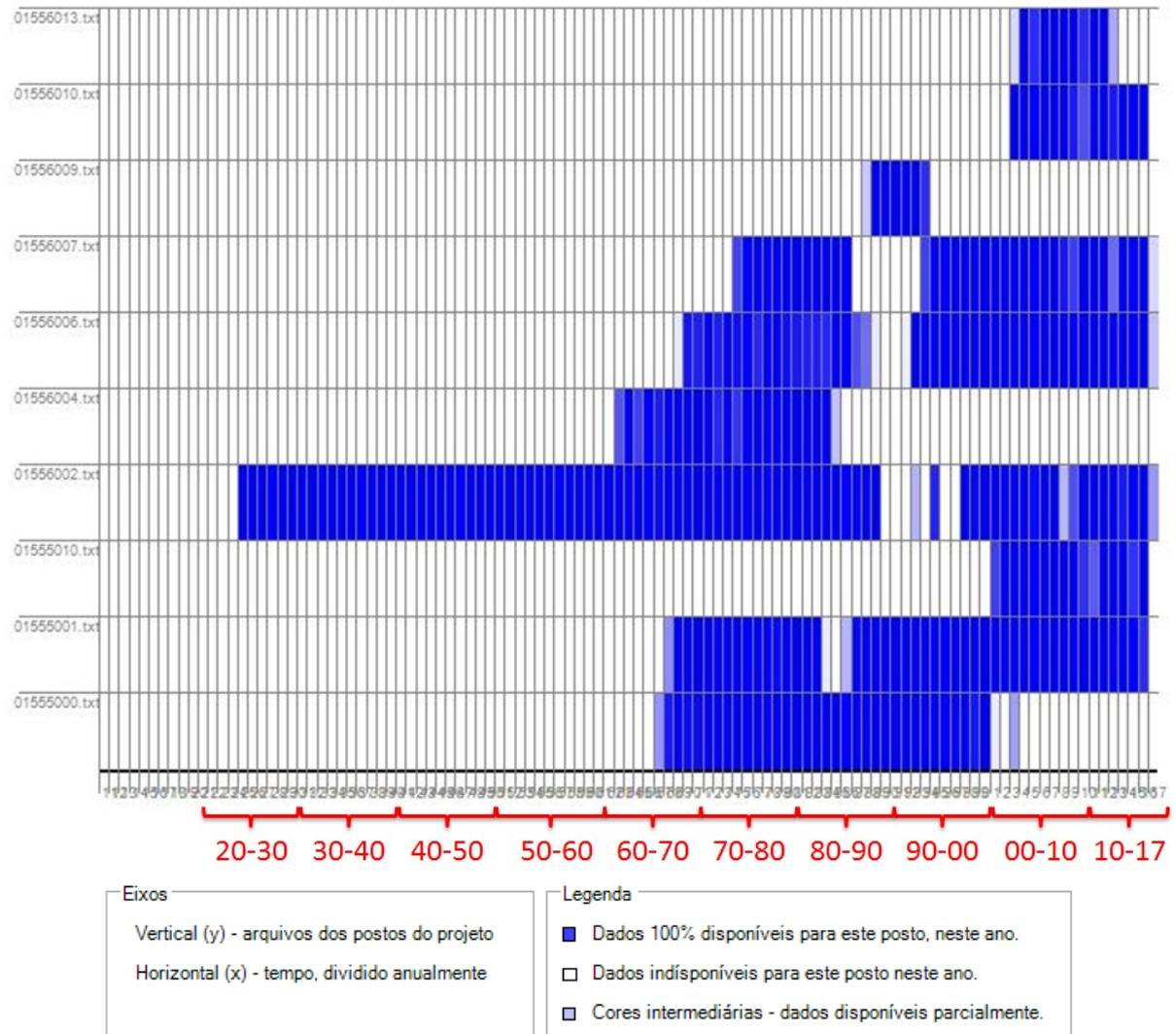


Figura 14. Disponibilidade temporal dos postos pluviométricos na região de estudo.

3.6 MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO DISPONÍVEL

Foi realizado por Rocha (2003) na seção do rio Coxipó, nas coordenadas geográficas Latitude Sul 15°36'36" e Longitude Oeste 56°00'47", no período de janeiro de 1986 a dezembro de 2001, com medições mensais através de molinete hidrométrico e metodologia do DNAEE. A seção monitorada possui área de drenagem de 678 km². A Figura 15 apresenta do lado direito a série histórica de vazões no Rio Coxipó em forma de hidrograma e no lado esquerdo a curva de permanência dessas vazões.

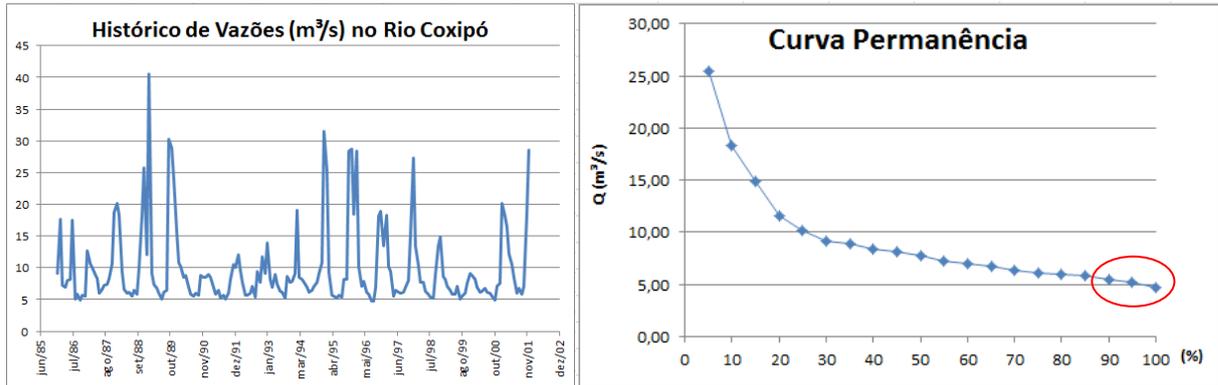


Figura 15. Série de vazões e curva de permanência para o rio Coxipó.

Fonte: Adaptado de ROCHA (2003).

Percebe-se que as vazões com alta permanência (Q90%, Q95% e Q100%), em destaque no gráfico, são similares próximas de 5 m³/s, isto reflete a recarga natural (vazão de base) do rio Coxipó que se deve pela sua formação geológica e de solos permeáveis nas cabeceiras.

Os valores exatos da Q95% e Q90% da série histórica são, respectivamente, 5,2 m³/s e 5,5 m³/s. Também foi calculada a Q_{7,10}, vazão com média móvel de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de recorrência, calculado conforme Tucci (2009), resultando no valor de 4,84 m³/s.

Na Figura 16 é apresentado o gráfico box-plot dos valores da série histórica. Percebe-se que a grande maioria dos valores estão na faixa entre 5 m³/s e 15 m³/s. Apresenta-se muitos *outliers* e isto pode indicar uma não normalidade dos valores, porém salienta-se que não é escopo deste trabalho estudar vazões máximas.

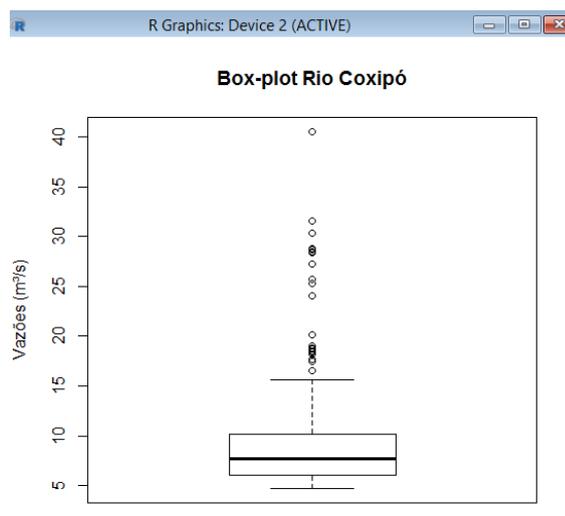


Figura 16. Gráfico box-plot para vazões do rio Coxipó.

Desta maneira, trabalhou-se com uma amostra de $N = 157$ valores mensais de vazão. A estatística descritiva dos dados utilizados e seu respectivo histograma estão representados na Figura 17.

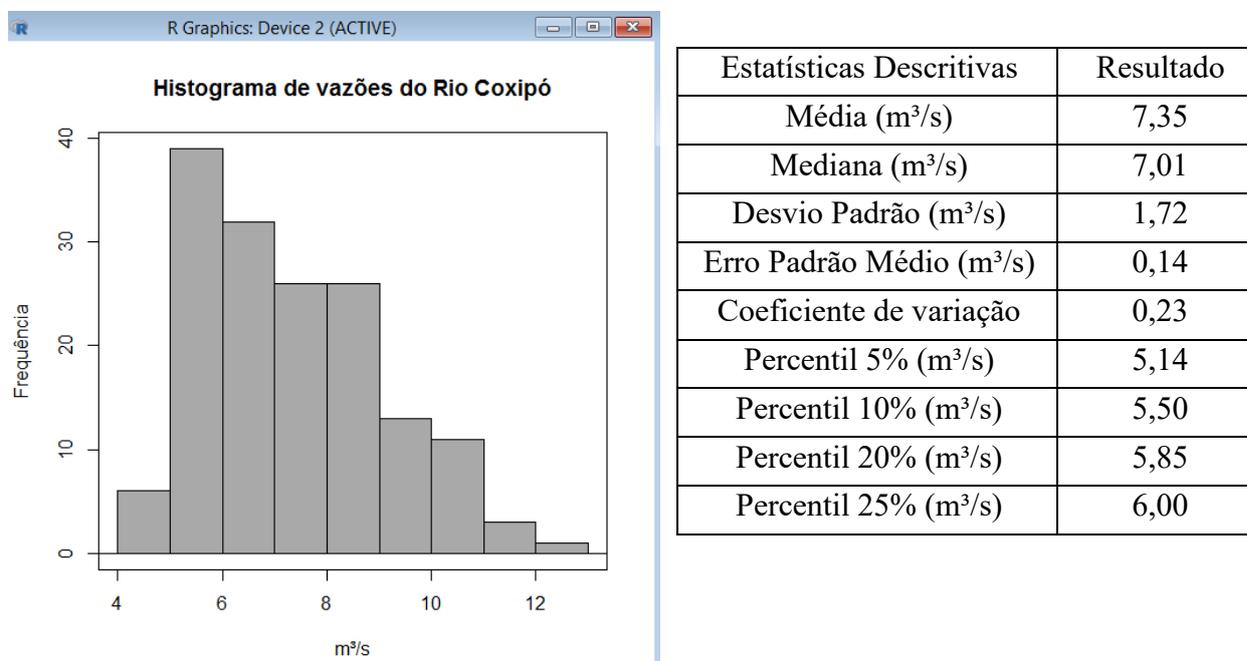


Figura 17. Histograma de frequência para o rio Coxipó e resumo das estatísticas descritivas.

Com estes valores, realizou-se Teste de Normalidade na série histórica pelos modelos Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, ambos no ambiente do software *R* versão 3.4.1 de 30/06/2017. Ambos os testes não possuem embasamentos suficientes para aceitar a hipótese nula de normalidade dos valores para um nível de significância de 95%.

Alguns autores como Medeiros e Naghettini (2001) e Euclides et al. (2006) entendem que a vazão de referência anual como a Q_{95} ou a $Q_{7,10}$, calculada com base na análise dos períodos críticos de estiagem, mantido fixo ao longo de todo o ano, tem restringido um maior uso da água em meses fora do período de estiagem. Entende-se que estudos sobre a sazonalidade das vazões utilizadas como referência para outorga de recursos hídricos configura em avanço no contexto político-legal brasileiro de recursos hídricos, como analisam Sankarasubramanian et al (2009) *apud* ANA (2015).

4. METODOLOGIA

De maneira geral, os Órgãos Gestores de recursos hídricos ainda carecem de estudos concisos para estimativas de vazões com alta permanência e que geralmente são utilizadas como vazão de referência. Uma das principais lacunas são as pequenas bacias hidrográficas sem estações de monitoramento ou com dados escassos, porém diversos trabalhos relatam a dificuldade na aquisição de dados apurados em bacias de médio porte e até de grande porte (COLLISCHONN, 2006; PALANISAMY E WORMAN, 2014; PÁDUA, 2015; HORN, 2016; FRIEDRICH, 2016; MACHADO, 2016; FARMER E KOLTUN, 2017).

Conforme já explicitado, são duas principais abordagens para estimativa da vazão de referência: Regionalização de Vazão ou Modelagem Chuva-Vazão. Há casos corriqueiros, principalmente na região norte do país, em que a regionalização não satisfaz a precisão desejada, restando a segunda opção.

Neste trabalho estudou-se o Método Silveira (1997), denotado como *MS*. A simulação da vazão de alta permanência pelo *MS* foi realizada utilizando o software Sispb disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Em face da necessidade de celeridade na análise de licenciamento ambiental e outorga de direito de uso de recursos hídricos, este estudo se encaminha na forma de orientação aos técnicos de Órgãos Gestores para utilização do *MS*, indicando alternativas para aquisição e *input* de dados para o modelo, analisando-os em termos de facilidade de acesso e exatidão no resultado.

Foi definido o Estado de Mato Grosso para estudo de caso e buscaram-se bacias hidrográficas que possuíssem dados monitorados para comparar com a estimativa do *MS*. Evidencia-se a deficiência no monitoramento hidrológico em bacias de médio porte na referida região.

No item 4.1 se apresenta a metodologia de estimativa da área de drenagem da bacia hidrográfica em estudo. Devido à escassez de dados na área, deparou-se com a necessidade de estabelecer critérios de decisão sobre os dados a serem utilizados, estes são descritos no item 4.2. Foram estabelecidos critérios para escolha das estações pluviométricas, para dados de evaporação ou evapotranspiração, quando disponíveis e, para utilização de chuva de satélite.

O item 4.3 detalha o procedimento para geração dos cenários utilizados nas simulações. E, finalmente no item 4.4 é apresentado o procedimento para avaliação do desempenho do modelo estudado.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A delimitação da área de drenagem foi realizada com auxílio de ferramenta computacional do pacote “hydrology” do software ArcGIS® 10 utilizando-se de imagens do satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e de dados vetoriais, disponibilizadas pelo *Earth Explorer* <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> do *United States Geological Survey* (USGS).

A área de drenagem até o ponto de interesse de estudo, seção de monitoramento de vazões, é de 678 km².

O programa *Earth Explorer* disponibiliza dados topográficos do SRTM da NASA resultando no Modelo Digital de Elevação (MDE) atualmente disponível com grade de um arco de segundo para todo o globo terrestre (Produto *SRTM 1 Arc-Second Global*), ou seja, com uma resolução espacial de 30 metros.

É interessante salientar que os dados atuais estão disponibilizados no formato *TIFF* e com altitudes parcialmente corrigidas, eliminando etapas de conversão de formatos e correção de altitudes incoerentes que dificultam sua utilização nos programas *SIG*. Na Figura 18 é ilustrada a tela do *Earth Explorer*.

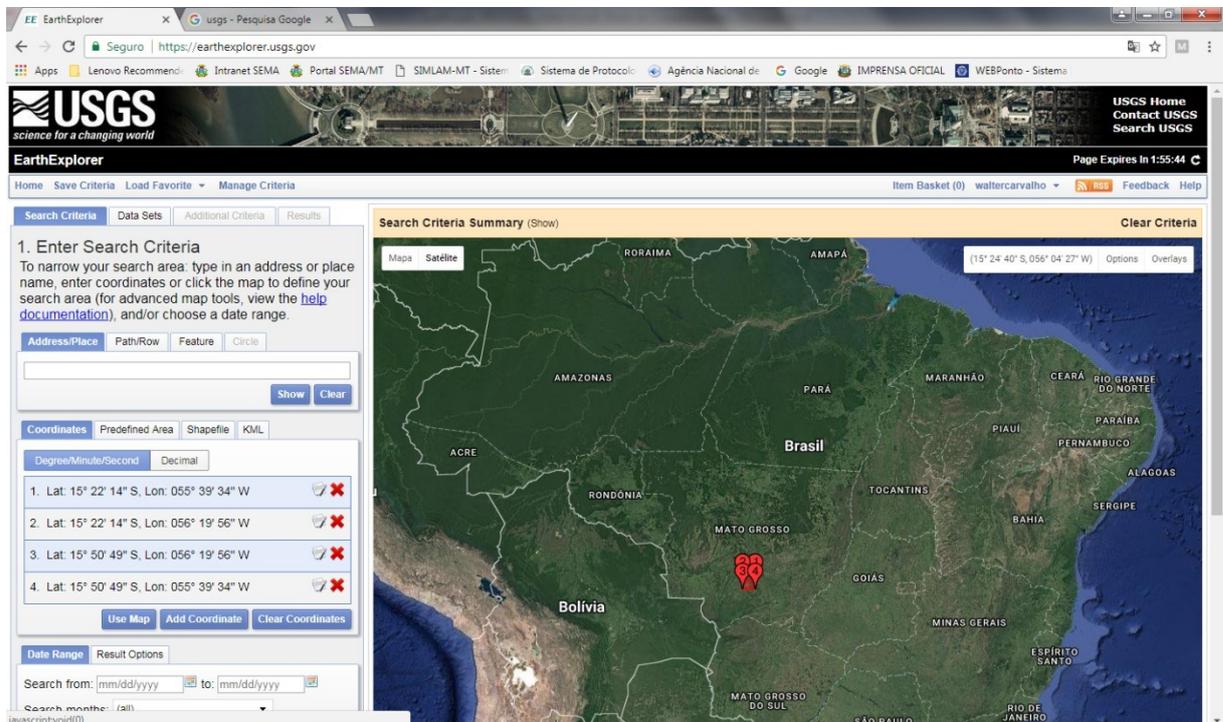


Figura 18. Página do Site *Earth Explorer* do USGS com a área do MDE selecionada.

4.2 DADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO

4.2.1 Pluviometria

Os dados pluviométricos que foram utilizados no trabalho são provenientes da rede disponibilizada pela ANA e pelo INMET/INPE, não obstante, também foram adquiridos os dados monitorados pela UFMT.

Inicialmente foram selecionadas 10 estações pluviométricas e 2 pluviográficas pelo critério de pré-seleção explicado no item 3.5 deste trabalho. No Quadro 4 está pormenorizado o total anual precipitado em cada posto analisado, inclusive selecionada a série temporal de medição de vazão disponível para estudo.

A ANA disponibiliza no Sistema Hidroweb as informações hidrológicas e o INMET/INPE no Sistema BDMEP, ambas *online*. Foram selecionados e trabalhados apenas com os dados já consistidos.

Após a análise preliminar, procedeu-se uma análise mais apurada dos postos pluviométricos a serem utilizados. Desta maneira foram acrescentados mais dois critérios para seleção dos postos:

- i. Período de dados pluviométricos coincidentes com o período de dados pluviométricos;
- ii. Preferência por estações ainda em operação;

Devido a esta limitação de disponibilidade da série de vazão ao período de janeiro/1986 a dezembro/2001, os dois postos pluviográficos foram excluídos bem como as estações pluviométricas Rio Quilombo (Estação 07), Estância Bela Vista (Estação 09) e Soberbo (Estação 10).

A estação CUIABÁ do INMET/INPE (Estação 01) é a mais antiga e longeva, porém possui muitas falhas conforme pode ser observado no Quadro 4 quanto as falhas na série histórica, inclusive bastante falhas no período de 1990 a 1997, período de disponibilidade da série de vazões. Portanto, esta estação também foi excluída do estudo.

A Estação CUIABÁ-DEPV (Estação 03) parou sua operação no ano de 1984, não possuindo dados coincidentes com a série histórica de vazões.

Sabe-se que quanto maior a série histórica mais se ganha em representatividade estatística. Em hidrologia e climatologia se utiliza muito a série representativa de trinta anos a exemplo do INPE nos cálculos das Normais Climatológicas, porém é quase inexistente uma série longeva como esta no Estado de Mato Grosso.

Vê-se condicionantes menos criteriosas como a SEMA (2008) que utilizou o mínimo de 5 anos para realizar o Estudo de Regionalização de vazões de Mato Grosso e Seplan (2012) que utilizou o mínimo de 10 anos para análise pluviométrica de Mato Grosso. Neste trabalho preferiu-se seguir o critério conservador, excluindo-se da análise os postos pluviométricos com menos de 10 anos de série histórica diária contínua, excluindo-se as falhas.

Previamente haviam sido selecionados os postos que atendem aos critérios definidos, sendo eles: Mestre Bombled (Estação 02), Chapada dos Guimarães (Estação 04) e Ponte Alta (Estação 05).

Porém ao se identificar o distanciamento do Posto Ponte Alta até a seção de monitoramento de vazão, conforme se verifica na Figura 19, distante aproximadamente 80,5 km, percebeu-se que esta estação incide pouca influência sobre a bacia do Rio Coxipó. Também foram identificadas falhas em todo o mês de fevereiro do ano de 1999 preferindo-se excluir o posto para estudo.

Desta maneira foram utilizados apenas dois postos pluviométricos que atenderam os requisitos da pesquisa, são eles: **Mestre Bombled** (Estação 02) e **Chapada dos Guimarães** (Estação 04). O período de análise foi de janeiro/1989 a dezembro/2001 (13 anos de série histórica), conforme se observa no Quadro 4.

Quadro 04. Totais anuais de precipitação e disponibilidade temporal.

Ano	PLUVIÔMETROS - mm/ano										PLUVIÓGRAFOS - mm/ano	
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	10	11
1961	1129,5											
1962	1153,6											
1963	1096,5		394,7									
1964	1146,2		1163,3									
1965	1357,6		1071,7									
1966	1064,8		995,1									
1967	1160,5		1125,2		252,6							
1968	1588,6		1506,8	719,5	1706,2							
1969	999,2		792	1949,6	2491,9	--						
1970	1305,8		764,6	1927,1	3155,8	1344,1						
1971	1243,2		1156,2	1949,3	2700,1	1267,9						
1972	1538,8		1109,3	2103,2	4391	1241,4						
1973	1386,1		1206,5	1932,3	1872	1181,4						
1974	1356,4		1413	2290	1982,5	1710,1						
1975	1274		1122,5	1839,9	1715,3	1329,8		1358,2				
1976	1273,7		1173,9	2089	1952,5	1322,4		1349,7				
1977	1563,5		1217,3	1613,3	1631	1171,7		1381,4				
1978	1533		1295,8	1975,3	2179,3	1409,7		1616,3				
1979	1253,5		1257,3	1847,5	2016,1	1659,1		1632,7				
1980	1561		1353,6	2516	1973,5	1672,1		1644,5				
1981	1290,1		1195,3	2162,4	1780,2	1415,3		1635,1				
1982	1275		1301,9	2332,3	1499,9	1278,1		1442,6				
1983	1829,6		1516,4	2447,6	1942,4	1587,5		1246,4				
1984	1247,6		1347,4	204,4	1738,5	1427,6		606,7				
1985	1201,5			--	1683,9	1146,2		--				
1986	1405,6			1404,3	1540	1256,3		--				
1987	1359,8			2263,9	1717,6	1305,3		--				
1988	1675,6			1996,7	1674	1414,7		--				
1989	1796,5	1939		2540	2088,6	--		--				
1990	--	1217,9		2296,2	1385,9	--		--				
1991	--	1040,5		1857,5	1516,9	--		--				
1992	48,3	1283		2246,9	1833,7	--		--				
1993	579,3	1197,3		1669,9	1369,9	1115,4		--				
1994	--	1446		2158,3	1888,8	1491,3		1325,6				
1995	1516,5	1578,1		3291,8	1865	1705,9		1781,7				
1996	--	1471,1		2364,9	1818,3	1451,3		1259,3				
1997	--	1300,2		2225,7	2136,2	1272,1		1668,9				
1998	1611,8	1488,5		1923,1	1658,1	1351,5		1270,8				
1999	1611,8	1141,4		1853,5	1610,9	889		1007,9				
2000	1249	1160		1981	1557,7	1186,4		1143,8				
2001	1225,8	1546,9		2517,8	209,6	1440,7	1034,2	1553,6				
2002	1172,5	1282,1		1884,6		1122,9	1555,6	1122,2				
2003	1371,7	1465,3		1928,8		1399,6	1425,9	1761,8				
2004	1177	1323,8		1827,4		1334,7	1367	1041,7				
2005	966,5	1122		2034,5		1152,4	1496,7	1167,5				
2006	1517,7	1720,2		3045,2		1599	1905,5	1616,5	453,4	511,2		
2007	1604	1628,4		3146,2			1456,5		1323	1743,8		
2008	604,9	1077,9		--			1631,3					
2009	954,2	1570,8		--			1141,1					
2010	1596,5	1451,6		--			1394,4					
2011	1673	1491,8		4182,1			1643,6					
2012	1620,1	1567		4345,2								
2013	1524,8									182,6	209,8	
2014	1657,3									1333,6	1665,8	
2015	1382,4									1162,2	1324,1	
2016										1732,8	979,4	
2017										1720,2	322,4	
Média	1390,6	1396,3	1209,4	2277,8	1910,0	1352,6	1497,4	1410,4	1323	1743,8	1487,20	1323,10

LEGENDA

 Falhas excedendo a um mês

 Sem dados disponíveis

 Período com Série de vazão disponível

 Período selecionado

Identificação dos postos

01. Cuiabá-INMET

02. Mestre Bombled (UFMT)

03. Cuiabá-DEPV

04. Chapada dos Guimarães

05. Ponte Alta

06. Fazenda Seco

07. Rio Quilombo

08. Santa Edwiges

09. Estância Bela Vista

10. Soberbo

11. Cuiabá Pluviógrafo

12. Rio Coxipó/AABB



Figura 19. Distâncias dos postos até o ponto de monitoramento de vazão no rio Coxipó.

4.2.2 Média de precipitação na bacia

Resolveu-se utilizar a média de precipitação na bacia porque reflete uma lâmina d'água de altura uniforme sobre toda a área considerada, equilibrando-se, desta maneira, a variabilidade das chuvas entre as estações. Foram realizadas as médias pela combinação entre o método de Thiessen e isoietas de precipitação (Método COM) e pelo método da Ponderação pelo Inverso do Quadrado da Distância (Método IDW).

Os postos utilizados para cálculo da média de precipitação na bacia do rio Coxipó foram escolhidos conforme explicitado no item 4.2.1, cito postos: Mestre Bombled (UFMT) e Chapada dos Guimarães.

O cálculo das áreas de forma análoga à dos polígonos de Thiessen foi realizado com base na conformação geomorfológica da bacia, conforme dissertado no item 3 deste trabalho, dividindo o rio Coxipó em área de planalto relativo ao seu alto curso e área de planície relativo ao baixo e médio curso. O valor das áreas de influência é apresentado no Quadro 05.

Quadro 05. Pesos de cada posto pluviométrico pelo método de Thiessen.

Posto i	Área de Influência (Ai) em km ²	Fator de Peso
Mestre Bombled (UFMT)	269,5	~0,40
Chapada dos Guimarães	408,5	~0,60
Total	678,0	1,0

Também foram utilizadas as isoietas de precipitação disponibilizadas no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso (MATO GROSSO, 2009) conforme discutido no item 3.4. Desta maneira é apresentado na Figura 20, as áreas de influência dos Postos Pluviométricos na bacia do rio Coxipó e as isoietas de precipitação.

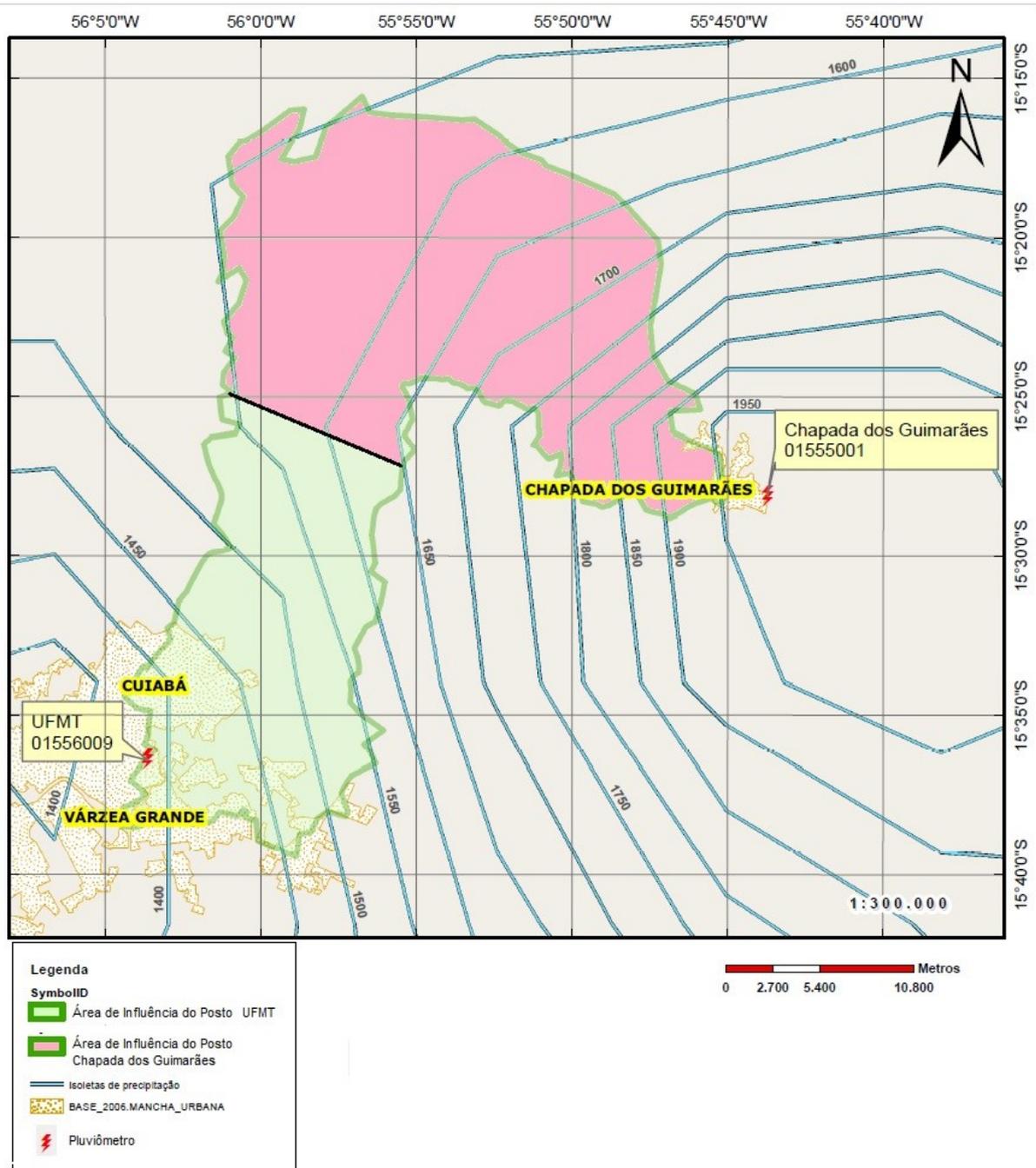


Figura 20. Áreas de influência dos Postos Pluviométricos na bacia do rio Coxipó e isoietas de precipitação em mm/ano.

Para o método das isoietas, o peso da precipitação média na área de influência do posto pluviométrico em relação a precipitação média anual das isoietas é calculado assim como descrito na revisão bibliográfica, item 2.2.3.

De posse destas informações, pode-se calcular a combinação dos métodos dos Polígonos de Thiessen e isoietas de precipitação (método COM), sendo o resultado da Equação [13] para o Posto Mestre Bombled (UFMT) é $w_1 = 0,367$ e para o Posto Chapada dos Guimarães é $w_2 = 0,633$. O Método COM resulta da precipitação ponderada conforme Equação [14].

Já para o Método IDW, a precipitação resultante da Equação [12] é fruto da ponderação das distâncias apresentadas na Figura 19, ou seja, 6,3 km de distância do Posto Mestre Bombled (UFMT) até a seção de monitoramento de vazão e 34,3 km de distância do Posto Chapada dos Guimarães.

Vale ressaltar que pela percepção dos métodos aumenta-se a grandeza de postos pluviométricos diferentes. O método COM resulta em maior peso ao Posto Chapada dos Guimarães por possuir maior área de influência na bacia e o método IDW pondera maior peso para o Posto Mestre Bombled (UFMT) por estar mais próximo da estação de monitoramento de vazão.

4.2.3 Dados de Evaporação e Evapotranspiração

Os dados de evaporação e evapotranspiração são os mais complexos de se adquirir. Na bacia em análise somente há dados disponível no Sistema BDMEP/INPE em uma única estação, denominada Estação Cuiabá, sendo que são dados de evaporação de Piché. A média anual é de 1411,9 mm. Porém a série não é contínua nem condizente com a série de vazão monitorada, possuindo muitas falhas no período entre 1989 e 2001. Então, o uso desta estação foi descartado.

O programa Giovanni da NASA também possui satélites que monitoram a evapotranspiração, dentre eles, está disponível o satélite NLDAS model com o produto MOS125 que disponibiliza dados horários de evapotranspiração total com dados históricos de janeiro/1979 até maio/2018, não obstante, este satélite não contempla a região da América Latina.

Já sobre os dados de evaporação, a UFMT possui dados monitorados por tanque Classe A, porém, estes dados não estavam tabulados e sintetizados. Através de parceria com a UFMT/DESA, realizou-se a tabulação destes dados para possibilitar a modelagem.

A série histórica da Estação Mestre Bombled de evaporação pelo Tanque Classe A possui dados desde janeiro de 1989 até maio de 2018. A Evaporação média total anual no posto é de 1916,15 mm, a média de evaporação diária da série histórica é de 5,26 mm com um mínimo medido de 0,0 mm e máximo diário de 13,9 mm. Os dados totais das médias mensais de evaporação pelo Tanque Classe A (EVP) da estação UFMT são apresentados no Quadro 06.

Decidiu-se também utilizar os valores de evapotranspiração de referência (EVTR) estimado por especialistas da ANA a partir da interpolação dos dados das estações meteorológicas da base da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, conhecido como FAOCLIM.

O método que o *Food and Agriculture Organization* (FAO) utiliza é o Penman-Monteith. Com estes dados, os especialistas da ANA estimaram a evapotranspiração com uma garantia de 80% de permanência no tempo para os municípios brasileiros. Para o município de Cuiabá-MT os valores mensais são apresentados no Quadro 06.

Quadro 06. Evapotranspiração de referência mensal e evaporação real mensal para Cuiabá-MT.

Mês	EVTR (mm) Cuiabá	EVP (mm) UFMT	Mês	EVTR (mm) Cuiabá	EVP (mm) UFMT
Jan	128,0	157,4	Jul	89,0	156,9
Fev	111,0	144,0	Ago	116,0	178,6
Mar	115,0	154,0	Set	125,0	182,4
Abr	103,0	147,1	Out	137,0	187,3
Mai	90,0	140,6	Nov	131,0	166,6
Jun	77,0	135,7	Dez	128,0	165,9
Fonte: SEMA (2008) e DESA-UFMT			Total	1350,0	1916,3

Conforme Tucci (2005), os dados de tanque Classe A devem ser corrigidos já que superestimam a evapotranspiração de lagos e reservatórios devido a sua dimensão. Desta maneira, considerando a relação EVTR/EVP para o total anual, o fator de correção é próximo de 0,7, sendo este valor bem coerente com bibliografias específicas como Tucci (2009). Portanto, foi utilizado o fator de correção de 0,7 para utilização dos dados de evaporação (EVP).

4.2.4 Dados de Satélite

Os dados de satélite foram obtidos pelo programa GIOVANNI/NASA <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>> que disponibilizam dados de estimativa de precipitação e estimativa de evapotranspiração potencial.

Basta selecionar o produto do satélite requerido e indicar a janela “séries históricas” (*time series*) conforme a Figura 21. O satélite TRMM possui um *pixel* de **0,25°** ou **15'**, o que

resulta na precisão de 25km/25km, ou, seja, 625 km². Existe disponível dados de chuvas diárias ou a cada 3 horas desde 1998 até os dias atuais.

The screenshot shows the GIOVANNI NASA web interface. The main content area is titled "GIOVANNI The Bridge Between Data and Science" and includes a "Select Plot" section with a dropdown menu set to "Time Series: Area-Averaged". Below this, there are fields for "Select Date Range (UTC)" (2017-06-01 to 2017-08-31) and "Select Region (Bounding Box or Shape)" (-56.25, -15.75, -56, -15.5). A "Select Variables" section on the left lists various categories, with "Hydrology (93)" and "Precipitação" highlighted. A table of matching variables is displayed, with the following data:

Variable	Source	Temp. Res.	Spat. Res.	Begin Date	End Date	Units	Vert. Slice
<input checked="" type="checkbox"/> Precipitation Rate (TRMM_3B42_Daily_v7)	TRMM	Daily	0.25 °	1998-01-01	2017-08-31	mm/day	-
<input type="checkbox"/> Precipitation Total (NLDAS_FORA0125_H_v002)	NLDAS Model	Hourly	0.125 °	1979-01-01	2017-10-30	kg/m ²	-
<input type="checkbox"/> Precipitation Monthly Total (NLDAS_FORA0125_M_v002)	NLDAS Model	Monthly	0.125 °	1979-01-01	2017-09-30	kg/m ²	-

At the bottom of the interface, there are buttons for "Help", "Reset", "Feedback", "Plot Data", and "Go to Results". The browser's taskbar at the bottom shows several open files, including "GIOVANNI-output.png", "g4.areaAvgTimeSer...", "32741.xls", and "32590 (1).xls".

Figura 21. Página do Giovanni NASA e sequência para obtenção de dados de satélite.

Foram utilizados os dados diários. O produto é apresentado em forma gráfica, com possibilidade de *download* no formato *csv*, podendo ser convertido ao formato *xls* compatível com *Excel* da Microsoft.

O mérito e ponto fundamental da precipitação estimada por satélite é o fato de não possuir falhas na série histórica, podendo consequentemente, servir de balizador para estações convencionais que são passíveis de falhas, principalmente as sistemáticas.

As coordenadas das quadrículas monitoradas e disponibilizadas pelo satélite são representadas em vermelho tracejado na Figura 22. Percebe-se que foi necessária a aquisição dos dados em duas quadrículas para abarcar toda a bacia hidrográfica.

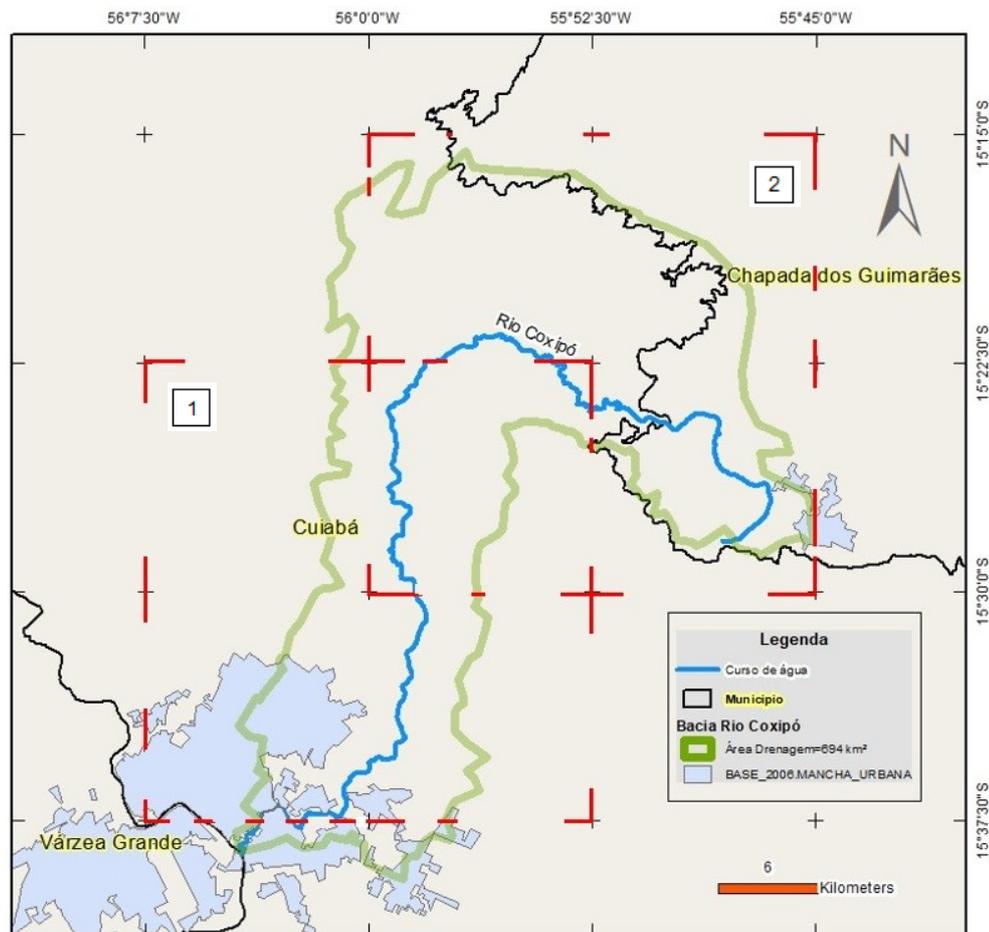


Figura 22. Quadrículas de monitoramento pelo satélite TRMM da NASA. Dimensões de cada quadrícula = 25 km x 25 km, representadas em vermelho. Onde a Quadrícula 1 abrange a foz da bacia representando cerca de 40% da área e a Quadrícula 2 abrange as cabeceiras representando 60% da área da bacia. Fonte: própria.

4.3 CRITÉRIOS E CENÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Foram criados 3 critérios para realizar as simulações:

Critério 1: Conforme Silveira (1997) que recomenda estudar o máximo de eventos de estiagens para permitir a melhor avaliação da representatividade dos resultados, salientando a utilização de pelo menos três anos de série histórica. Considera também como evento de estiagem o número de 7 dias antecedentes a amostragem com menos de 15 mm de chuva.

Critério 2: Conforme Horn (2016) adaptado por Friedrich (2017) que resumidamente se assume a aplicabilidade em bacias com área de drenagem até 1000 km²; valores de C_{inf} deve estar situado entre 0,1 e 0,6; o parâmetro K_{sub} deve ter uma diferença relativa entre as três medições menor que 100% e em relação a limitação de chuvas antecedentes pode ser admitido 14 dias de controle com um total de até 30 mm de chuva, nenhuma excedendo a 5 mm por dia.

Critério 3: Conforme Instrução Normativa SEMA-MT nº 01 de 08/04/2009 (IN SEMA 01/2009) que estabelece os procedimentos a serem adotados para os processos de outorga com pequenas áreas de drenagem.

A IN SEMA 01/2009 determina que “a SEMA poderá solicitar do requerente de outorga, três (03) medições de vazão, no mínimo, na seção do corpo hídrico onde será realizada a intervenção passível de outorga”. Deve-se realizar 3 (três) medições de vazão (pelo método do molinete) no período de estiagem (meses de junho, julho e agosto), no corpo hídrico em que foi solicitada a captação, recomendando que as medições aconteçam na primeira quinzena de cada mês, com intervalos de aproximadamente trinta dias entre as medições e que seja anexada a ART (anotação de responsabilidade técnica do profissional).

Para avaliar a entrada de dados, para cada critério foram propostos 8 (oito) cenários com diferentes metodologias de aquisição de dados. Os cenários foram denominados de X1 a X8 de acordo com a entrada de dados, conforme se segue.

Dados de Chuva de Satélite

X1: chuva monitorada pelo satélite TRMM, produto 3B42 diário, com o quadrante do satélite voltado para a **foz** da bacia. Série hidrológica utilizada de 01/01/1998 a 31/12/2001 (4 anos).

X2: chuva monitorada pelo satélite TRMM, produto 3B42 diário, com o quadrante do satélite voltado para a **nascente** da bacia. Série hidrológica utilizada de 01/01/1998 a 31/12/2001 (4 anos).

X3: chuva monitorada pelo satélite TRMM, produto 3B42 diário, resultante da **média ponderada** dos quadrantes pela respectiva área de drenagem. Série hidrológica utilizada de 01/01/1998 a 31/12/2001 (4 anos).

Dados da Estação Climatológica

X4: chuva monitorada pela estação pluviométrica e evaporimétrica situada na Universidade Federal de Mato Grosso (**UFMT**) localizado próximo a estação fluviométrica do rio Coxipó. Série hidrológica utilizada de 01/01/1989 a 31/12/2001 (13 anos).

Dados de Pluviômetros da Rede Oficial

X5: resultado da metodologia Inverso do Quadrado da Distância (**IDW**) com dois postos pluviométricos e dados evaporimétricos do **Tanque Classe A** da estação climatológica na UFMT. Série hidrológica utilizada de 01/01/1989 a 31/12/2001 (13 anos).

X6: resultado da metodologia Inverso do Quadrado da Distância (**IDW**) com dois postos pluviométricos e dados de **evapotranspiração de referência** disponibilizado pela ANA. Série hidrológica utilizada de 01/01/1989 a 31/12/2001 (13 anos).

X7: resultado da metodologia combinada Polígonos de Thiessen e isoietas (**COM**) com dois postos pluviométricos e dados evapométricos do **Tanque Classe A** da estação climatológica na UFMT. Série hidrológica utilizada de 01/01/1989 a 31/12/2001 (13 anos).

X8: resultado da metodologia combinada Polígonos de Thiessen e isoietas (**COM**) com dois postos pluviométricos e dados de **evapotranspiração de referência** disponibilizado pela ANA. Série hidrológica utilizada de 01/01/1989 a 31/12/2001 (13 anos).

Há casos de inadequações da simulação, conforme se analisa no item 2.2.2. Nestes casos realizou-se a correção do parâmetro K_{sub} de forma iterativa. Desta maneira para cada critério, foi gerado um “sub-critério” que é o da correção do K_{sub} , que será denominado de “corr”, ficando então de X1 corr a X8 corr.

4.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO

A avaliação da exatidão dos resultados foi realizada pela comparação entre o gráfico box-plot dos resíduos das simulações e o valor real procurado, derivado do monitoramento de vazões no rio Coxipó realizado por Rocha (2003), já referenciado neste texto.

Os gráficos box-plot foram realizados considerando, conforme apresentado na Figura 23, a base da caixa do diagrama representa o primeiro quartil, Q_1 , a linha central representa a mediana, Q_2 , e o topo da caixa, o terceiro quartil, Q_3 . A distância entre Q_3 e Q_1 é o intervalo interquartil, IIQ. O limite do bigode inferior do diagrama, L_i , invisível no gráfico, é calculado como $Q_1 - (1,5.IIQ)$, e o limite superior, $L_s = Q_3 + (1,5.IIQ)$. Os valores que estiverem abaixo do limite inferior ou acima do limite superior são considerados atípicos, ou *outliers*.

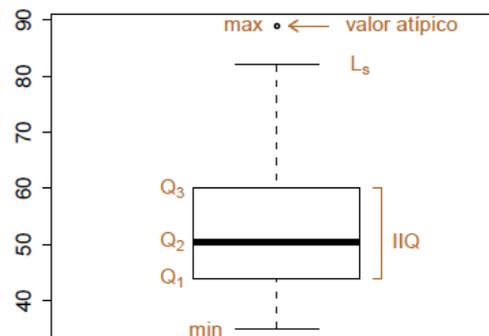


Figura 23. Diagrama em caixa (box-plot) explicado.

Considera-se que resíduos mais próximos do valor nulo significa menor diferença entre o valor simulado e o valor real observado, ou seja, mais exata é a modelagem. E quanto

menor o intervalo interquartil (IIQ), mais justa é a variação dos valores e melhor a precisão das estimativas.

Destarte, a comparação entre as vazões de alta permanência simuladas no *MS* e a vazão real observada será realizada em termos gráficos relativos à exatidão e precisão da modelagem. No entanto, visando diminuir a subjetividade de uma análise gráfica na avaliação de desempenho do modelo, escolheu-se analisar também o índice de frequência do erro.

O índice de frequência do erro indica o valor numérico que não foi superado pelos erros do modelo em uma determinada porcentagem de ocorrências (PEDROLLO, 2005 *apud* DORNELLES & GOLDENFUM, 2006). Este índice é calculado na forma da estatística descritiva *percentil*. Neste trabalho são utilizadas as frequências de erro para 50%, 75% e 90%. Para exemplificar uma avaliação com este índice, se o valor resultante para frequência de ocorrência do erro for 100 l/s para a frequência 90%, significa dizer que em noventa por cento das vezes em que foi realizada a simulação, o erro do modelo é menor que 100 l/s.

Também foi utilizada a estatística porcentagem BIAS (PBIAS) para avaliar a eficiência do modelo.

O PBIAS mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores do que as suas homólogas observadas (Gupta *et al.*, 1999 *apud* Christansen *et al.*, 2017). Um valor de PBIAS de 0,0 indica desempenho ideal, enquanto valores positivos indicam viés de subestimação e valores negativos indicam viés de superestimação (Moriasi *et al.*, 2007 *apud* Christansen *et al.*, 2017).

Ainda segundo este último autor, o desempenho do modelo para vazões é considerado muito bom se o PBIAS estiver entre 0 e mais ou menos (+/-) 10 por cento, bom se o PBIAS estiver entre +/- 10 e +/- 15 por cento, satisfatório se o PBIAS estiver entre +/- 15 e +/- 25 por cento, e insatisfatório se o PBIAS for maior que +/- 25 por cento.

A equação da estatística PBIAS é:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right] \times 100 \quad (15)$$

Sendo,

$Q_{obs,i}$ – vazão de referência observada, em l/s;

$Q_{sim,i}$ – vazão simulada no tempo i , em l/s;

5. RESULTADOS

Neste trabalho é visado analisar formas de realizar a simulação de vazão com alta permanência em bacias com poucas informações se baseando na metodologia *MS*. Para tal, criaram-se critérios de utilização conforme protocolos existentes e, através de cenários de

entrada dos dados necessários à modelagem, deram-se a identificação dos melhores procedimentos em função da exatidão nos resultados e facilidade de aquisição dos dados.

A lógica de análise dos dados neste trabalho é de uma abordagem com foco nos resultados. O produto final do trabalho será em forma de Orientação Técnica para ser disponibilizada aos Órgãos Gestores no intento de fomentar o gerenciamento dos recursos hídricos em bacias carentes de dados hidrológicos.

Buscou-se uma bacia de médio porte com disponibilidade de dados hidrológicos, para comparar com o resultado da modelagem *MS*. Como não é intenção do trabalho realizar uma análise de regressão, preferiu-se analisar a variação dos valores simulados em relação aos valores observados.

Foram criados 3 (três) Critérios para executar as simulações. Os critérios foram baseados em protocolos de usos do *MS*, conforme explicitados no item 2.4 deste trabalho.

No Quadro 7 apresenta-se um resumo dos critérios adotados para realização das simulações em tipos de dados de precipitação destacando o número de simulações realizadas para cada critério e cenário.

Também são apresentados neste Quadro 7, o número de resultados inadequados. Entendendo como inadequações quando, por algum motivo, o resultado da modelagem não puder ser aceito ou considerado incoerente. As inadequações ocorrem por dois motivos:

- Erro Padrão (EP) do modelo muito alto: geralmente quando as vazões medidas não representam o declínio do hidrograma, resulta no erro do modelo exageradamente alto; e,
- Os valores resultantes dos parâmetros do modelo extrapolam aos valores recomendados nos protocolos existentes: o modelo deve representar a realidade conforme indicado em Tucci (2005), sendo que há casos em que os resultados dos parâmetros ficam fora dos critérios estabelecidos nos protocolos existentes;

Desta maneira, entende-se que quanto menos inadequações forem geradas pelo critério/cenário em análise mais adequado este é e, por conseguinte, será considerado como melhor procedimento perante aos demais.

Vale salientar que apenas foram corrigidas as simulações que resultaram em valores inadequados, geralmente afetados diretamente pelo parâmetro K_{sub} .

Quadro 7. Resumo dos critérios definidos para realizar a simulação.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Definição*	Número de Simulações			Numero de inadequações			% inadequada
			C1	C2	C3	C1	C2	C3	
Satélite	X1	Foz da bacia	12	10	4	10	8	3	80,7
	X2	Nascente da bacia	14	10	4	10	8	3	75,0
	X3	Média ponderada dos quadrantes	11	11	4	9	9	4	84,6
Estação Climatológica	X4	Eatação UFMT	34	36	13	21	20	7	57,8
Média na bacia	X5	IDW / evap	35	33	13	20	17	7	54,3
	X6	IDW / EVTR	36	33	13	21	18	7	56,1
	X7	COM / evap	30	20	13	17	12	8	58,7
	X8	COM / EVTR	30	20	13	14	10	6	47,6
Satélite	X1 corr	Foz da bacia	10	8	3	3	2	2	33,3
	X2 corr	Nascente da bacia	10	8	3	2	2	2	28,6
	X3 corr	Média ponderada dos quadrantes	9	9	4	3	3	2	36,4
Estação Climatológica	X4 corr	Eatação UFMT	21	20	7	7	5	2	29,2
Média na bacia	X5 corr	IDW / evap	20	17	7	5	3	2	22,7
	X6 corr	IDW / EVTR	21	18	7	5	3	1	19,6
	X7 corr	COM / evap	17	12	8	3	0	1	10,8
	X8 corr	COM / EVTR	14	10	6	3	0	1	13,3

*IDW = Método do Inverso do Quadrado da Distância; COM = método combinado entre Polígonos de Thiessen e isoietas de precipitação; evap = dados de evaporação real; EVTR = evapotranspiração de referência; corr = correção do parâmetro K_{sub} .

Pelo Quadro 7 percebe-se que há muitas inadequações na modelagem, não obstante, a correção do parâmetro K_{sub} diminui esta percentagem. Desta maneira, os critérios que se utilizam de dados de satélite foram os que tiveram maiores percentagem de inadequações, variando de 75,0% a 84,6%, acompanhados pelos critérios que utilizam dados de estação climatológica e dados do método IDW, com percentagens de inadequações que variaram entre 54,3% a 57,8%. O método COM, que resulta da combinação entre os Polígonos de Thiessen e isoietas de precipitação utilizando dados de EVTR foram os que resultaram em menores inadequações, cerca de 50% das simulações.

Percebeu-se também que há casos que mesmo corrigindo o parâmetro K_{sub} , a modelagem ainda resulta em inadequação. Ao se corrigir o parâmetro K_{sub} , a percentagem de inadequação cai para menos que 40%. Neste caso, os critérios que utilizam a média de precipitação na bacia são os que apresentam as menores inadequações, variando entre 10,8% e 13,3%. Mais uma vez os critérios que se utilizam de dados de satélite foram os que tiveram maiores percentagem de inadequações, variando entre 28,6% e 36,4%.

De maneira geral, em mais de cinquenta por cento das vezes, para todos os critérios e cenários, haveria de se buscar outro período de estiagem para realizar a modelagem *MS*, porém, isto pode significar às vezes ter que esperar por mais de seis meses até o próximo período de seca, já que está se tratando do Estado de Mato Grosso que se situa na região Centro-Oeste e é marcado por períodos de seca e cheia bem definidos. Este é indicativo de que valha a pena corrigir o parâmetro K_{sub} nas modelagens *MS*.

A correção do parâmetro K_{sub} diminui o inconveniente da ampliação do tempo de análise, sendo uma alternativa viável para os casos de inadequações nos resultados.

5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações para as vazões de alta permanência usualmente utilizadas no gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, sendo elas a Q95%, Q90% e Q7,10.

Em uma análise preliminar para a vazão Q7,10, retornou valores com erros extremamente altos, de maneira que a modelagem *MS* subestimou demais o valor real da vazão. Neste prisma, identificou-se que o *MS* é impróprio para estimar a Q7,10 e então, não serão analisados os resultados para esta vazão já que a modelagem não se mostrou proveitosa para tal tarefa.

Destaca-se que outros trabalhos na mesma linha de pesquisa, cito Silveira (1997), Horn (2016) e Friedrich (2017), não abordam índices estatísticos para avaliação dos resultados, pois conduzem a pesquisa a formalização de protocolos de utilização do *MS*. Já no trabalho de Comini (2017) foi utilizado o Erro Quadrático médio (EQM) e o coeficiente de Willmott relativo. Nas unidades a seguir serão apresentados os resultados para cada Critério de uso estabelecido.

5.1.1 Resultados do Critério 1 (C1)

Para o Critério 1 foram realizadas 202 simulações com os valores de estiagem disponíveis, porém ocorreram 122 inadequações de resultados. Devido alta porcentagem de inadequações, pode-se considerar este Critério 1 muito restritivo, resultando em pouca flexibilidade na execução do *MS*.

Vale lembrar que o Critério C1 é referente às recomendações originais do *MS*, conforme Silveira (1997) e, portanto, são direcionadas a bacias com área de drenagem menores que 100 km². Isto justifica a alta porcentagem de inadequações, não obstante, ainda assim, os resultados podem ser considerados favoráveis.

Os resíduos das simulações realizadas com as condicionantes do C1 para a vazão Q95% e Q90% estão apresentados na Figura 24a e na Figura 24b. Já nas Figuras 24c e 24d apresentam os resíduos referentes à correção do parâmetro K_{sub} para a vazão Q95% e Q90%.

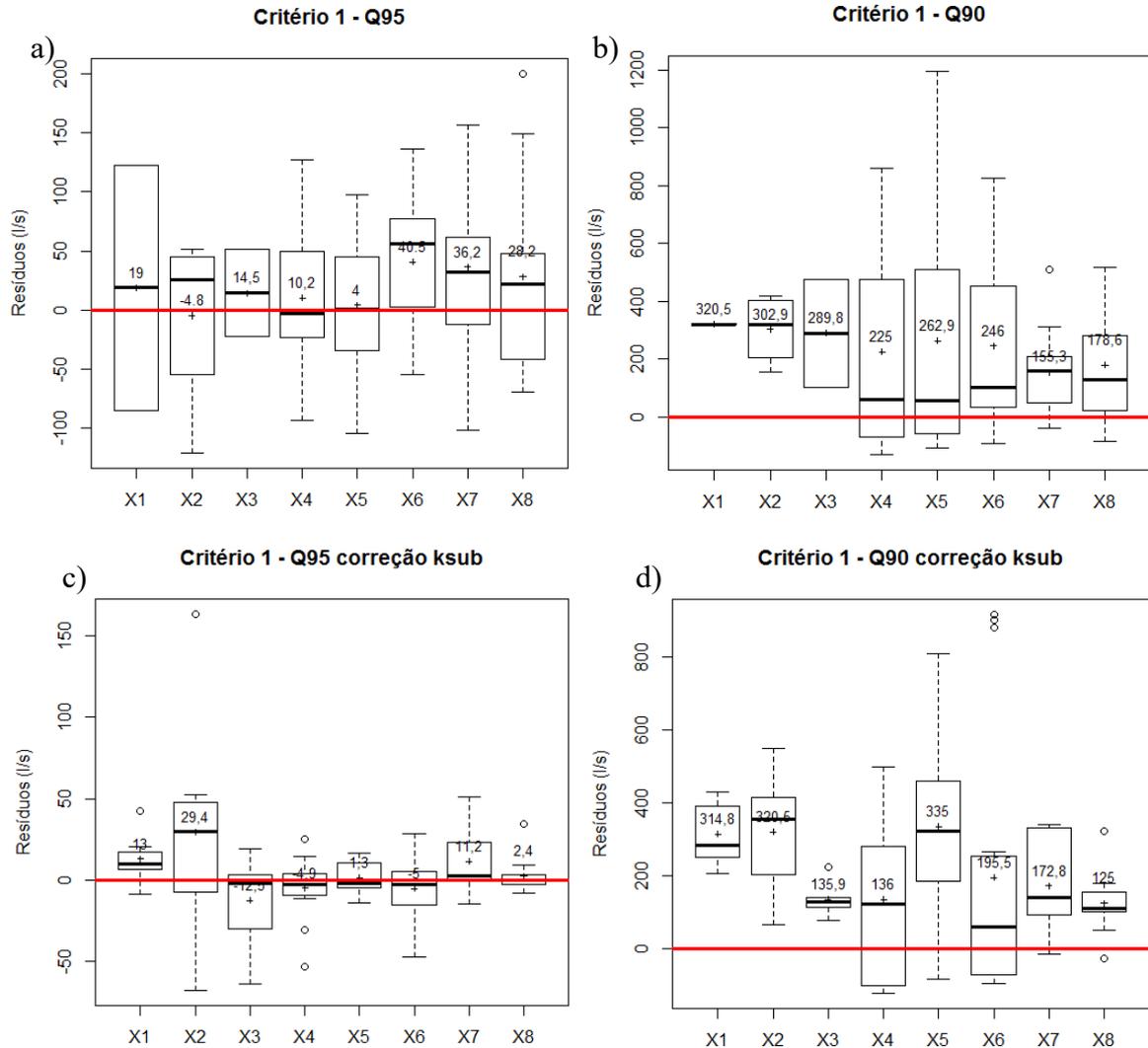


Figura 24. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 1. a) simulações para a Q95. b) simulações para a Q90. c) simulações para a Q95 com correção do K_{sub} . d) simulações para a Q90 com correção do K_{sub} .

Para os valores de Q95%, verifica-se no gráfico Box-plot, Figura 24a, que a faixa de valores dos resultados está dentro do intervalo interquartil IIQ, exceto para as simulações X6, que resultou em valores um pouco superestimados. Destaque para as simulações X4 (dados climatológicos) e X5 (IDW / evap) em que a média e mediana se aproximam do valor nulo, ou seja, a estimativa é muito próxima do valor real procurado.

Percebe-se pela Figura 24c, que ao se corrigir o parâmetro K_{sub} , acarreta em intervalos interquartil IIQ mais justos, ou seja, é melhorada a precisão da modelagem. Desta

maneira, apenas as simulações que utilizam dados de satélite e a simulação X7 (COM / evap) apresentam erros maiores que ± 10 l/s.

Já para os resultados referentes a Q90%, na Figura 24b, os resíduos são maiores, porém a simulação X4 (dados climatológicos) é discretamente melhor que os demais. Vale destacar também a simulação X7 (método COM / evap) pela amplitude do intervalo interquartil IIQ ser sensivelmente menor que os demais.

O ajuste do parâmetro K_{sub} para a vazão Q90%, na Figura 24d, não melhora significativamente os resultados. Reforçando a análise de que apenas as simulações X4 e X7 resultam em valores mais próximos do valor nulo e, assim, conduzindo à melhores resultados na modelagem.

Então, procede ao estudo do índice de freqüência do erro e estatística PBIAS, sendo apresentados no Quadro 8 para a vazão Q95% e no Quadro 09 para a vazão Q90%.

Quadro 08. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C1.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (l/s)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	103,6	113,2	118,9	0,7	Muito Bom
	X2	45,4	68,4	99,7	-0,4	Muito Bom
	X3	37,1	44,4	48,7	0,6	Muito Bom
Estação Climatológica	X4	37,2	73,2	91,3	2,6	Muito Bom
Média na bacia	X5	39,2	70,8	94,1	1,2	Muito Bom
	X6	56,4	77,0	82,2	11,7	Bom
	X7	34,1	101,1	149,6	9,1	Muito Bom
	X8	47,3	68,6	144,3	8,7	Muito Bom
Satélite	X1 corr	10,0	17,3	29,0	1,7	Muito Bom
	X2 corr	37,0	56,0	96,2	7,8	Muito Bom
	X3 corr	11,9	27,2	46,9	2,3	Muito Bom
Estação Climatológica	X4 corr	7,1	13,7	28,8	3,4	Muito Bom
Média na bacia	X5 corr	4,7	12,6	13,7	2,1	Muito Bom
	X6 corr	6,2	27,3	38,4	4,9	Muito Bom
	X7 corr	9,5	22,2	36,9	3,9	Muito Bom
	X8 otim	3,8	8,2	9,0	1,4	Muito Bom

Quadro 09. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C1.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (l/s)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	320,6	321,2	321,6	11,7	Bom
	X2	318,6	392,6	408,3	22,0	Satisfatório
	X3	289,8	383,5	439,6	10,5	Bom
Estação Climatológica	X4	128,6	475,1	690,3	67,8	Insatisfatório
Média na bacia	X5	98,2	476,3	814,2	90,6	Insatisfatório
	X6	102,8	451,4	683,4	74,5	Insatisfatório
	X7	158,9	210,1	292,0	38,2	Insatisfatório
	X8	130,0	281,4	489,8	56,6	Insatisfatório
Satélite	X1 corr	283,5	390,5	426,8	40,1	Insatisfatório
	X2 corr	355,2	391,2	491,0	46,6	Insatisfatório
	X3 corr	128,8	137,4	182,5	14,8	Bom
Estação Climatológica	X4 corr	128,1	268,6	411,5	51,5	Insatisfatório
Média na bacia	X5 corr	322,8	460,4	545,0	94,5	Insatisfatório
	X6 corr	90,9	250,6	891,9	74,0	Insatisfatório
	X7 corr	140,7	308,8	337,7	44,8	Insatisfatório
	X8 otim	112,2	155,9	178,9	25,0	Satisfatório

Para a vazão Q95% no Quadro 8, os maiores resíduos para a frequência de erro em 90% das vezes foi $\pm 149,6$ l/s e $\pm 144,3$ l/s, para a simulação X7 (método COM / evap) e a X8 (método COM / EVTR), respectivamente. Para a estatística PBIAS todos os cenários foram classificados como Muito Bom com exceção apenas do cenário X6 (método IDW / EVTR) que foi classificado como Bom.

Para as inadequações que totalizam 122 simulações, foi corrigido o valor do Ksub e resultou em uma melhora significativa na redução dos valores do Índice de Frequência do Erro.

No Quadro 9 do resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% se verifica que o desempenho do modelo não é tão eficiente resultando em resíduos para a frequência de erro de 90% das vezes sempre maiores que $\pm 300,0$ l/s. Vale destacar apenas as simulações X1 (chuva Satélite Foz) e X3 (Chuva satélite média na bacia) que retornaram em classificação Bom para as estatística PBIAS.

As inadequações que foram corrigidas o parâmetro Ksub não resultou em melhoras significativas na redução dos valores do Índice de Frequência do Erro nem para o desempenho da estatística PBIAS.

Analisar-se-á a variação dos valores Cinf e Ksub para comparação com outros trabalhos, sendo que as estatísticas descritivas estão apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10. Estatísticas quanto a variação dos parâmetros Cinf e Ksub para o Critério 1.

Estatística	Cinf	Ksub
Média	0,29	412,08
Desv. Pad.	0,11	370,77
CV (%)	0,39	0,90
Máximo	0,77	1743,80
Mínimo	0,04	67,20
Mediana	0,27	293,20
Correção do Ksub		
Estatística	Cinf	Ksub
Média	0,31	220,10
Desv. Pad.	0,07	102,10
CV (%)	0,23	0,46
Máximo	0,52	680,00
Mínimo	0,18	84,00
Mediana	0,30	203,00

As estatísticas apresentadas divergem um pouco dos achados de Silveira (1997) que encontrou valores de Cinf de 0,2 a 0,5. Neste trabalho foram encontrados valores com mínimo de 0,04 e máximo de 0,77 para o Cinf, e corrobora com achados de Horn (2016) que analisa em 90% das aplicações o Cinf assume valores até 0,6. O autor ainda demonstra que valores muito elevados de Cinf podem representar falta de representatividade da série de precipitações consideradas para a geração sintética de vazões.

Valores parecidos de Cinf foram encontrados por Friedrich (2017) analisando os dados com apenas um pluviômetro na bacia, analogamente ao cenário X4, e para combinação de pluviômetros, analogamente aos cenários X5, X6, X7 e X8.

Já o parâmetro Ksub, Horn (2016) alerta que a partir de uma diferença de 50% na variação do Ksub1 e Ksub2, é encontrado um maior distanciamento entre as estimativas da vazão real, ou seja, o Ksub é dependente dos dados medidos de vazão.

Os valores em termos gráficos possuem uma heterogeneidade explícita, diferente do encontrado por Friedrich (2017) e também os valores de Ksub foram bem discrepantes, não obstante a escala da área das bacias são diferentes no referido estudo e neste trabalho.

Já Comini (2017) observou tendência do *MS* em subestimar a vazão Q95%, salientando que o autor pesquisou apenas em cenário com um único pluviômetro na bacia, situação análoga ao cenário X4 deste presente trabalho.

Para o critério 1 todos os cenários resultaram em valores condizentes com o valor real da vazão Q95%. Já para a vazão Q90% merece destaque as simulações utilizando dados de chuva de satélite que foram classificadas como Bom na estatística PBIAS. Em termos de eficiência no resultado, não se percebe grandes melhoras quando se corrige o parâmetro Ksub, porém em termos práticos é bastante salutar, pelo fato de que se evita o prolongamento do tempo de análise na modelagem.

De forma geral, o *MS* reproduziu resultados positivos neste Critério 1 para todos os dados de entrada de chuva, valendo a crítica de que se trata de um critério muito restritivo, resultando em muitas inadequações na realização das simulações.

5.1.2 Resultados do Critério 2 (C2)

Para o Critério 2 foram realizadas 173 simulações com os valores de estiagem disponíveis, em contrapartida ocorreram 102 inadequações de resultados. A porcentagem de valores com resultados inadequados é muito grande corroborando com a proposta de correção do parâmetro Ksub para se reduzir o tempo de análise.

Os resíduos das simulações realizadas com as condicionantes do C2 para a vazão Q95% e Q90% estão apresentados na Figura 25a e na Figura 25b. Já nas Figuras 25c e 25d apresentam os resíduos referentes à correção do parâmetro Ksub para a vazão Q95% e Q90%.

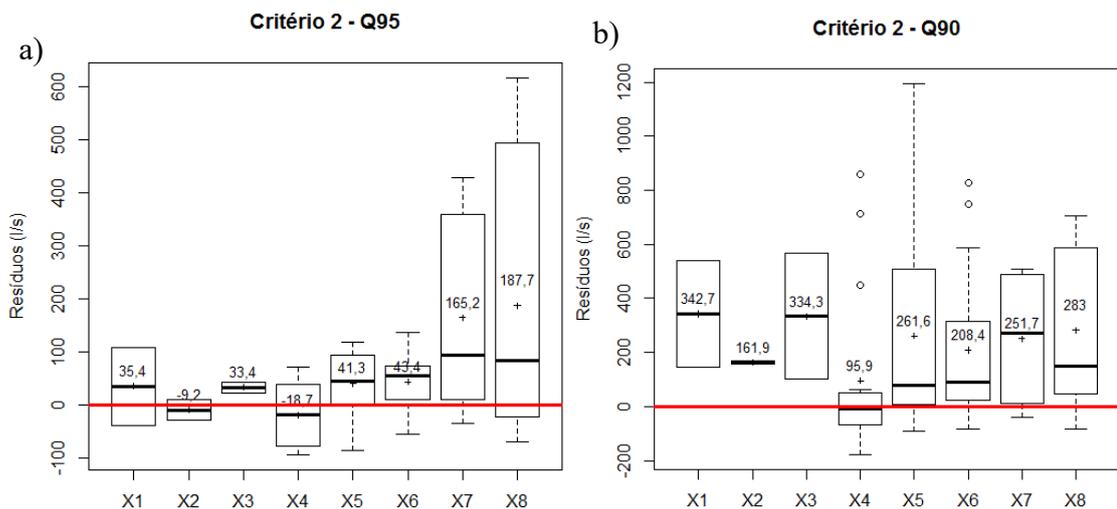


Figura 25. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 2. a) simulações para a Q95. b) simulações para a Q90. c) simulações para a Q95 com correção do Ksub. d) simulações para a Q90 com correção do Ksub.

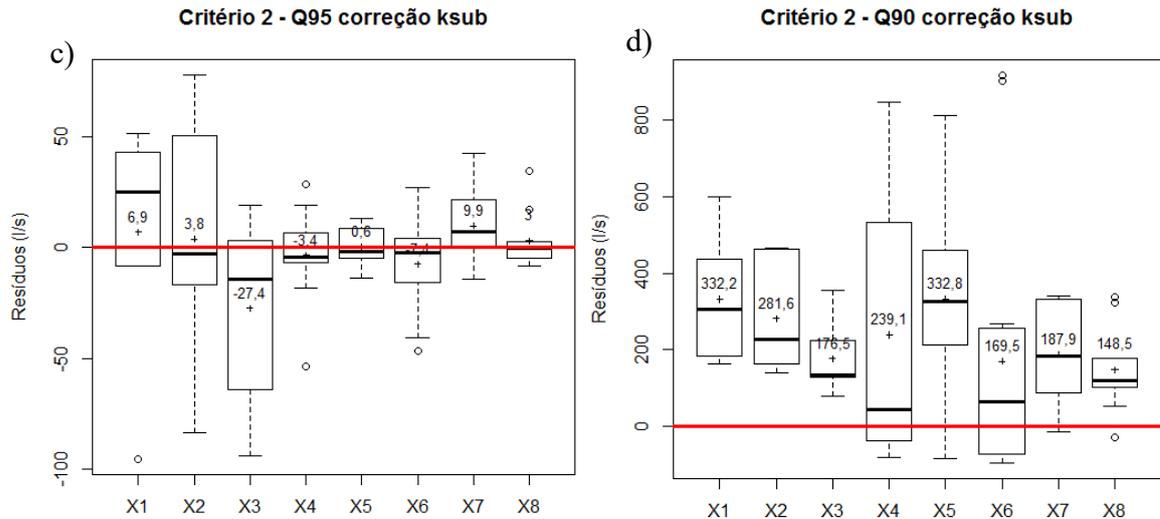


Figura 25. Continuação. c) simulações para a Q95 com correção do K_{sub} . d) simulações para a Q90 com correção do K_{sub} .

Para os valores de Q95%, verifica-se no gráfico box-plot, Figura 25a, que a faixa de valores do intervalo interquartil IIQ está sempre próximo ao valor nulo, sendo que as simulações X7 (método COM / evap) e X8 (método COM / EVTR) possuem grande amplitude de IIQ, superestimando os valores das vazões.

Na Figura 25c, da correção do parâmetro K_{sub} , acarreta em intervalos interquartil IIQ mais justos, porém as simulações que utilizam dados de chuva de satélite (cenários X1, X2 e X3) resultam em maiores amplitudes IIQ. De maneira geral, as simulações deste critério C2 estão muito próximas do valor nulo, representando ótima eficiência do modelo.

Já para os resultados referentes a Q90%, na Figura 25b, a amplitude do intervalo interquartil IIQ é significativamente grande. A melhor simulação foi a X4 (dados climatológicos) com amplitude IIQ mais justa e próxima do valor nulo. Identifica-se também resultados com valores extremos (*outliers*).

O ajuste do parâmetro K_{sub} para a vazão Q90%, na Figura 25d, não melhora significativamente os resultados. Então, procede ao estudo do índice de frequência do erro e estatística PBIAS, sendo apresentados no Quadro 11 para a vazão Q95% e no Quadro 12 para a vazão Q90%.

Quadro 11. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C2.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (l/s)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	73,7	91,5	102,1	1,36	Muito Bom
	X2	19,8	24,4	27,2	-0,35	Muito Bom
	X3	33,5	38,9	42,1	0,42	Muito Bom
Estação Climatológica	X4	58,8	75,3	84,7	-5,76	Muito Bom
Média na bacia	X5	53,4	92,0	103,5	12,70	Bom
	X6	56,4	74,0	93,9	12,53	Bom
	X7	94,8	337,2	410,2	25,42	Satisfatório
	X8	104,2	407,9	590,2	36,10	Insatisfatório
Satélite	X1 corr	37,2	49,5	73,5	0,80	Muito Bom
	X2 corr	33,6	71,1	80,7	0,44	Muito Bom
	X3 corr	24,5	55,4	78,9	-3,16	Muito Bom
Estação Climatológica	X4 corr	7,0	17,1	24,7	-0,99	Muito Bom
Média na bacia	X5 corr	4,7	11,6	13,1	0,16	Muito Bom
	X6 corr	6,0	25,9	38,8	-2,15	Muito Bom
	X7 corr	12,1	20,7	23,0	2,28	Muito Bom
	X8 otim	3,8	8,2	18,6	0,59	Muito Bom

Quadro 12. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C2.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (l/s)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	342,7	440,4	499,0	12,46	Bom
	X2	161,9	164,9	166,8	5,89	Muito Bom
	X3	334,4	450,3	519,8	12,16	Bom
Estação Climatológica	X4	62,3	140,6	582,0	27,89	Insatisfatório
Média na bacia	X5	89,8	476,3	814,2	76,10	Insatisfatório
	X6	92,2	313,3	683,4	56,84	Insatisfatório
	X7	272,9	483,8	502,7	36,62	Insatisfatório
	X8	149,3	569,0	684,7	51,46	Insatisfatório
Satélite	X1 corr	304,9	409,1	518,5	36,24	Insatisfatório
	X2 corr	228,9	414,6	465,1	30,72	Insatisfatório
	X3 corr	134,8	203,8	291,0	19,26	Satisfatório
Estação Climatológica	X4 corr	81,7	534,2	643,4	65,21	Insatisfatório
Média na bacia	X5 corr	326,3	439,7	460,5	84,72	Insatisfatório
	X6 corr	94,8	255,9	648,5	46,23	Insatisfatório
	X7 corr	183,0	332,0	339,3	41,00	Insatisfatório
	X8 otim	119,8	178,6	323,9	27,00	Insatisfatório

Analisando o Quadro 11 para a vazão Q95%, o desempenho do modelo pela estatística PBIAS é sempre muito bom e bom tendo valores dos resíduos para a frequência de erro em 90% sempre menor que ± 100 l/s exceto para as simulações X7 (método COM / evap) e a X8 (método COM / EVTR) que foram classificados como satisfatório e insatisfatório, respectivamente. Este fato corrobora com a análise gráfica da Figura 25a, em que se verifica grande amplitude do intervalo interquartil IIQ.

Para as inadequações que totalizam 102 simulações, foi corrigido o valor do Ksub e resultou em uma melhora significativa na redução do Índice de Frequência do Erro para valores sempre menores que ± 80 l/s e resultou na classificação PBIAS como Muito Bom para todos os cenários.

No Quadro 12 do resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% se verifica que o desempenho do modelo não é tão eficiente resultando em resíduos para a frequência de erro de 90% das vezes sempre maiores que $\pm 500,0$ l/s. Vale destacar apenas as simulações X2 (método Satélite Nascente) que retornou na classificação em Muito Bom para a estatística PBIAS.

A simulação X4 (dados climatológico) quando analisada graficamente na Figura 25b, pode levar a conclusão de valores coerentes pois o IIQ está na faixa do valor nulo, porém se identificam *outliers* e desta maneira a estatística PBIAS o classifica como insatisfatório.

As inadequações que foram corrigidas o parâmetro Ksub não resultou em melhoras significativas na redução dos valores do Índice de Frequência do Erro nem para o desempenho da estatística PBIAS.

Analisar-se-á a variação dos valores Cinf e Ksub para comparação com outros trabalhos, sendo que as estatísticas descritivas estão apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13. Estatísticas quanto a variação dos parâmetros Cinf e Ksub para o Critério 2.

Estatística	Cinf	Ksub	Correção do Ksub	
			Cinf	Ksub
Média	0.29	439.05	0.32	214.61
Desv. Pad.	0.11	332.33	0.07	95.82
CV (%)	0.37	0.76	0.23	0.45
Máximo	0.77	1743.80	0.52	680.00
Mínimo	0.07	67.20	0.18	95.00
Mediana	0.27	358.90	0.31	191.00

Após a realização de uma quantidade de simulações, percebeu-se que ocorrem melhores relações quanto melhores forem definidas as vazões medidas, sendo que estas devem representar o decréscimo do hidrograma pois, neste caso, resultam em menores erros

na modelagem e estimativas mais favoráveis, sendo que isto também foi analisado por Comini (2017).

O mesmo autor identificou casos em que as estimativas não foram adequadas mesmo adotando três dados de vazão no período de estiagem. Este fato também foi detectado neste presente trabalho, sendo relatado como inadequação na modelagem.

Fato também observado por Horn (2016) que recomenda que as três vazões medidas devam representar um decréscimo exponencial, caso contrário a estimativa do método deve ser procurado por outro evento.

De maneira geral, os cenários apresentaram resultados satisfatórios independente da metodologia para os dados de chuva. Horn (2016) adverte que os erros na modelagem são menores de acordo com a representatividade pluviométrica em bacias hidrográficas na escala de área de 690 km² e 728 km², de maneira que quanto mais pluviômetros melhores resultados.

Enfim, entende-se que, em termos de eficiência do modelo, o *MS* é melhor aplicável para a vazão Q95% corroborando com a tese de Silveira (1997). Não obstante, Comini (2017) encontrou grande variabilidade nas percentagens de erro do modelo, não tendo uma relação direta com a percentagem de permanência das vazões analisadas.

Os resultados também corroboram com os estudos de Friedrich (2017) de que há pouca discrepância de resultados na utilização do *MS* em relação a espacialização das precipitações. A contribuição deste presente trabalho é de que os dados de chuva de satélite também seguem esta relação de influência.

5.1.3 Resultados do Critério 3 (C3)

O Critério 3 apresenta a prática realizada pela Gerência de Outorga da SEMA-MT, que estabeleceu critérios para padronizar o uso do *MS* por intermédio da Instrução Normativa IN SEMA 01/2009.

Percebe-se que a lógica da IN SEMA foi de padronizar a ocorrência das medições no maior período de estiagem de chuva da região, conforme apresentado na caracterização climática apresentada no item 3.4, onde se verifica que o trimestre mais seco é justamente entre os meses de julho, agosto e setembro. Observa-se também que devido ao balanço hídrico natural da bacia, este trimestre seco antecede ao período crítico de estiagem nas vazões, período que geralmente ocorrem entre outubro e novembro, conforme se analisa no monitoramento fluviométrico disponível, item 3.6.

Para o Critério 3 foram realizadas 77 simulações com os valores de estiagem disponíveis, não obstante, ocorreram 45 inadequações na modelagem. Os resíduos das

simulações realizadas com as condicionantes do C3 para a vazão Q95% e Q90% estão apresentados na Figura 26a e na Figura 26b. Já nas Figuras 26c e 26d apresentam os resíduos referentes à correção do parâmetro K_{sub} para a vazão Q95% e Q90%.

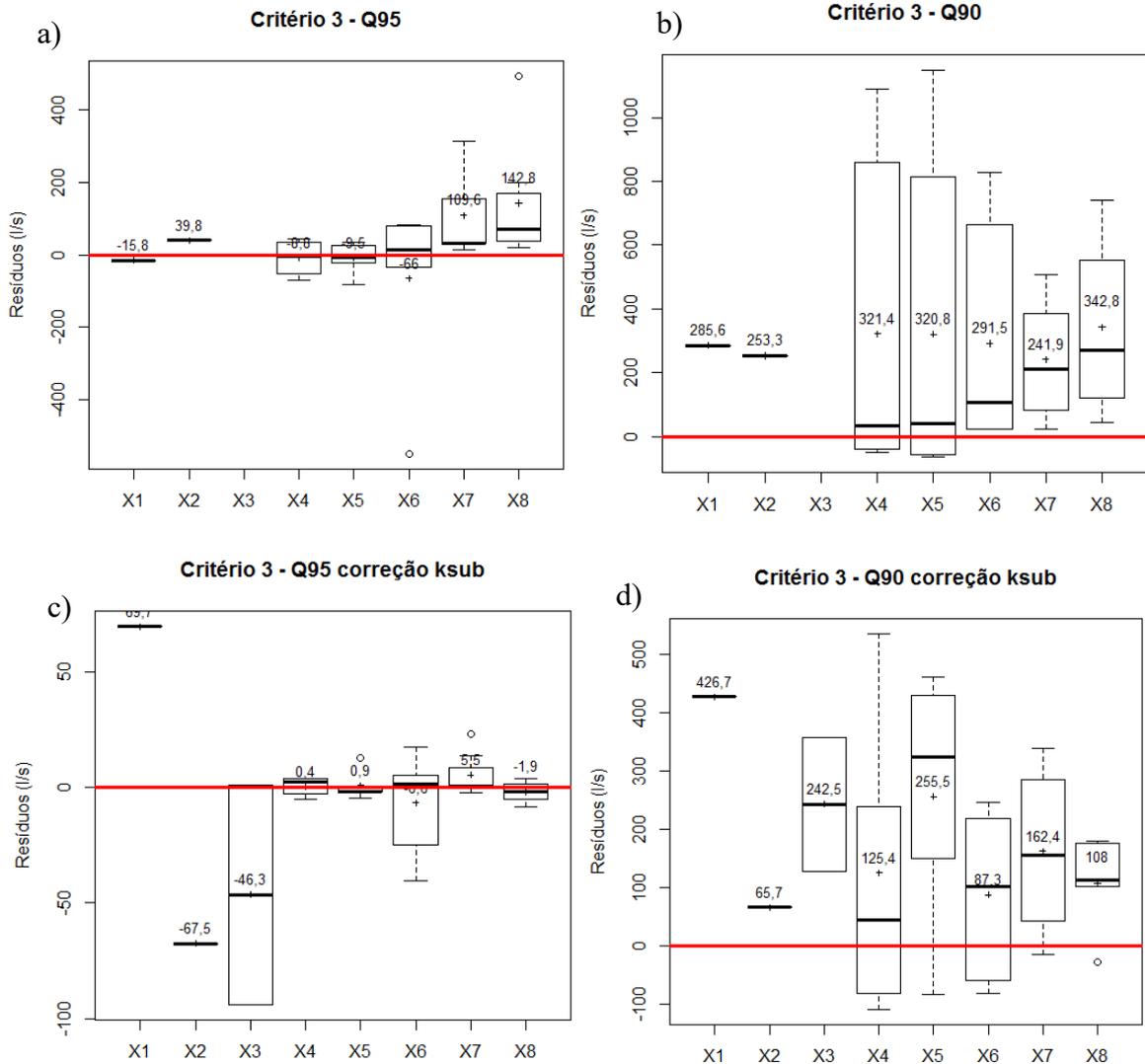


Figura 26. Resultados das simulações para a vazão Q95% e vazão Q90% referentes ao Critério 3. a) simulações para a Q95. b) simulações para a Q90. c) simulações para a Q95 com correção do K_{sub} . d) simulações para a Q90 com correção do K_{sub} .

Para os valores de Q95%, verifica-se no gráfico box-plot da Figura 26a, que a faixa de valores dos resíduos estão próximos do valor nulo. Os dados das simulações com chuva de satélite resultam em alta porcentagem de inadequação na modelagem. As simulações X1 (chuva Satélite Foz) e X2 (chuva Satélite Nascente) retornaram apenas um valor. Já na simulação X3 (Chuva satélite média na bacia), todas as simulações resultaram em inadequações.

Na Figura 26c, da correção do parâmetro K_{sub} para a vazão Q95%, acarreta em intervalos interquartil IIQ mais justos, com exceção da simulação X6 (IDW / EVTR) e as

simulações que utilizam dados de chuva de satélite (cenários X1, X2 e X3) que retornaram valores mais esparsos com menor precisão.

Quanto a análise referente a vazão Q90%, na Figura 26b, verifica-se que a amplitude do intervalo interquartil IIQ é grande com valores dos resíduos no limite superior do bigode do gráfico box-plot na magnitude de 1000 l/s. Novamente simulações com chuva de satélite resultam em alta porcentagem de inadequação na modelagem, sendo que na simulação X3 (Chuva satélite média na bacia), todas as simulações resultaram em inadequações.

A correção do parâmetro Ksub para a vazão Q90%, na Figura 26d, não melhora significativamente os resultados, mantendo a grande amplitude do IIQ porém com valores dos resíduos no limite superior do bigode do gráfico box-plot na magnitude de 500 l/s. Então, procede ao estudo do índice de frequência do erro e estatística PBIAS, sendo apresentados no Quadro 14 para a vazão Q95% e no Quadro 15 para a vazão Q90%.

Quadro 14. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q95% do C3.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (l/s)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	---	---	---	-0,30	Muito Bom
	X2	---	---	---	0,77	Muito Bom
	X3	---	---	---	---	---
Estação Climatológica	X4	38,85	49,30	61,40	-1,01	Muito Bom
Média na bacia	X5	24,40	32,67	58,45	-1,10	Muito Bom
	X6	64,20	82,28	316,90	-7,61	Muito Bom
	X7	31,90	156,10	251,80	10,54	Bom
	X8	71,80	169,50	317,46	19,23	Satisfatório
Satélite	X1 corr	---	---	---	1,34	Muito Bom
	X2 corr	---	---	---	1,30	Muito Bom
	X3 corr	47,55	70,73	84,63	1,83	Muito Bom
Estação Climatológica	X4 corr	3,70	4,00	4,78	0,35	Muito Bom
Média na bacia	X5 corr	2,00	4,70	9,44	0,40	Muito Bom
	X6 corr	11,40	23,10	32,70	1,84	Muito Bom
	X7 corr	2,40	8,65	17,36	0,83	Muito Bom
	X8 otim	3,80	5,00	6,92	0,39	Muito Bom

Quadro 15. Resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% do C3.

Tipo de dado de chuva	Cenário	Índice de Freq. Erro (<i>l/s</i>)			Resultado PBIAS (%)	Desempenho
		50%	75%	90%		
Satélite	X1	---	---	---	5,20	Muito Bom
	X2	---	---	---	4,60	Muito Bom
	X3	---	---	---	---	---
Estação Climatológica	X4	46,80	657,58	974,00	35,10	Insatisfatório
Média na bacia	X5	58,95	626,83	981,45	35,00	Insatisfatório
	X6	107,10	528,88	745,40	31,80	Insatisfatório
	X7	210,10	386,80	459,34	22,00	Satisfatório
	X8	271,20	552,10	647,58	43,60	Insatisfatório
Satélite	X1 corr	---	---	---	7,76	Muito Bom
	X2 corr	---	---	---	1,19	Muito Bom
	X3 corr	242,50	299,75	334,10	8,82	Muito Bom
Estação Climatológica	X4 corr	108,60	239,10	416,16	11,41	Bom
Média na bacia	X5 corr	322,80	429,00	447,84	23,23	Satisfatório
	X6 corr	114,35	200,25	231,65	9,53	Muito Bom
	X7 corr	154,80	285,65	334,92	20,67	Satisfatório
	X8 otim	112,20	174,80	177,20	9,82	Muito Bom

Analisando o Quadro 14 para a vazão Q95%, o desempenho do modelo pela estatística PBIAS é classificado como muito bom exceto para as simulações X7 (método COM / evap) e a X8 (método COM / EVTR) que foram classificados como bom e satisfatório, respectivamente, tendo valores dos resíduos para a frequência de erro em 90% na ordem de magnitude de ± 300 *l/s*. As simulações com dados de precipitação por satélite resultaram na maioria das vezes em inadequações da modelagem.

Para as inadequações que totalizam 45 simulações, foi corrigido o valor do Ksub e resultou em melhora significativa na redução do Índice de Frequência do Erro para valores sempre menores que ± 30 *l/s* e a classificação PBIAS foi Muito Bom para todos os cenários. Apenas as simulações com dados de precipitação por satélite retornaram valores na ordem de magnitude de ± 80 *l/s*, o que ainda foi considerado como Muito Bom.

No Quadro 15 do resumo dos índices estatísticos para a vazão Q90% se verifica que o desempenho do modelo não é tão eficiente resultando na classificação da estatística PBIAS como insatisfatório. A exceção foram as simulações pelo cenário X7 (método COM / evap) que retornou na classificação em satisfatório para a estatística PBIAS.

As inadequações que foram corrigidas o parâmetro K_{sub} melhorou expressivamente os valores do Índice de Frequência do Erro, que para a frequência de erro em 90% das vezes é sempre menor que ± 450 l/s.

Vale lembrar que este Critério 3 considera as vazões medidas no trimestre mais seco da bacia e resultou em grande eficiência para os cenários, corroborando com os trabalhos de Silveira (1997) e Horn (2016) de que as vazões devem representar o decréscimo exponencial do hidrograma. Este critério é realmente interessante de se formalizar nos órgãos gestores de recursos hídricos.

Vale também a análise de que as precipitações médias na bacia, tanto pelo método IDW quanto pelo método COM, resultaram nas melhores eficiências do modelo. Os cenários que utilizam chuva de satélite (X1, X2 e X3) somente conseguem eficiência nos resultados quando se corrige o parâmetro K_{sub} .

Analisar-se-á a variação dos valores C_{inf} e K_{sub} para comparação com outros trabalhos, sendo que as estatísticas descritivas estão apresentadas no Quadro 16.

Quadro 16. Estatísticas quanto a variação dos parâmetros C_{inf} e K_{sub} para o Critério 3.

Estatística	Cinf	Ksub	Correção do K_{sub}	
			Cinf	Ksub
Média	0,32	412,47	0,29	241,19
Desv. Pad.	0,15	266,06	0,06	86,14
CV (%)	0,47	0,65	0,20	0,36
Máximo	0,72	884,20	0,41	467,00
Mínimo	0,17	71,60	0,21	120,00
Mediana	0,26	402,65	0,29	210,50

As simulações referentes ao critério 3 resultam em valor médio do C_{inf} de 0,32 com um mínimo de 0,17 e máximo de 0,72. Horn (2016) encontrou valores parecidos em seu trabalho, porém ele cita que são valores irrealmente físicos, pois um fator C_{inf} muito baixo significa que praticamente toda a chuva precipitada não alimentou o reservatório subterrâneo no balanço hídrico, fato improvável, mesmo para bacias pequenas. Valores muito alto também são irrealmente físicos pois consideram que praticamente toda a chuva infiltrou e abasteceu o reservatório subterrâneo.

Silveira (1997) em seu trabalho, encontrou valores que convergiram para 0,25 a 0,50. Já Comini (2017) encontrou valores sempre abaixo 0,1 e acima de 0,6 para o parâmetro C_{inf} e analisa que a variabilidade temporal da precipitação são a justificativa para o resultado. E Friedrich (2017) encontrou valores da mesma ordem de magnitude para bacias do mesmo porte de tamanho da bacia analisada no presente trabalho.

Quanto ao parâmetro K_{sub} , Friedrich (2017) encontrou valores elevados e citou a análise de Horn (2016) de que se pode obter uma curva de permanência com ajuste satisfatório mesmo com um valor elevado do K_{sub} , sendo que este foi o caso neste trabalho. O alto valor de K_{sub} encontrado, com média de 412 e valor máximo de 884, pode ser devido a imensa camada de solo na região, já que a bacia do Rio Coxipó tem suas nascentes na Chapada dos Guimarães com altitude da ordem de 800 m e sua foz da bacia na planície pantaneira com altitude da ordem de 200 m, ou seja, cerca de 600 m de camada de solo entre a nascente e a foz.

Comini (2017) também encontrou valores elevados de K_{sub} e indica uma atenção especial para a escolha do período de estiagem a ser adotado para aplicação do método. Neste presente trabalho também se detectou que o valor do K_{sub} varia de acordo com a estação hidrológica em que se está realizando a simulação. Porém mesmo valores altos de K_{sub} resultaram em ajustes satisfatórios.

5.2 ANÁLISE CRÍTICA DA MODELAGEM

Analisar-se-á criticamente os acontecimentos identificados na execução da modelagem. Vale salientar que ao todo foram realizadas 721 simulações, sendo que destas, ocorreram 269 inadequações na modelagem e estas foram refeitas corrigindo também o parâmetro K_{sub} além do C_{inf} .

Os principais tipos de inadequações indetificadas ocorreram quando a diferença de valores do K_{sub} foi maior que 100% e quando as vazões monitoradas não representavam o decréscimo do hidrograma. Este último acontecimento foi verificado inclusive em casos que não havia chuvas, dando indícios de que as precipitações monitoradas podem não estar sendo representativas para a bacia hidrográfica.

Em todos os trabalhos realizados (SILVEIRA, 1997; HORN, 2016; FRIEDRICH, 2017; COMINI, 2017) foi identificado que a distribuição das chuvas altera consideravelmente o comportamento das vazões e isto é de suma importância, já que o método representa particularmente o decaimento do hidrograma, ou seja, a estabilização da curva de recessão do escoamento.

Neste trabalho, esta hipótese também ficou bastante evidente, porém ocorreram particularidades. Ao se corrigir o parâmetro K_{sub} fica bem nítido na análise que o parâmetro C_{inf} influencia principalmente na exatidão do resultado, ou ainda mais especificamente, altera a posição do hidrograma, aumentando ou diminuindo a magnitude dos valores de vazão. De

maneira geral o valor de C_{inf} deve posicionar o hidrograma juntamente com as medições de vazão medidas, sendo isto realizado iterativamente. Já o parâmetro K_{sub} interfere principalmente na precisão do resultado, ou ainda mais especificamente, altera o coeficiente angular do hidrograma, deixando o hidrograma mais suavizado ou mais inclinado.

Silveira (1997) quando propôs o método já indicava que os parâmetros C_{inf} e K_{sub} se comportam de maneira independente. Friedrich (2017) analisa que o parâmetro C_{inf} é relativamente sensível e que pequenas variações no valor podem resultar em significativas variações nas vazões calculadas.

Comini (2017) identificou que valores elevados de K_{sub} para bacias que apresentem longos períodos de estiagem, que é o caso da bacia do Rio Coxipó que apresenta até 4 meses sem chuvas, tendem a apresentar resultados mais significativos para as vazões associadas às maiores permanências. Neste presente trabalho, foi testada a hipótese de correção do parâmetro K_{sub} quando este apresenta inadequação de resultado e a conclusão é de que a hipótese é favorável apresentando tendência de melhorias na precisão do modelo.

Verificou-se também que o C_{inf} acompanha bem a tendência da bacia para o período chuvoso apresentando menores valores pelo fato de o solo estar mais saturado e quando há chuvas no início da estação seca, ocorre maiores infiltrações pela absorção da água pelo solo e consequentemente maiores valores de C_{inf} .

Percebeu-se também que o K_{sub} não tem um limite numérico e mesmo com valores altos pode apresentar resultados satisfatórios. Foram indetificadas inadequações no resultado mesmo com a correção do K_{sub} . Destarte, percebeu-se que a aderência das vazões aos valores simulados é um ponto fundamental para obtenção de bons resultados.

O primeiro ano da série histórica de precipitações resulta em elevado erro padrão (EP) do modelo e reflete negativamente no resultado, indicando ser melhor descartar o primeiro ano da série para obtenção da curva de permanência.

Algumas das particularidades ocorridas na modelagem são apresentadas na Figura 27 e Figura 28.

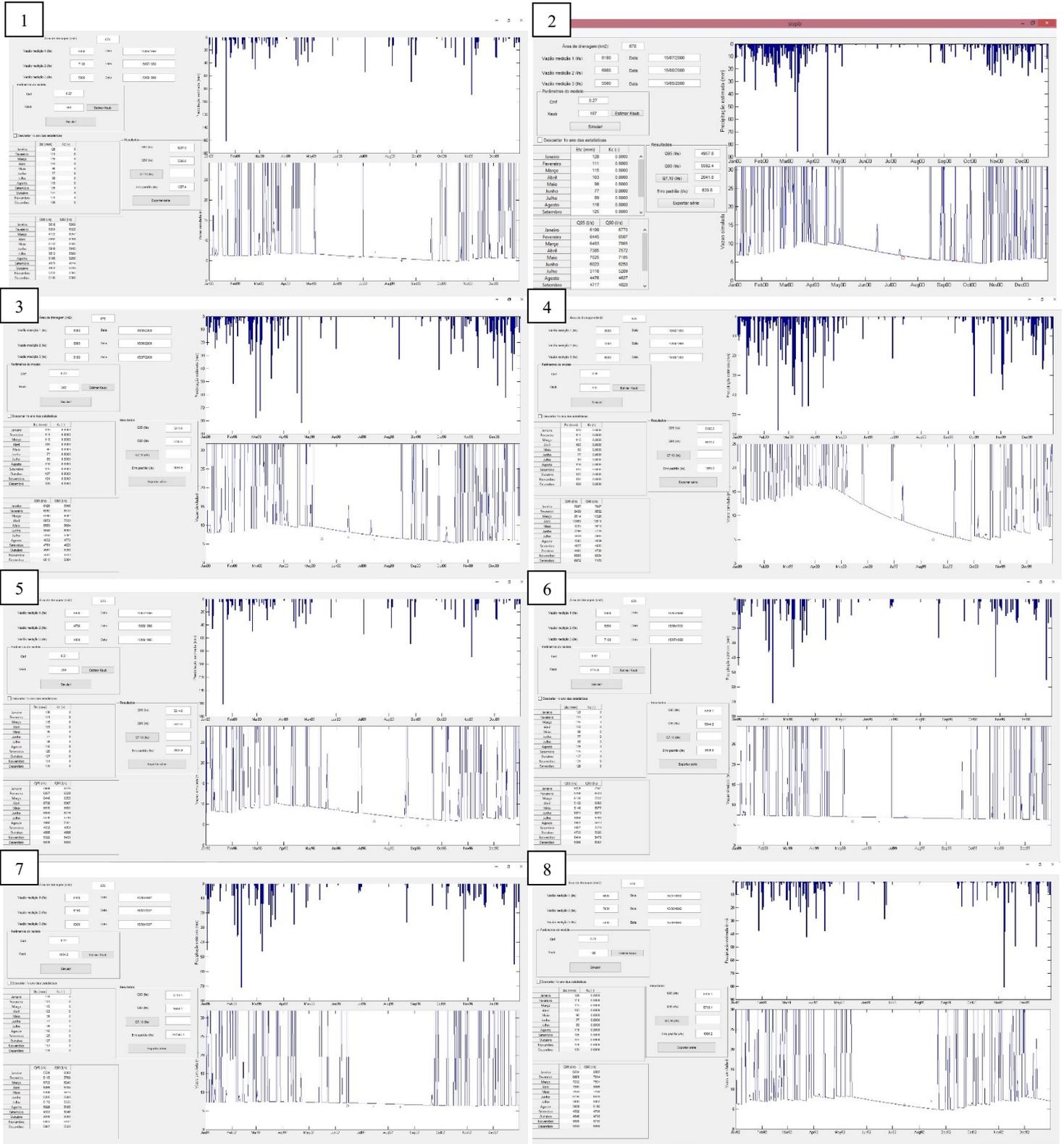


Figura 27. Exemplo 1 de resultados das simulações. 1- Simulação X4 Estação Climatológica da UFMT do C1 com correção do Ksub; 2- Simulação X1 Chuva de Satélite na foz da bacia com correção do Ksub; 3- Simulação X1 Chuva de Satélite na foz da bacia com erro menos rígido e ótimo resultado; 4- Simulação X3 Chuva de Satélite média na bacia com aumento de vazões na seca mas ótimo resultado; 5- Pouca aderência das vazões aos valores simulados, mas ótimo resultado; 6- Cinf muito baixo (0,07) e Ksub muito alto (1743), mas ótimo resultado; 7- Modelagem boa mas erro padrão alto (247595 l/s); 8- Simulação X6 Chuva média na bacia pelo método IDW.

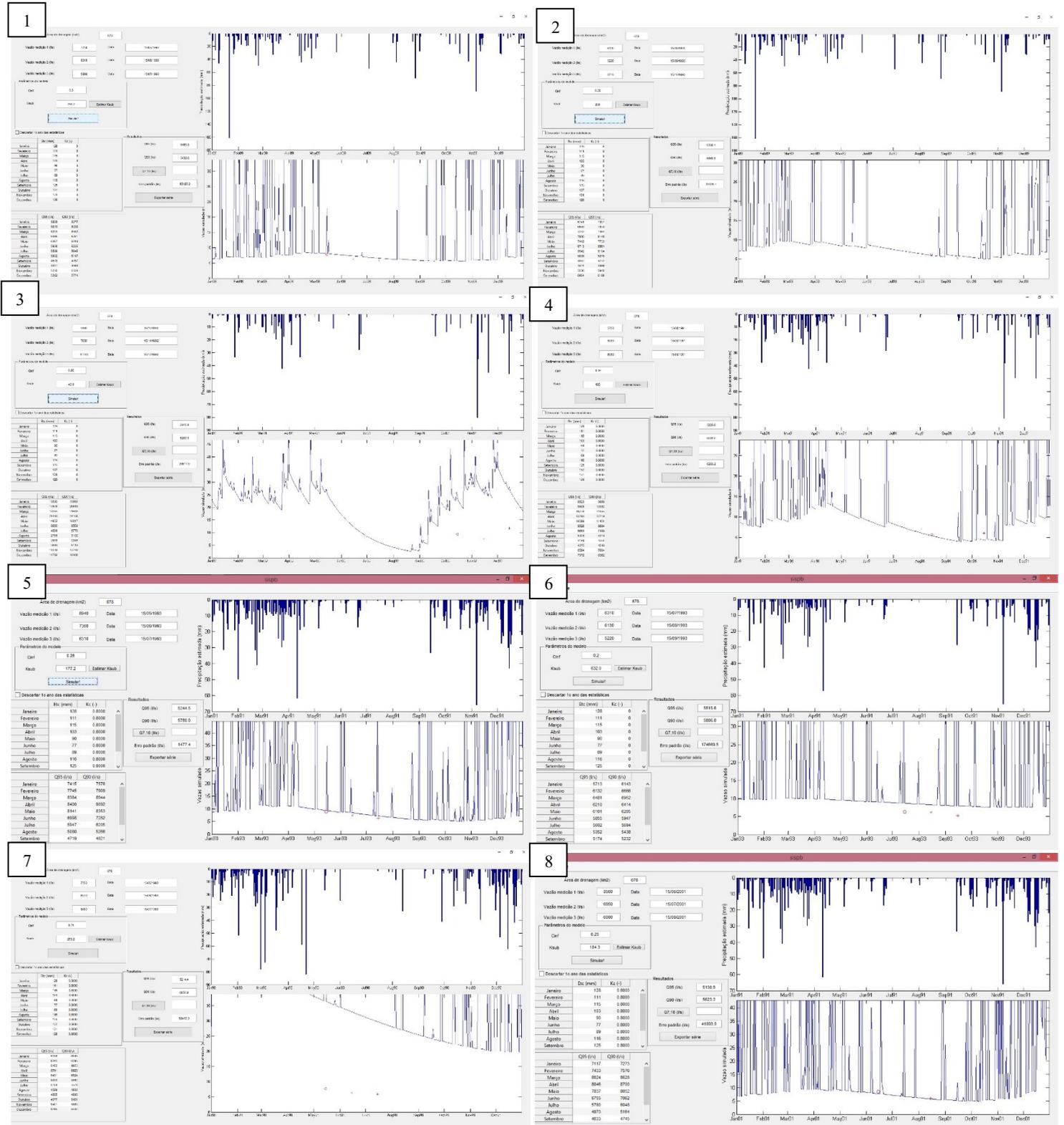


Figura 28. Exemplo 2 de resultados das simulações. 1- Simulação X4 Estação Climatológica da UFMT do C1 estimativa boa mas erro padrão alto (15187 l/s); 2- Simulação X4 Estação Climatológica da UFMT do C1 com correção do Ksub para o período chuvoso; 3- Período chuvoso não representa decaimento do hidrograma resultando em inadequação; 4- início da estação de chuvas aumenta Cinf (0,49) simulação X6 (IDW / evap); 5- Simulação X8 Método COM / EVTR, ótima simulação mesmo com muita chuva; 6- inadequação do Critério 2; 7- Erro alto com dados do primeiro ano da série de precipitações; 8- Erro Padrão do modelo muito alto (41894 l/s) devido ao início do período chuvoso.

Para tentar identificar se a redução do EP do modelo melhora a performance do resultado, testou-se a regressão dos resíduos da modelagem em relação ao EP do modelo tanto para a vazão Q90% quanto para a vazão Q95%, sendo apresentado na Figura 29a e Figura 29b, respectivamente.

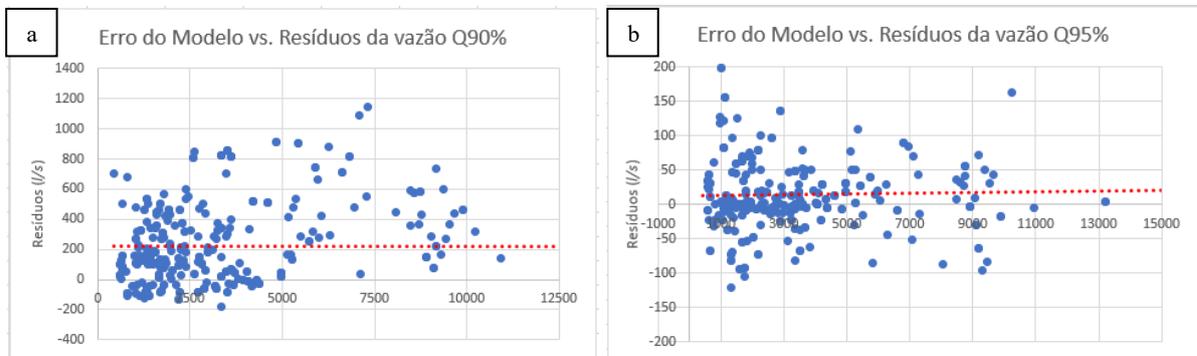


Figura 29. Erro Padrão do modelo pelos Resíduos da simulação. a) referente aos Resíduos da vazão Q90% b) referente aos Resíduos da vazão Q95%. Em vermelho tracejado está a linha de tendência dos valores.

Percebe-se uma sensível tendência de aumento dos resíduos com o aumento do erro padrão (EP) do modelo, porém os pontos estão muito esparsos. Identifica-se que para a vazão Q90%, o Erro Padrão de até 5000 resulta em resíduos que varia na ordem de -200 l/s à 600 l/s e para a vazão Q95%, o Erro Padrão de até 5000 resulta em resíduos que varia de -50 l/s à 50 l/s.

O Erro Padrão de 5000 l/s é da mesma ordem de magnitude que a vazão Q95% real, ou seja, é perfeitamente aceitável que o erro padrão tenha valores próximos das vazões monitoradas. É interessante esta análise, pois inicialmente se buscou minimizar ao máximo o EP do modelo, não obstante, se percebeu que não retornava em resultados mais eficientes.

5.3 COMPARAÇÃO DA VAZÃO SIMULADA E VALORES ADOTADOS PELO ÓRGÃO GESTOR DE RECURSOS HÍDRICOS

O órgão gestor de recursos hídricos no Estado de Mato Grosso, SEMA-MT, utiliza a Regionalização Hidrológica Estadual e vazão de referência Q95%. Os dados são disponibilizados ao público geral através do Sistema de Monitoramento e Licenciamento Ambiental (SIMLAM-Hídrico).

Para o ponto em análise neste estudo, o sistema retorna que a bacia se encontra na UPG P-4 – Alto Rio Cuiabá, bacia hidrográfica do Paraguai, contando com uma área de drenagem de 678 km² e vazão de referência Q95% de 5063,40 l/s.

Realizou-se a comparação entre a média de valores simulados para cada cenários e cada critério e o valor real (derivado do monitoramento fluviométrico). Idem em relação ao

valor adotado pela SEMA-MT. A comparação foi realizada pela relação do resíduo e o valor real da vazão e são apresentados no Quadro 17.

Quadro 17. Comparação entre os resultados das simulações e valor da Regionalização de Vazão de Mato Grosso em relação ao valor real monitorado.

Critério	Cenários	Q95% simulado MS	Erro Relativo (%)
C1Q95	X1	5216,0	0,31
	X2	5212,3	0,24
	X3	5201,0	0,02
	X4	5202,7	0,05
	X5	5202,7	0,05
	X6	5217,7	0,34
	X7	5223,3	0,45
	X8	5215,3	0,29
C2Q95	X1	5221,2	0,41
	X2	5197,3	-0,05
	X3	5191,7	-0,16
	X4	5188,9	-0,21
	X5	5220,9	0,40
	X6	5218,0	0,35
	X7	5287,5	1,68
	X8	5295,4	1,83
C3Q95	X1	5227,0	0,52
	X2	5186,2	-0,27
	X3	5153,6	-0,89
	X4	5195,8	-0,08
	X5	5195,7	-0,08
	X6	5163,7	-0,70
	X7	5257,6	1,11
	X8	5270,5	1,36
Q95% Reg.	Regionalização Hidrológica	5063,4	-2,62
Q95% Real	Monitoramento Fluiométrico	5200,0	---

Os resultados da simulação *MS* se mostraram mais eficientes que a regionalização. O Critério 1 (Silveira, 1997) apresenta melhores resultados perante os demais, porém possui condicionantes mais restritivas como o fato de não ser recomendada para bacias maiores que 100 km² e resultar em muitas inadequações. O Critério 3 (IN SEMA-MT) também apresentou resultados muito próximos do real.

Este Critério 3, estabelecido pela SEMA/MT, é interessante pois garante que as vazões medidas representem o decréscimo do hidrograma pois estabelece que o monitoramento seja realizado no trimestre mais seco da região e, por consequência, melhora a performance da simulação *MS* além de reduzir o número de inadequações.

Os resultados com os valores da estação climatológica e média na bacia pelo método IDW são os mais eficientes nos 3 critérios estabelecidos. Porém, todos os cenários e critérios possuem eficiência melhor que a Regionalização de Vazão.

A utilização de dados de precipitação monitorados por satélite é interessante devido à facilidade na aquisição e possuir eficiência aceitável na modelagem *MS*.

Os resultados obtidos neste trabalho são um grande indicativo que a modelagem *MS* fornece informações relevantes e condizentes à situação local da bacia hidrográfica, assim como pondera Comini (2017).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Entre deixar o usuário de recursos hídricos à revelia ou regularizá-lo, possibilitando uma possível compatibilização dos usos, é preferível a segunda opção, já que se tem disponível técnicas de modelagem hidrológica que permitem uma avaliação da disponibilidade hídrica local. Deve-se ter uma atenção especial as incertezas inerentes à modelagem.

Destarte, buscou-se neste trabalho apresentar as possíveis técnicas geralmente utilizadas para simulações *MS* e diagnosticar a eficiência quanto à exatidão dos resultados. Desta maneira, possibilitam-se orientações técnicas aos órgãos gestores de recursos hídricos a fim de fomentar a melhoria na gestão em locais com poucas informações hidrológicas.

Foram criados 3 (três) critérios para utilização do *MS*, sendo o Critério 1 referente as recomendações da tese de Silveira (1997), o Critério 2 é derivado das análises realizadas por Horn (2016) e Friedrich (2017) e o Critério 3 vem das condicionantes estabelecidas em normativa pela SEMA-MT através da IN SEMA 01/2009.

Além destes critérios, foram estabelecidos 8 cenários para obtenção dos dados de entrada no *MS*, sendo assim definidos:

X1, X2 e X3: dados pluviométricos estimados pelo satélite TRMM da NASA;

X4: dados monitorados na estação climatológica da UFMT; e,

X5, X6, X7 e X8: precipitação média na bacia calculada pelos métodos usuais em hidrologia e utilização de diferentes dados de evapotranspiração.

Os três critérios e cenários se mostraram eficientes dentro de suas particularidades. Vale salientar que diante da situação nacional de carência de dados hidrológicos, fato identificado em vários trabalhos referenciados neste texto, não se deve menosprezar nenhum dos cenários de utilização de precipitação e evapotranspiração. O ideal na hidrologia é se

utilizar dos dados disponíveis para o local de interesse, porém estes dados nem sempre são ideais, quando existem.

Verifica-se muita falha no monitoramento hidrológico, baixa densidade de postos pluviométricos, dificuldade na aquisição dos dados, muitos dados não compilados ou sem consistência, entre outros. Em contrapartida, a sociedade espera a melhora na gestão dos recursos hídricos.

Os resultados dos cenários que utilizam dados monitorados em estação climatológica e com dados de precipitação média na bacia se mostraram mais eficiente que os demais, posteriormente, os resultados com dados de chuva de satélite.

Entende-se que os dados de chuvas estimadas por satélite, pela utilização de apenas quatro anos de série histórica do TRMM, ainda apresentaram resultados satisfatórios na maioria dos casos, apesar da elevada porcentagem de inadequações na modelagem. Por hipótese, se sustenta que uma série histórica mais longa de chuva de satélite poderia melhorar o desempenho nos resultados.

O mérito dos dados monitorados por satélite está na inexistência de falhas na série histórica e facilidade na aquisição dos dados. A chuva de satélite não apresenta condicionantes em relação à espacialização da precipitação.

A diferença entre o produto de chuva estimada pelo satélite e pela chuva monitorada em campo pode se dar devido a estimativa média de precipitação na área monitorada, ou seja, o satélite considera que a precipitação é homogênea na área. Diferentemente do pluviômetro que considera chuvas pontuais.

Os dados de evapotranspiração de referência devem ser usados com parcimônia no *MS*, não obstante apresentaram dados satisfatórios e possuem grande aplicabilidade pela facilidade na aquisição. Salienta-se que resultados utilizando dados reais de evaporação, com as devidas correções de valores, são sutilmente mais eficientes.

É interessante investir em mais estudos de calibração do parâmetro K_{sub} , pois diminui consideravelmente as inadequações na modelagem e, conseqüentemente, diminui o tempo de espera na análise das vazões.

O *MS* mostra potencial para auxiliar a discretização de microbacias de modo a apurar a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas maiores, principalmente no tocante a bacias sem monitoramento, mas que possuem grande demanda por recursos hídricos. Desta maneira, os resultados do *MS* podem servir de base para aprimoramento de modelagens hidrológicas como MGB-IPH, SWAT, SMAP, entre outros.

Outra grande possibilidade ainda pouco estudada é de se utilizar das informações geradas pelo *MS* para aperfeiçoar sistemas de gerenciamento de recursos hídricos que carecem de informações em pequenas e médias bacias.

Recomenda-se que cada região hidrográfica estude o trimestre mais seco para se definir o período do monitoramento das vazões.

Em harmonia com o trabalho de Comini (2017), o *MS* deve ser utilizado como uma ferramenta complementar ao planejamento de recursos hídricos, pois fornece informações relevantes e condizentes à situação local da bacia hidrográfica.

Deve-se fortalecer os argumentos apresentados por Tucci (2005) de que a estimativa hidrológica ainda se encontra na magnitude de valores, mesmo no caso de modelagens que consideram mais processos físicos envolvidos, entendendo por tanto, que o *MS* é totalmente aplicável e recomendável nos casos de deficiência de dados hidrológicos.

E finalmente, destaca-se que o grande mérito do *MS* é que diante da situação descrita de falta de dados suficientes à estimativa de vazões, é uma modelagem célere e robusta o suficiente para possibilitar melhorias na gestão de recursos hídricos, ou seja, é uma modelagem simples, porém funcional.

7. ORIENTAÇÕES TÉCNICAS

- O modelo hidrológico *MS* apesar de ser simples e célere, permite inferir conhecimentos assertivos do ciclo hidrológico local voltado às vazões com alta permanência.
- Os resultados do modelo devem ser usados com parcimônia, pois a incerteza inerente a modelagem pode ser alta.
- Quão melhores e mais representativos forem os dados de entrada no *MS*, dados de chuva e vazão, melhores serão os resultados da modelagem.
- O protocolo proposto por Horn (2016) e Friedrich (2017) se mostrou mais flexível com maiores possibilidades de aprimorar o gerenciamento dos recursos hídricos, podendo ser resumido da seguinte maneira:
 - As vazões medidas devem representar um decréscimo exponencial, caso contrário, a estimativa do método deve ser procurada por outro evento;

- A estabilização do K_{sub} é o fator mais importante na modelagem, então recomenda-se que a diferença relativa de avaliação deste parâmetro nas três medições locais não exceda 100%;
 - O parâmetro C_{inf} deve estar situado entre 0,1 e 0,6;
 - O MS não apresentou diferenças significativas relativo à situação de aquíferos sedimentares ou fraturados;
 - O MS apresenta resultados satisfatórios para bacias com área de drenagem até 1000 km²;
 - Ocorrer o acumulado de precipitações de até 30 mm nos 14 dias antecedentes à medição das descargas, nenhuma excedendo a 5 mm por dia.
- O principal dado de entrada na modelagem são as medições das descargas no período de estiagem, que devem representar o decréscimo do hidrograma. Uma indicação interessante de se estabelecer como padrão é que as medições de vazão ocorram no trimestre mais seco da região hidrográfica em análise;
 - A correção do parâmetro K_{sub} não interfere sobremaneira na eficiência do modelo, porém reduz significativamente o número de inadequações e, conseqüentemente, diminui o tempo de espera na análise das vazões;
 - Deve ser dada preferência para utilização de dados climatológicos monitorados em campo, sem necessariamente excluir outras metodologias, por exemplo: precipitações estimadas por satélite;
 - Os dados pluviométricos devem ser da bacia em análise e ter um tamanho razoável de série histórica (≥ 10 anos).
 - Em bacias hidrográficas consideradas de médio porte (até 1000 km²) deve-se procurar realizar a média das precipitações na bacia com pelo menos dois postos pluviométricos, assim como recomenda Friedrich (2017).
 - Neste trabalho, mostrou-se mais adequado o método combinado entre Polígonos de Thiessen e isoietas de precipitações, entretanto o método da ponderação pelo inverso do quadrado da distância é mais fácil de se calcular, mais célere na obtenção dos dados e também apresenta ótimos resultados.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Rodriguez F. A. (Consultor). **Vantagens e desvantagens das experiências internacionais sobre mudanças climáticas e alocação de água**. Contrato nº 114113 do Projeto de Cooperação Técnica BRA/IICA/12/003 – ANA/Interáguas. Relatório Final – R-2. Brasília-DF: 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistema de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir**. Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos. v.8. Brasília-DF: ANA, 2016. p.122.

ARAÚJO, ANDERSON NASCIMENTO. **Simulação Hidrológica com o uso de chuva estimada por satélite**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR: 2006. 134 p.

BASSO, R. E.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R.; PICKBRENNER K. **Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil**. Nota Técnica, Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, n. 4, Rio de Janeiro, RJ, out-dez/2016, p. 635-641.

CHRISTIANSEN, DANIEL E.; HAJ, ADEL E.; RISLEY, JOHN C. *Simulation of Daily Streamflow for 12 River Basins in Western Iowa Using the Precipitation-Runoff Modeling System*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. 2017-5091, 27 p., doi: <https://doi.org/10.3133/sir20175091>.

COLLISCHONN, BRUNO. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS: 2006. 128 p.

COLLISCHONN, BRUNO; PANTE. ANDRÉ RAYMUNDO. **Modelagem Chuva/Vazão com dados TRMM para fins de Gestão das Águas em Bacias sem dados hidrológicos**. *Remote Sensing and Ground-based Methods in Multi-Scale Hydrology* (GRACE). Melbourne/Austrália:july, 2011.

COLLISCHONN, BRUNO. **Sistema de apoio à decisão para outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS: 2014. 177 p.

COMINI, ULISSES BIFANO. **Modelagem Hidrológica em pequenas bacias hidrográficas com ausência de séries históricas de dados fluviométricos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG: 2017. 57 p.

COUTO, VALTER DE CARVALHO. **Análise Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Coxipó em Cuiabá/MT (1988, 2000 e 2010)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Três Lagoas/MS: 2011. 85 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informação Geoambiental de Cuiabá, Várzea Grande e Entorno – SIG CUIABÁ**. Goiânia: CPRM, 2006.

CRUZ, JUSSARA CABRAL. **Disponibilidade Hídrica para Outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. 2001. 205f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DORNELLES, FERNANDO; GOLDENFUM, JOEL AVRUCH. **Análise comparativa da aplicação de redes neurais e sistemas de inferência difusa na previsão de nível do rio Quaraí utilizando previsão de chuva**. I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba, PR, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Chuvas Intensas no Estado de Mato Grosso**. Carlos Ricardo Fietz (Coord.). Embrapa Agropecuária Oeste. Série Documentos - 104. 2ª Edição Revisada. Dourados, MS, 2011, 117 p.

EUCLYDES, HUMBERTO PAULO; FERREIRA, PAULO AFONSO; FARIA FILHO, REYNALDO FURTADO. **Critério de Outorga Sazonal para a Agricultura Irrigada no Estado de Minas Gerais. Estudo de Caso**. Revista ITEM – Irrigação & Tecnologia Moderna. Nº 71/72. 3º e 4º trimestre 2006.

FARMER, WILLIAM H., KOLTUN, G.F. *Geospatial tools effectively estimate non exceedance probabilities of daily stream flow at ungauged and intermittently gauged locations in Ohio* (Efetividade de ferramentas geoespaciais para estimativa da probabilidade de não-excedência de vazões diárias em locais sem informações ou pouco monitorado em Ohio/USA). *Journal of Hydrology: Regional Studies* 13. 2017, 208-221, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.006>

FRIEDRICH, MARCIANO. **Influência da Precipitação no Uso do Método Silveira para Bacias Hidrográficas entre 800 e 1000 km²**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS: 2017. 100 p.

GONÇALVES, LIDIANE SOUZA. **Relação Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS: 2011. 117 p.

HAY, L.E., AND UMEMOTO, MAKIKO, 2006. **Multiple-objective step wise calibration using Luca**. U.S. Geological Survey Open-File Report 2006–1323, 25 p. [Also available at <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1323/>.]

HORN, JOÃO FRANCISCO CARLEXO. **Estimativa de Vazão com Dados Escassos: Novas Hipóteses para o Método Silveira**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Solo e Água. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS: 2016. 539 p.

KALIN, L.; HANTUSH, M. M. *Hydrologic modeling of na eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and raingauge data* (Modelo Hidrológico da bacia do Leste da Pensilvania com NEXRAD e dados de chuva monitorados). *Journal of Hydrologic Engineering*. v. 11, nº 6, p. 555-569.

MACHADO, CAMILA DOURADO. **Krigagem Ordinária para Predição de Vazões em Locais Sem Dados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande/MS: 2016.

MARCUZZO, F. F. N.; ROCHA, H. M.; MELO, D. C. R. **Mapeamento da precipitação pluviométrica no bioma da Amazônia do Estado de Mato Grosso**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE, 2010.

MATO GROSSO. **Relatório do Estudo de Regionalização Hidrológica do Estado de Mato Grosso**. Gerência de Outorga – GOUT. Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA. Cuiabá/MT, 2008.

MEDEIROS, M. J., NAGHETTINI, M. C. **Análise da viabilidade de aplicação de um fator de correção anual para o critério de vazão de outorga adotada no Estado de Minas**

Gerais. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 6., 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. 1 CD-ROM.

MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M. **Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas.** Revista Brasileira de Ciências do Solo. Viçosa-MG, v. 25, n. 3, p. 693-698, 2001.

MELLO JUNIOR, ARIOSVALDO VIEIRA; GARCIA, JOAQUIM IGNACIO BONNECARRERE. **Hidrologia Aplicada.** Disciplina PHA 3307, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.pha.poli.usp.br/default.aspx?id=1&link_uc=disciplina, acessado em 13/11/2017.

MCINTYRE, NEIL; LEE, HYOSANG; WHEATER, HOWARD; YOUG, ANDY; WAGENER, THORSTEN. **Ensemble Predictions of runoff in ungauged catchments.** *Water Resources Resarch.* Vol. 41, W12434, doi: 10.1029/2005WR004289, 2005.

OLIVEIRA, CRISTIANO DE PÁDUA MILAGRES. **Plataforma de Análise e Simulação Hidrológica PLASH.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental. USP, São Paulo: 2012. 180 p.

PAIVA, JOÃO BATISTA DIAS DE (Org.); PAIVA, ELOIZA MARIA CAUDURO DIAS DE (Org.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas.** 2º reimpressão ver. aum. da 1º Edição. Porto Alegre: ABRH, 2016. 628 p.

PADUA, LUIZ HENRIQUE RESENDE DE. **Regionalização de Hidrogramas Unitários em bacias não monitoradas do Estado de Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte: 2015. 188 p.

PALANISAMY, BAKKIYALAKSHMI; WORMAN, STEPHEN R. **Observação de Hidrógrafas: Sobre a sua capacidade de inferir uma função de transferência hidrológica invariante no tempo para a previsão do fluxo em bacias sem dados.** *Journal Hydrological Processes.* Hydrol. Process. 28. 401-413 (2014): Published online 5 november 2012 on Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

PESSOA, MARGARITA MARIA ELISA PEREIRA. **Integração de Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica na análise de processos de Outorga Quantitativa de uso da água: aplicação na Bacia do Rio dos Sinos - RS.** Dissertação de Mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS, Porto Alegre: 2010. 90 p.

MATO GROSSO. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Cuiabá: KCM Editora, 2009. 184 p.

RADAM BRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**. V. 26, Folha SD. 21, Cuiabá, 1982.

RAVANELLO, MARIANE MOREIRA. **Análise Técnica, Legal e Social para subsídios à Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí – RS**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS: 2007.

ROCHA, JOSÉ PEDRO GARCIA DA. **Avaliação das Ações Antrópicas no Meio Físico a partir dos Impactos Sedimentológicos na Bacia do Rio Coxipó**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia. UFRJ, Rio de Janeiro/RJ: 2003. 114 p.

RODRIGUEZ, FERNANDO ANTONIO. **Outorga de direito de uso, tendo em vista as incertezas dos cenários futuros, em face às Mudanças Climáticas. Vantagens e desvantagens das experiências internacionais sobre mudanças climáticas e alocação de água**. Relatório Final, Cooperação Técnica ANA/IICA, Brasília, DF, 2015, 85 p.

SEMA; SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **Produto 4 – Relatório com dados pluviométricos e fluviométricos sistematizados e consistidos e Informações Hidrológicas especializadas**. Cuiabá/MT: 2008.

SEPLAN; SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL. TARIFA, JOSÉ ROBERTO (Org.). **Mato Grosso – Clima: Análise e Representação Cartográfica**. Ed. Entrelinhas. Rondonópolis-MT: 2012.

SILVA, WENDERSON CARVALHO. **Mapeamento Geoambiental da bacia hidrográfica do Rio Coxipó – MT, escala 1:100.000**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá/MT: 2009. 87 p.

SILVEIRA, GERALDO LOPES. **Quantificação de Vazão em Pequenas Bacias Hidrográficas com Dados Escassos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – PPGIPH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre – RS, 1997. 184 p.

SILVINO, A. N. O. **Diagnóstico Quali-Quantitativo da Água da Bacia do Rio Coxipó e Modelagem da Qualidade da Água**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental. UFMT. Cuiabá/MT: 2008.

SINGH, JASWINDER, KNAPP, H.V., AND DEMISSIE, MISGANAW, 2004. *Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT: Champaign, Ill., Illinois State Water Survey Contract Report 2004–08*. [Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/90101/singh.pdf>, acessado em 13/11/2017].

SOUZA, ADRIANO MENDONÇA. **Análise de Variância – ANOVA (aulas de estatísticas)**. Professor do Departamento de Estatística. Universidade Federal de Santa Maria. [Disponível em: <http://w3.ufsm.br/adriano/>, acessado em 20/12/17].

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre, ed. ABRH/UFRGS, 2002. 256 p.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Colaboração da ABRH. 2º Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 666 p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4º Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 943 p.

_____. Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico – ZSEE: Diagnóstico Sócio-Econômico-Ecológico do Estado de Mato Grosso e Assistência Técnica na Formulação da 2º Aproximação. Memória Técnica de Recursos Hídricos – Disponibilidade Hídrica. Parte 2: Sistematização das Informações Temáticas. DSEE-RH-MT-001. CNEC, 2000