



Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**  
– Mestrado –

# **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída**

Por

**Vagner de Souza Felix**

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para  
obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa – Paraíba**

**Setembro de 2015**

Vagner de Souza Felix

**Representação dos processos hidrológicos em bacia  
hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem  
hidrológica distribuída**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade  
Federal da Paraíba como requisito parcial para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.*

**Orientador: Dr. Adriano Rolim da Paz**

F316r Felix, Vagner de Souza.  
Representação dos processos hidrológicos em bacia  
hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem  
hidrológica distribuída / Vagner de Souza Felix.- João Pessoa,  
2015.  
109f.  
Orientador: Adriano Rolim da Paz  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT  
1. Engenharia civil e ambiental. 2. Modelagem hidrológica  
distribuída. 3. MGB-IPH. 4. Região semiárida.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

Vagner de Souza Felix

**Representação dos processos hidrológicos em bacia  
hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem  
hidrológica distribuída**

Banca examinadora

---

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB  
Orientador

---

Prof. Dr. Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida – UFPB  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE  
(Examinador Externo)

---

Prof. Dr. Ana Claudia Fernandes Medeiros Braga – UFPB  
(Examinadora Externa)

## **Agradecimentos**

Agradeço Deus por ter me concedido a graça e oportunidade de cursar a pós-graduação (mestrado).

Quero agradecer ao apoio que recebi da minha família durante todo o meu tempo de estudo, desde a graduação até o término do mestrado.

A minha querida Kessia, pelo incentivo, pela ajuda e por ouvir meus desabafos durante a escrita da dissertação.

Ao meu orientador Adriano Rolim da Paz, primeiramente, por me aceitar como orientando, pela paciência que sempre teve, por compartilhar tantos conhecimentos e por ser um grande orientador. Aprendi muito com os seus ensinamentos, Adriano.

Aos meus amigos e amigas de turma André, Cris, Bea, Jacq, Nicolas, Lívia, Romero, pela ajuda nos trabalhos durante as disciplinas. E ao restante da turma, foi um prazer conhecer todos vocês.

Aos professores da pós-graduação que compartilharam conhecimento.

Ao professor Alfredo Ribeiro Neto por aceitar compor a banca examinadora para avaliação da minha dissertação.

A professora Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga por aceitar compor a banca examinadora para a defesa da minha dissertação.

Ao professor Cristiano das Neves Almeida por acompanhar, desde o início, o desenvolvimento da minha pesquisa e dissertação, e por aceitar compor a banca examinadora para a defesa da minha dissertação.

## Resumo

A modelagem hidrológica distribuída pode auxiliar na representação espaço-temporal dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. O modelo hidrológico distribuído para grandes bacias MGB – IPH vem sendo aplicado em diversas bacias hidrográficas brasileiras e da América Sul, porém foi pouco aplicado em bacias de rios intermitentes. A região semiárida é caracterizada por apresentar uma grande variabilidade climática, solo seco, pouco profundo e com afloramento de rochas cristalinas, fatores esses que podem exercer uma enorme influência para a modelagem hidrológica distribuída. Nesse sentido, torna-se necessário desenvolver e aprimorar modelos hidrológicos para simular tal complexidade de dados. Além disso, compreender os processos hidrológicos da região semiárida pode ajudar no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa é analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais dos processos hidrológicos na bacia do Rio Piancó – PB. Neste estudo, a modelagem hidrológica abrange parte da bacia do rio Piancó, aquela situada a montante do posto fluviométrico Piancó, com uma área de 4603,39 km<sup>2</sup>. O modelo MGB-IPH foi rodado com passo de tempo diário, posteriormente, foram geradas vazões com passo de tempo mensal. Foram utilizadas 14 estações pluviométricas e a série de vazões do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000). A partir da análise dos dados de vegetação e uso/tipo de solo foram definidas 7 Unidades de respostas hidrológicas (HRUs), são elas: Argissolos/Caatinga, litossolos/caatinga, cambissolos/caatinga, argissolos/atividade agrícola, luvisolos/atividade agrícola, lítossolos/atividade agrícola. Para a alta resolução espacial foi adotada uma discretização em grade regular de 0,05° x 0,05°, ou seja, células de aproximadamente 5 x 5 km. O modelo MGB-IPH foi aplicado para um período de 42 anos (1970 a 2011), sendo definidos dois períodos de 21 anos utilizados para calibração e validação. O modelo foi calibrado em duas versões, uma manualmente e outra automaticamente com algoritmo de otimização. Além das funções objetivo padrões do modelo, coeficiente Nash-Sutcliffe aplicado às vazões, o mesmo coeficiente aplicado ao logaritmo das vazões, e erro de volume, foram adotadas duas outras métricas, o normalized benchmark efficiency (BE) e o coeficiente de eficiência volumétrica (VE), porém tais equações foram utilizadas apenas para analisar os resultados. Os resultados mostram que o MGB-IPH representou satisfatoriamente o regime de vazão observado. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para calibração manual a nível diário foi de 0,70 e para calibração automática foi de 0,72. A validação a nível diário apresentou NS de 0,65. A validação apresentou NS a nível mensal de 0,84. Os processos hidrológicos intermediários à transformação chuva-vazão (evapotranspiração, armazenamento de água no solo e geração de escoamento) mostraram-se coerentes em termos de sazonalidade, magnitude e distribuição espacial na bacia. Conclui-se, portanto, pela aplicabilidade, que modelo hidrológico MGB-IPH tem potencial para simular os processos hidrológicos a nível diário em bacias de rios intermitentes.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica distribuída; MGB-IPH; Região semiárida.

## Abstract

Distributed hydrological modeling can help spatio-temporal representation of hydrological processes in a catchment area. The distributed hydrologic model for large basins MGB - IPH has been applied in various Brazilian and South American river basins, but has been little used in intermittent rivers basin. The semi-arid region is characterized by having a large climate variability, dry and shallow soils, and with outcrops of crystalline rocks, factors that may have a huge influence for distributed hydrological modeling. In this sense, it is necessary to develop and improve hydrological models to simulate such complex behavior. In addition, understanding the hydrological processes of the semiarid region may help in the planning and management of water resources. Thus, the main objective of this research is to analyze the performance of the distributed hydrological model MGB-IPH in representing the spatio-temporal patterns of hydrological processes in the Piancó river catchment (PB). In this study, hydrological modeling covers part of the Piancó river catchment, one located upstream of the Piancó gauging station, with an area of 4603.39 square kilometers. The MGB-IPH model was run with daily time step time thereafter flows were generated on a monthly time step. Fourteen rainfall stations and the runoff station of Piancó (ANA Code 37340000) were used. From the analysis of vegetation cover, land use and soil type, 7 hydrological response units (HRUs) were defined, they are: Argisols/Caatinga, litosoils/caatinga, cambisoils/caatinga, argisoils/agriculture, luvisols/agriculture, lítosoils/agriculture. A 0.05 x 0.05 square-grid spatial discretization was adopted, i.e. cells of approximately 5 x 5 km. The MGB-IPH model was applied for a period of 42 years (1970-2011), considering each period of 21 years for calibration and validation. The model was calibrated in two versions, one manually and another automatically, by using an optimizing algorithm. In addition to the objective functions commonly used in the model calibration and validation (Nash-Sutcliffe coefficient for discharges, this same coefficient for logarithms of discharges, and volume error), two other metrics were used for results evaluation, which are the normalized benchmark efficiency (BE) and the volumetric efficiency ratio (VE), but these equations were not used to calibrate the model. The results showed that MGB-IPH model satisfactorily represented observed flow regime. The coefficient of Nash-Sutcliffe (NS) for manual calibration daily level was 0.70 and for automatic calibration was 0.72. In the validation period, daily NS was 0.65, while at monthly basis NS was about 0.84. Thus, it can be concluded that the MGB-IPH hydrologic model is applicable and has potential do simulate the hydrological processes in a daily basis in intermittent river catchments.

**Keywords:** Distributed hydrological modeling; MGB-IPH; Semiarid region.

# Sumário

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE EQUAÇÕES	
LISTA DE SIGLAS	
Capítulo 1. Introdução.....	14
1.1. Objetivo.....	17
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica .....	18
2.1. Modelagem hidrológica.....	18
2.1.1 Conceitos gerais.....	18
2.1.2 Modelos distribuídos .....	20
2.1.3. O modelo MGB-IPH .....	23
<i>Estrutura geral</i> .....	23
<i>Dados de entrada</i> .....	23
<i>Representação dos processos hidrológicos</i> .....	25
<i>Parâmetros fixos e calibráveis</i> .....	29
<i>Ajuste do modelo</i> .....	32
2.1.4 Aplicações do MGB-IPH.....	33
2.2. Modelagem de processos hidrológicos em regiões semiáridas .....	37
2.2.1 Processos hidrológicos .....	37
2.2.2 Estudos de modelagem hidrológica no semiárido .....	38
3. Metodologia.....	45
3.1 Área de estudo .....	45
3.2 Dados disponíveis e visão geral do estudo .....	46
3.3 Aplicação do modelo MGB-IPH .....	49
3.3.1 Processamento do MNT .....	49
3.3.2. Unidades de resposta hidrológica .....	51
3.3.3. Definições dos parâmetros fixos .....	53
3.3.4 Preparação dos dados de precipitação .....	56
3.3.5. Preparação dos dados meteorológicos .....	57
3.3.6 Preparação dos dados de vazão .....	58
3.3.7 Ajuste do modelo.....	59
3.3.8 Análise da relação dos processos hidrológicos simulados e uso da terra.....	63
4. RESULTADOS e DISCUSSÃO .....	64
4.1 Representação do regime de vazões no rio Piancó.....	64
4.1.1. Ajuste do modelo hidrológico .....	65



4.1.2. Parâmetros ajustados .....	65
4.1.3. Qualidade do ajuste ao nível diário .....	70
4.1.4. Qualidade do ajuste ao nível mensal .....	78
4.2 Representação espaço-temporal dos processos hidrológicos .....	83
4.2.1 Evapotranspiração .....	84
4.2.2 Umidade do solo .....	90
4.2.3 Geração do escoamento .....	93
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	98
5.1 Conclusões .....	98
5.2 Recomendações .....	99
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do modelo de armazenamento na camada superior do solo (COLLISCHONN, 2001).....	25
Figura 2: Esquema de geração e propagação da água em uma célula (RIBEIRO NETO, 2006).....	27
Figura 3: Hidrogramas calculados e observados durante o período de calibração: (a) do Rio Taquari Antas até Muçum (15 826 km <sup>2</sup> ); (b) Rio Carreiro em Passo Carreiro (1.250 km <sup>2</sup> )...	34
Figura 4: Hidrograma da calibração dos modelos GRH e SFMODEL.....	41
Figura 5: Vazões observada e calculada em Floresta com o MGB-IPH (modificado) e MODHAC.....	43
Figura 6: Limite geográfico da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB.....	44
Figura 7: Precipitação média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó.....	45
Figura 8: Localização dos postos pluviométricos, meteorológicos e fluviométrico..	47
Figura 9: Etapas do estudo.....	48
Figura 10: Extração da rede de drenagem e limite da bacia derivada do MDE.....	50
Figura 11: Mapa de vegetação/ uso do solo da bacia hidrográfica do rio Piancó.....	52
Figura 12: Mapa de tipo do solo da bacia hidrográfica do rio Piancó.....	52
Figura 13: Classes de uso/tipo solo para a Bacia do Rio Piancó – PB.....	52
Figura 14: Identificação do posto pluviométrico mais próximo (P) de um elemento da planície (em cinza) e seleção dos postos (círculos pretos cheios) localizados dentro de um raio (r) igual a cinco vezes à distância mínima (dm) para efetuar a interpolação da precipitação para o elemento da planície (postos pluviométricos não selecionados são indicados pelos círculos pretos vazios).....	56
Figura 15: Dados meteorológicos médios da estação São Gonçalo.....	57
Figura 16: Disponibilidade de dados dos postos pluviométricos para o período de calibração do modelo MGB-IPH.....	59
Figura 17: Disponibilidade de dados dos postos pluviométricos para o período de validação do modelo MGB-IPH.....	59
Figura 18: Disponibilidade de dados do posto fluviométrico Piancó para o período de calibração do modelo MGB-IPH.....	60
Figura 19: Disponibilidade de dados do posto fluviométrico Piancó para o período de validação do modelo MGB-IPH.....	60
Figura 20: Dados de vazão observados no posto fluviométrico Piancó – PB.....	60
Figura 21: hidrograma de vazão na calibração manual no posto fluviométrico Piancó nos anos de 1985 a 1989.....	69
Figura 22: hidrograma de vazão na calibração manual no posto fluviométrico Piancó.....	69
Figura 23: Hidrograma de vazão na calibração automática entre os anos de 1985 a 1989.....	73
Figura 24: Hidrograma de vazão na calibração automática período de 1970 a 1990.....	74

Figura 25: Gráfico de dispersão da calibração manual.....	75
Figura 26: Gráfico de dispersão da calibração automática.....	75
Figura 27: Hidrograma no período de validação do modelo (2003-2009) para o posto fluviométrico Piancó.....	76
Figura 28: Hidrograma no período de validação do modelo (2001-2011) para o posto fluviométrico Piancó.....	76
Figura 29: Gráfico de dispersão da validação do modelo. ....	77
Figura 30: Hidrograma da calibração manual a nível mensal para o posto fluviométrico Piancó.....	78
Figura 31: Gráfico de dispersão mensal da calibração manual. ....	79
Figura 32: hidrograma na calibração automática a nível mensal para o posto fluviométrico Piancó .....	81
Figura 33: Gráfico de dispersão mensal da calibração automática. ....	82
Figura 34: Hidrograma de vazão mensal da validação do modelo no posto fluviométrico Piancó. ....	82
Figura 35: Gráfico de dispersão mensal para o período de validação.....	83
Figura 36: Variação da evapotranspiração real anual na bacia do rio Piancó.....	84
Figura 37: Variação da evapotranspiração real e chuva mensal na bacia do rio Piancó .....	85
Figura 38: Evapotranspiração e umidade diárias calculadas pelo MGB-IPH paraHRU (a) HRU do tipo argissolos/caatinga e para (b) HRU do tipo Argissolos/atividade agrícola para a célula 90.....	88
Figura 39: Evapotranspiração espaço-temporal média mensal (mm) na bacia do rio Piancó..	90
Figura 40: : Umidade média anual na bacia do rio Piancó.....	91
Figura 41: Umidade média mensal na bacia do rio Piancó .....	91
Figura 42: Variação espaço-temporal mensal de umidade na bacia hidrográfica do rio Piancó (mm). ....	92
Figura 43: Escoamento médio anual (Esup = superficial; Eint = intermediário; Ebas = de base) calculado pelo MGB-IPH para bacia do rio Piancó, além da precipitação (P). ....	93
Figura 44: Escoamento médio mensal calculado pelo MGB-IPH e precipitação observada para bacia do rio Piancó. ....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de entrada para o modelo hidrológico MGB-IPH. ....	24
Tabela 2: Valores de parâmetros de albedo reportados em revisão bibliográfica de Bayer e Collischonn (2013).....	28
Tabela 3: Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH .....	29
Tabela 4: Valores das estatísticas para o período de calibração e validação nas demais aplicações modelo MGB-IPH. ....	33

Tabela 5: Valores das estatísticas. Fonte: Freitas (1994)...	38
Tabela 6: Comparação dos resultados da calibração e validação para as diferentes categorias do modelo. Fonte: Escarião et al. (2012)...	40
Tabela 7: Comparação dos resultados da calibração e validação para as diferentes categorias do modelo. Fonte: Ribeiro Neto et al. (2012)...	42
Tabela 8: Postos pluviométricos utilizados na pesquisa.....	45
Tabela 9: Rotinas em linguagem Fortran utilizadas no estudo.....	49
Tabela 10: Unidade de resposta hidrológica (HRU) da bacia hidrográfica do rio Piancó... ..	52
Tabela 11: Valores do parâmetro Índice de área Foliar (IAF) para a bacia hidrográfica do rio Piancó.....	54
Tabela 12: Valores do parâmetro albedo para a bacia hidrográfica do rio Piancó.....	54
Tabela 13: valores do parâmetro resistência superficial para a bacia hidrográfica do rio Piancó.....	55
Tabela 14: Valores do parâmetro altura da cobertura vegetal para a bacia hidrográfica do rio Piancó.....	55
Tabela 15: Parâmetros calibrados manualmente.....	64
Tabela 16: Limites dos parâmetros para calibração automática.....	67
Tabela 17: Parâmetros calibrados automaticamente.....	68
Tabela 18: Parâmetros calibrados automaticamente.....	68
Tabela 19: Estatísticas a nível diário na calibração manual.....	70
Tabela 20: Estatísticas a nível diário na calibração automática.....	71
Tabela 21: Estatísticas a nível diário na validação.....	77
Tabela 22: Estatísticas a nível mensal na calibração manual.....	78
Tabela 23: Estatísticas a nível mensal na calibração automática do modelo.....	80
Tabela 24: Estatísticas a nível mensal na validação do modelo.....	82
Tabela 25: Evapotranspiração por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal.....	85
Tabela 26: valores mínimo e máximo de evapotranspiração nas HRUs.....	88
Tabela 27: Umidade por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal.....	90
Tabela 28: Escoamento médio por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal.....	94

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação balanço hídrico na camada superficial do solo .....	25
Equação 2 e 3: Função de Brooks e Corey para a condutividade hidráulica.....	27
Equação 4 e 5: Equação para o calculo do escoamento subterrâneo.....	27

Equação 6: Equação para calcular o tempo de retardo do modelo do reservatório linear simples .....	30
Equação 7 e 8: Equação para calcular o tempo de concentração da célula .....	30
Equação 9: Equação para o cálculo do coeficiente Nash-Sutcliffe .....	31
Equação 10: Equação coeficiente para o logaritmo das vazões .....	32
Equação 11: Equação Erro de volume.....	32
Equação 12: Equação Coeficiente de correlação.....	61
Equação 13: Equação do Erro Médio Absoluto .....	62
Equação 14: Equação da Raiz do Erro Médio Quadrático .....	62
Equação 15: Equação para cálculo do Normalized benchmark efficiency .....	62
Equação 16: Equação coeficiente de Eficiência volumétrica.....	62

## LSTA DE SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba.

ANA – Agência Nacional das Águas

b - Parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo.

BE - Normalized Benchmark Efficiency

Cb – Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

CI - Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células.

CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos.

Cs - Parâmetro para calibração da propagação superficial nas células.

ET – Evapotranspiração.

EMA - Erro Médio Absoluto.

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica.

IAF – Índice de Área Foliar

INMET/CPTEC – Instituto Nacional de Meteorologia.

Kint - Parâmetro de drenagem subsuperficial.

Kbas - Parâmetro de escoamento subterrâneo.

MGB - Modelo Hidrológico Distribuído.

NS – Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

NSlog - Coeficiente para o logaritmo das vazões.

r - Coeficiente de correlação.

REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático.

SIG – Sensoriamento Remoto

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.

VE - Coeficiente de Eficiência Volumétrica

Wc - Limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou

Wm – Armazenamento de água no solo.

## INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica pode ser utilizada para diversas aplicações como na estimativa de disponibilidade de recursos hídricos (COLLISCHONN et al. 2011), previsão da estimativa de vazão (COLLISCHONN, 2006; SILVA et al. 2007; SANTOS E SILVA, 2007), análise da variabilidade hidrológica (RIBEIRO NETO, 2006; GETIRANA et al. 2009), estudo das consequências de mudanças do uso do solo (BAYER E COLLISCHONN, 2013), na Modelagem Hidrossedimentológica (SANTOS E SRINIVASAN, 2012; SILVA, 2005), análises do ciclo do biogeoquímico nas fases terrestre e aquática em bacias hidrográficas (SORRIBAS et al. 2012), na representação de padrões espaço-temporais de inundação e escoamento de planície (PAZ et al. 2010), e entre outras aplicações.

Diversos são os modelos hidrológicos, e o que difere são as variáveis adotadas para a realização da modelagem (SILVA et al. 2007). Nesse sentido, os modelos podem ser classificados em: empíricos, conceituais ou combinados (TUCCI, 2005).

A vantagem dos modelos empíricos é a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização de parâmetros em tempo real, uma vez que não fazem uso de conceitos físicos dos processos hidrológicos. Já os modelos conceituais podem ser classificados como distribuídos e concentrados, e tem a capacidade de extrapolação e tratamento das variáveis hidrológicas.

Os modelos hidrológicos distribuídos procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, da natureza do solo, da ocupação do solo e do relevo, assim como, da distribuição espacial-temporal da precipitação, e, eventualmente, da evapotranspiração potencial (SILANS et al. 2000). Por considerar tal gama de dados pode permitir analisar padrões espaço-temporais das variáveis hidrológicas de uma bacia hidrográfica.

O modelo hidrológico distribuído para grandes bacias MGB – IPH foi desenvolvido por Collischonn (2001) e apresentando por Collischonn et al. (2007). O MGB-IPH vem sendo aplicado em diversas bacias hidrográficas no Brasil e da América Sul. Porém o modelo foi pouco aplicado em bacia de rios intermitentes, onde o fluxo de água varia abruptamente ao longo do ano, podendo chegar a valores mínimos. Apenas os trabalhos de Ribeiro Neto et al. (2007) e Lima Sobrinho (2012) apresentam tal tipo de aplicação, porém devido as dificuldades encontradas pelo segundo autor em relação as coletadas de dados, não foi possível observar com tanto rigor o comportamento do modelo sobre tais condições.

Já Ribeiro Neto et al. (2007) aplicaram o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em sub-bacias do rio São Francisco e compararam os resultados do obtidos pelo modelo

MGB-IPH com um modelo concentrado muito utilizado em bacias de clima semiárido, que é o modelo MODHAC (LUNNA, 1997). Os resultados da pesquisa mostraram que o MGB-IPH possui potencial para ser utilizado em grandes bacias de regiões semiáridas, no entanto, os autores optaram por desenvolver algumas modificações no modelo, mas não analisaram os processos espaço-temporais das variáveis hidrológicas na região semiárida.

A região semiárida é caracterizada por apresentar uma grande variabilidade climática, um baixo índice pluviométrico e períodos de secas prolongadas, o solo da região é de pouca profundidade e, ainda, podendo apresentar afloramento de rochas cristalinas, fatores esses que podem exercer uma enorme influência para a modelagem hidrológica distribuída. Além disso, o regime de vazão de tal região pode variar bastante, podendo alcançar altos picos de vazão no período chuvoso e chegar à vazão zero no período de estiagem.

Vale salientar que a população que habita tal região sofre bastante pela falta d'água, ou pela má gestão dos recursos hídricos aliado aos longos períodos de estiagem, dificultando o desenvolvimento das atividades agropecuárias, entre outras. E isso pode ser agravado ainda mais devido às mudanças climáticas.

Nesse sentido, torna-se necessário aprimorar modelos hidrológicos para simular tamanha variabilidade climática, modelar, adequadamente, a demanda hídrica de uma bacia hidrográfica, previsões de vazões e cenários de mudanças climáticas, com intuito de aumentar o grau de conhecimento sobre a hidrologia da região.

Compreender como ocorrem os processos hidrológicos da região semiárida pode favorecer a sociedade ajudando no processo de planejamento de suas atividades e, ainda, na gestão dos recursos hídricos.

Além disso, ter um modelo que adequadamente representa os processos hidrológicos é a base para a realização de previsões de vazão mais confiáveis, o que será feito com a continuidade desta pesquisa, dentro do escopo do projeto de pesquisa intitulado “Improve models for long- and short-term flood forecasting in temperate and semi-arid/tropical watersheds”, ao qual esta dissertação está vinculado e desenvolvido em conjunto entre UFPB, Universidade Federal de Alagoas e University of Lund (Suécia).

Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa é analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais dos processos hidrológicos na bacia do Rio Piancó – PB. Esta é uma sub-bacia do Rio Piranhas-açu, localizada na região semiárida paraibana, e possui grande influência socioambiental e econômica para a região.



## **1.1 Objetivo geral**

Analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais dos processos hidrológicos na bacia do Rio Piancó – PB.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Analisar a capacidade de representar a variabilidade intra e inter anual do regime de vazões na bacia;
- Identificar padrões espaços-temporais de processos hidrológicos na bacia do Rio Piancó - PB;
- Identificar relações entre os processos hidrológicos simulados e uso da terra;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Modelagem hidrológica**

#### **2.1.1 Conceitos gerais**

A modelagem hidrológica pode ser definida como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores dos dados observados (TUCCI, 1998).

Idealmente, a modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, sobre todos os processos físicos que ocorrem durante a precipitação pluviométrica, ou seja, a própria chuva, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial. Todos esses processos podem ser representados na modelagem através de equações matemáticas (SANTOS, 2009).

Os métodos geralmente utilizados para a modelagem hidrológica são diferenciados pelas variáveis empregadas para realizar a simulação e de acordo com as metodologias de cálculo.

Os principais métodos para a simulação hidrológica são: modelos físicos, modelos estocásticos ou determinísticos, modelos estatísticos, modelos de redes artificiais e modelos concentrados ou distribuídos (TUCCI, 2005).

Antes de relatar sobre os modelos estocásticos, estatísticos e de rede neurais, torna-se necessário relatar sobre os modelos empíricos. De acordo com Tucci (2005), os modelos do tipo empírico ou “caixa-preta” são aqueles que não têm nenhuma relação com os processos físicos de uma bacia hidrográfica.

Nesse sentido, os modelos estocásticos, estatísticos e de redes artificiais são empíricos e se baseiam na informação existente na bacia, caso os elementos que permitem a previsão não sejam observados, estes modelos passam a reproduzir basicamente a sazonalidade ou a estatística passada, independentemente da sofisticação metodológica. Também utilizam procedimentos empíricos nas relações entre as variáveis que podem ficar comprometidas quando existe forte não-linearidade, como nos processos hidrológicos (SILVA, 2005).

Quando não existe uma boa teoria para o processo hidrológico, ou quando a teoria é boa, mas inaplicável, com os dados e as ferramentas disponíveis para manipulá-los, a opção recai sobre modelos estatísticos. Os modelos estatísticos buscam relacionar causas e efeitos sem considerar o processo interno de transformação (COLLISCHONN, 2005).

Alguns trabalhos sobre modelos empíricos podem ser encontrados em Macedo (2013), Batista (2009), Souza e Souza, (2010) e Mine (2005).

Os modelos empíricos não utilizam conceitos físicos dos processos hidrológicos. A vantagem dos modelos empíricos é a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas (TUCCI, 2005).

Os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão (SANTOS, 2009).

Segundo Tucci (2005), a definição de modelo conceitual é artificial, já que funções empíricas são também usadas, mas estão relacionadas com a física do sistema. É bem comum a utilização de uma subdivisão na classificação dos modelos conceituais em físicos e semi-conceituais.

O modelo pode ser considerado semi-conceitual quando procura relacionar característica do processo hidrológico de uma bacia hidrográfica, ao mesmo tempo em que apresenta um razoável grau de empirismo na definição dos parâmetros das equações envolvidas na lógica do sistema. Já o modelo é dito físico ou puramente físico quando adotam as principais equações diferenciais do sistema físico. Para representar os processos e os parâmetros, os modelos físicos são aqueles que mais se aproximam da física do sistema (TUCCI, 2005).

Os modelos conceituais mantêm uma base física mínima, mas contêm parâmetros que não podem ser medidos diretamente em um experimento no sistema hidrológico e, portanto, exigem uma etapa de ajuste ou de calibração. A etapa de calibração de modelos conceituais pode ser incrementada com a definição, a priori, dos possíveis valores que podem tomar os parâmetros, com base em observações do sistema (COLLISCHONN, 2001).

Segundo Collischonn (2001), o conhecimento dos processos hidrológicos é limitado em grande parte pela variabilidade destes processos e pela escassez de dados. Em alguns problemas específicos da hidrologia, o processo físico é razoavelmente bem conhecido, e a descrição matemática relativamente simples. Este é o caso da propagação de ondas de cheia em rios e canais, que pode ser simulado por modelos matemáticos hidrodinâmicos, onde o escoamento é representado por equações diferenciais. Os modelos que representam os processos físicos com esta exatidão teórica são chamados modelos hidrológicos de base física.

Como o referido autor observa, uma característica importante dos modelos de base física é que quaisquer parâmetros ou constantes das suas equações podem ser estimados razoavelmente bem a priori, dadas as características do sistema hidrológico a representar, ou podem ser medidos, de forma independente. Quando a carência de compreensão teórica ou quando a dificuldade de obter os dados aumentam, os modelos de base física têm sido substituídos pelos modelos conceituais.

As metodologias a respeito dos processos hidrológicos e sua modelagem matemática é algo relativamente bem conhecido no ramo acadêmico, embora avanços continuem sendo necessários. A crescente disponibilidade de dados, como aqueles obtidos por sensoriamento remoto orbital, e o aumento do poder computacional tem possibilitado o aprimoramento de estudos de modelagem do regime hidrológico de bacias hidrográficas, principalmente de grande escala, da ordem de milhares de km<sup>2</sup>.

O avanço tecnológico e de disponibilidade de dados tem motivado, inclusive, o desenvolvimento de novas abordagens de modelagem hidrológica, apresentando resultados aceitáveis. Surgiram, conseqüentemente, propostas de modelos capazes de representar diversas variáveis do ciclo hidrológico, como mudanças climáticas e de usos e ocupação do solo, como será visto a seguir.

### **2.1.2 Modelos distribuídos**

Os modelos conceituais, ou físicos, podem ser classificados como distribuídos ou concentrados. Os modelos distribuídos permitem melhor descrever a variabilidade espacial dos processos hidrológicos e das variáveis de entrada. Os modelos distribuídos podem ter estrutura dividida em sub-bacias, quando são denominados semi-distribuídos, ou em grades regulares.

A diferença fundamental entre os modelos distribuídos por sub-bacias e por grades está na estrutura de relação entre as características da bacia e dos parâmetros do modelo. Normalmente os modelos discretizados em grades são utilizados com uma resolução maior, e combinados com informações de uso do solo e de outras características físicas, permite uma melhor relação entre parâmetro e característica física (SILVA, 2005).

Sobre a escolha do tipo de estrutura, se é em sub-bacias ou em grades regulares, Paz et al. (2011) relatam que enquanto o uso de grade regular uniformiza o tamanho dos elementos, a dificuldade em definir as direções de fluxo e os trechos de rio para propagação do escoamento permanece como principal desvantagem para uso desse tipo de discretização

espacial, a despeito de metodologias propostas mais recentemente. A abordagem em sub-bacias supera tais limitações, mas causa o inconveniente de ter que lidar com enorme variação de área superficial e comprimentos de trecho de rio entre os elementos.

Segundo Santos (2009), o modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia. Já o modelo é considerado distribuído quando o mesmo procura representar, espacialmente, todas as variáveis de uma região. Em um modelo concentrado a entrada da precipitação é a média para toda a bacia hidrográfica, ou seja, um valor único para toda a bacia. Já a precipitação em modelos ditos distribuídos é caracterizada pela diferenciação da lâmina precipitada ao longo da bacia de drenagem. A principal vantagem de utilização de modelos hidrológicos distribuídos está na qualidade do modelo avaliar a capacidade em representar de maneira mais coerente a variabilidade espacial do sistema (LATUF, 2011).

Outra questão importante que pode ser abordada sobre a variabilidade espacial de um modelo distribuído é a que vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação; quanto maior for a superfície de folhagem, maior a área de retenção da água durante a precipitação. Esse volume retido é evaporado assim que houver capacidade potencial de evaporação. Quando esse volume, retido pela vegetação, é totalmente evaporado, a vegetação passa a perder umidade para o ambiente através da transpiração. A vegetação retira essa unidade do solo através de suas raízes (TUCCI e CLARKE, 1997).

A cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica influencia o comportamento do regime hidrológico da mesma. No entanto, devido às ocupações antrópicas, uma extensa área verde teve que ser desmatada para comportar as necessidades humanas, causando alterações na qualidade e quantidade da água presente nas bacias hidrográficas, ocasionando, também, modificações no regime de vazões, na erosão fluvial, infiltração e no escoamento da água sobre o solo. Essas alterações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente e para a disponibilidade dos recursos hídricos.

O efeito das mudanças de uso e ocupação do solo na modelagem foi estudado, por exemplo, por Bayer e Collischonn (2013). Os autores desenvolveram uma pesquisa cujo objetivo foi verificar a sensibilidade do modelo distribuído para grandes bacias MGB-IPH à simulação de mudanças de uso da terra, em termos de vazões médias de longo termo, e comparar seu desempenho aos resultados experimentais disponíveis na literatura. As simulações mostraram que o MGB-IPH reproduz, de forma coerente, o comportamento médio das bacias submetidas ao desmatamento em um grande número de estudos experimentais.

Por outro lado, essa maior representatividade espacial de um modelo hidrológico distribuído pode ocasionar um problema denominado efeito de escala. De acordo com Tucci e Clarke (2001), o problema de escala reside no fato de se escolher os parâmetros que basicamente representem os fenômenos físicos que ocorrem na região. Porém, cada área analisada possui características próprias e se apresentam de acordo com a sua heterogeneidade.

Em pequenas escalas, a heterogeneidade é pequena, porém, o contrário acontece nas grandes escalas, devendo ser analisadas cuidadosamente. Para pequenas condições de homogeneidade, os valores dos parâmetros podem ser relativamente facilmente encontrados, por exemplo: a condutividade hidráulica, dados de vegetação e dados sobre o solo, representando processos com mais certeza.

Dehotin e Braud (2007) elencam quais são os dados de entradas necessários para a simulação hidrológica com modelos hidrológicos distribuídos e também sobre a questão da escala espacial que recai sobre tais modelos e questionam se o condensamento de algumas variáveis pode influenciar ou não a modelagem hidrológica.

Em estudo desenvolvido por Santos e Srinivasam (2011), cujo objetivo foi verificar o desempenho do modelo hidrológico WEPP e o efeito da escala, os autores constataram que os parâmetros principais utilizados pelo modelo são muito sensíveis ao efeito de escala.

Pode-se ressaltar que os modelos concentrados podem apresentar resultados satisfatórios para o propósito para o qual foram empregados, mas só os modelos distribuídos são capazes de desenvolver a modelagem hidrológica considerando para os detalhes físicos da área em estudo em termos da variabilidade espacial.

No entanto, Hughes (2010) questiona se o nível de complexidade do modelo hidrológico está contribuindo para que o modelo possa ser utilizado para as razões certas. Ou seja, aumentar a complexidade dos modelos hidrológicos, como é o caso dos modelos hidrológicos distribuídos, nem sempre pode ser algo viável, pois os modelos hidrológicos distribuídos requerem uma quantidade elevada de dados para que possa simular o regime hidrológico de uma bacia, o que muitas vezes é difícil de definir, já que o nível de monitoramento, para algumas regiões, é escasso.

Como o referido autor observa, esta é uma consideração importante, e em áreas com escassez de dados, que muitas vezes são justamente as áreas para as quais os modelos hidrológicos teriam o potencial maior de fornecer informações valiosas para fins de planejamento e gestão de recursos hídricos, torna-se necessário generalizar alguns parâmetros

ou informações referentes à cobertura vegetal e ao tipo de solo para compensar o monitoramento incompleto e a falta de dados necessários para a aplicação do modelo.

Ainda sobre essa questão, Wildemeersch et al. (2014) desenvolveram um estudo com o intuito de analisar a influência da generalização da parametrização e a diminuição no detalhamento da discretização espacial sobre resultado final da simulação hidrológica. Já que muitas vezes, para diminuir o tempo de preparação dos dados, alguns pesquisadores tendem a generalizar alguns dados ou parâmetros necessários para o modelo, além, é claro da generalização por falta da aferição dos dados e parâmetros. Os resultados obtidos pelo estudo mostraram que o uso de discretização espacial mais grosseira influencia principalmente a simulação da vazão devido a uma má representação de rede de drenagem superficial e à suavização das declividades das vertentes, o que impede de simular adequadamente os processos de geração de escoamento e de interações entre águas subterrâneas e superficiais.

Outro resultado encontrado pelos referidos autores é que a sensibilidade dos parâmetros não foi significativamente influenciada pela mudança na discretização espacial e que calibração pode compensar, em certa medida, os erros do modelo induzidos pelo uso de grades mais grosseiras. Tais erros estariam relacionados principalmente à incerteza nas previsões de vazão.

Outros estudos sobre modelos hidrológicos distribuídos podem ser encontrados em Gosling e Arnell (2010); Sieber e Unlenbrook (2005); Kampf e Burges (2007); e Chen et al. (2005).

### **2.1.3 O modelo MGB-IPH**

#### *Estrutura geral*

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído para grandes bacias desenvolvido por Collischonn (2001) e bem descrito também em Collischonn et al. (2007b). O modelo é composto dos seguintes módulos: evapotranspiração; balanço de água no solo, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A propagação pela rede de drenagem é modelada através do método de Muskingum – Cunge, na

versão original do modelo. Estudos posteriores avaliaram outros métodos de propagação de escoamento, como a utilização de modelo hidrodinâmico unidimensional.

O modelo representa a bacia hidrográfica discretizada por células quadradas ou em sub-bacias. Para estabelecer a discretização espacial da bacia, faz-se o processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) e a extração da rede de drenagem e das características físicas necessárias, como comprimento e declividade dos trechos de rio, por exemplo.

Para o ajuste de parâmetros calibráveis, pode-se realizar tanto a calibração manual, por tentativa e erro, quanto o uso de um algoritmo de otimização multiobjetivo já incluído na estrutura do modelo MGB-IPH.

### *Dados de entrada*

Os dados de entrada do modelo hidrológico MGB-IPH consistem em: dados de precipitação e meteorológicos, dados referentes às características físicas e de cobertura vegetal da bacia hidrográfica, dados esses obtidos do modelo numérico do terreno (MNT) e pelos mapas de tipo e uso do solo. Na calibração e validação do modelo são utilizados dados de vazão observada (tabela 1).

Para discretização da bacia torna-se necessário extrair informações do Modelo Número do Terreno (MNT), tais como: definir e analisar o relevo do terreno, estabelecer a conexão das células quadradas definido, para isso, a rede de drenagem da bacia, além de traçar e calcular os trechos e comprimentos dos rios.

Os dados meteorológicos e de precipitação são trabalhados a nível diários. No entanto, como as séries de dados meteorológicos não são contínuas ou bem monitoradas, apresentando, assim, dados falhos ou faltosos, o MGB-IPH, com intuito de sanar a ocorrência de tais falhas, utiliza o dado médio mensal quando há a ocorrência de falhas na série.

Os dados meteorológicos são: insolação, temperatura, velocidade do vento, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. No caso da precipitação, as falhas são substituídas pela interpolação dos dados dos demais pluviômetros com dados válidos naquele dia.

Além da precipitação e dos dados meteorológicos, a vazão também é utilizada como dado de entrada do modelo. Os dados meteorológicos, dados de precipitação e da vazão observada são divididos em dois períodos, uma referente ao período de calibração, que serve para ajustar o modelo, e outro período para validação do modelo.



Tabela 1 – Dados de entrada para o modelo hidrológico MGB-IPH

<b>Tipo de dado</b>	<b>Descrição</b>	<b>Propósito</b>	<b>Forma de obtenção</b>
Dados pluviométricos	Valores diários de lâmina d'água precipitada em diferentes pontos ao longo da bacia	Caracterização da precipitação espacial e temporalmente	Dados de pluviômetros provenientes de bancos de dados dos órgãos competentes
Dados meteorológicos	Valores diários das variáveis climáticas	Cálculo da evapotranspiração	Dados de estações meteorológicas provenientes de bancos de dados dos órgãos competentes
Dados de vazão	Valores diários da vazão	Indicar a vazão observada para uso no ajuste dos parâmetros do modelo	Dados fluviométricos provenientes de bancos de dados dos órgãos competentes
Tipo de solo	Classificação e característica do solo	Definição de valores de parâmetros relativos ao solo	Mapas de solo provenientes de bancos de dados dos órgãos competentes
Uso do solo/coertura vegetal	Classificação e característica da cobertura vegetal e adensamento humano	Definição de valores de parâmetros relativos à cobertura vegetal e ao uso do solo	Mapas de uso do solo provenientes de bancos de dados dos órgãos competentes ou classificação de imagens orbitais
Dados topográficos	Relevo da bacia hidrográfica na forma de um MNT	Caracterização topográfica e determinação da rede de drenagem representada no modelo hidrológico	Dados extraídos do MNT
Rede de drenagem	Direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem, comprimentos e declividades dos trechos de rio	Estabelecer a conectividade entre as células da grade do modelo e prover informações para a propagação do escoamento superficial	Dados extraídos do processamento do modelo numéricos do terreno (MNT)

### *Representação dos processos hidrológicos*

Como mencionando anteriormente, o MGB-IPH na versão original discretiza a bacia hidrográfica em células quadradas. Cada célula é dividida em blocos ou unidade de resposta hidrológica (URH), que são definidos de acordo com os tipos de cobertura vegetal e dos usos e tipos dos solos. O balanço de armazenamento no solo é realizado de maneira independente para cada URH, utilizando o esquema apresentado na Figura 1.

A quantidade de URH utilizada pelo modelo é definida, a priori, a partir da análise das características físicas e ambientais da bacia. Sendo, posteriormente, definidos os grupos resultantes da combinação das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo, formando, assim, as URHs. Cada URH é caracterizada por uma série de parâmetros, tais como: armazenamento máximo no solo e o índice de área foliar (IAF) da vegetação, entre outros.

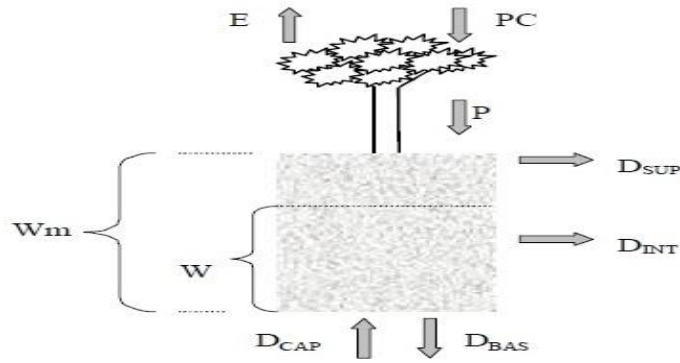


Figura 1: Esquema do modelo de armazenamento na camada superior do solo (COLLISCHONN, 2001).

Onde:  $P_c$  é a precipitação pluviométrica;  $E$  é a evapotranspiração e  $P$  a precipitação que não é evaporada e interceptada pela vegetação;  $W_m$  e  $W$  são parâmetro da capacidade de armazenamento da água no solo.

Os volumes drenados de cada da célula da URH são somados, segundo o seu tipo – subterrâneo (DBAS), subsuperficial (DINT) e superficial (DSUP) – em três reservatórios. Após passar por estes reservatórios o escoamento subterrâneo (QBAS), subsuperficial (QINT) e superficial (QSUP) são somados, resultando no escoamento gerado no interior da célula, que chega à rede de drenagem.

O balanço hídrico na camada superficial do solo é dado pela equação a seguir:

$$w_{i,j}^k = w_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - E_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}} + D_{cap_{i,j}}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:

$\Delta t$  [dias] é o intervalo de tempo (1 dia);  $w_{i,j}^k$  [mm] armazenamento na camada superficial ao final do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$ ;  $k = 1, 2, \dots, W$  – [mm] armazenamento na

camada superficial ao início do intervalo de tempo;  $i, j$   $P$  [mm/dia] precipitação menos a interceptação ao longo do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$ ;  $i, j$   $E$  [mm/dia] evapotranspiração da água do solo ao longo do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$ ;  $D_{sup,i,j}$  [mm/dia] drenagem superficial ao longo do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$  (drenagem rápida);  $D_{int,i,j}$  [mm/dia] drenagem sub-superficial ao longo do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$  (drenagem lenta);  $D_{bas,i,j}$  [mm/dia] drenagem subterrânea ao longo do intervalo de tempo no bloco  $j$  da célula  $i$  (drenagem muito lenta);  $D_{cap,i,j}$  [mm/dia] fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo ao longo do intervalo de tempo.

Para cada instante de cálculo  $w_{i,j}^k$  e  $P_{i,j}$  são conhecidos, e  $E_{i,j}$ ,  $D_{sup,i,j}$ ,  $D_{int,i,j}$ ,  $D_{bas,i,j}$  e  $D_{cap,i,j}$  são estimados com base no estado de armazenamento do início do intervalo de tempo ( $w_{i,j}^k$ ) e em parâmetros do modelo.

A primeira etapa do balanço hídrico do solo segue a metodologia utilizada em diversos modelos existentes na literatura mundial, como descrito em Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007). O primeiro passo consiste em estimar a precipitação pluviométrica que é retirada pela vegetação, ou seja, parte da chuva que precipita sobre uma área é retida pela vegetação antes de atingir e chegar ao solo propriamente dito.

O escoamento superficial é representado no modelo considerando que toda a precipitação pluviométrica que cai sobre uma porção de solo já saturada gera escoamento superficial. Considera-se, assim, que existe uma relação entre estado de armazenamento de água da chuva no solo no início do intervalo de tempo e a porcentagem de área saturada, representação essa utilizada, por exemplo, no modelo ARNO (TODINI, 1996 apud RIBEIRO NETO, 2006).

O escoamento sub-superficial depende das propriedades do solo (porosidade, distribuição dos poros, continuidade dos poros) e do fluido (viscosidade e densidade) (SILVA, 2005).

Para representar o escoamento sub-superficial, o modelo MGB-IPH utiliza a função de Brooks e Corey para a condutividade hidráulica conforme apresentada por RAWLS et al. (1993) apud Ribeiro Neto (2006). A função de Brooks e Corey, corresponde à capacidade do solo em transmitir água (dada em L.T-1), relacionando o escoamento sub-superficial ao índice de porosidade do solo ( $\lambda$ ) e à condutividade hidráulica em meio saturado (KINT):

$$D_{int_{i,j}} = K_{int_{i,j}} \cdot \left( \frac{W_{i,j} - W_{zj}}{W_{mj} - W_{zj}} \right)^{(3 + 2/\lambda_j)} \quad \text{quando } W_{i,j} > W_{zj}; \quad (2)$$

$$D_{int_{i,j}} = 0 \quad \text{quando } W_{i,j} \leq W_{zj}. \quad (3)$$

onde  $W_{zj}$  [mm] é o limite inferior de armazenamento no solo para haver escoamento subsuperficial;  $K_{intj}$  [mm/dia] é um parâmetro de drenagem sub-superficial;  $\lambda$  [ - ] é o índice de porosidade do solo (parâmetro).

O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples, com apenas um parâmetro que deve ser calibrado (RIBEIRO NETO, 2006), que é o parâmetro  $K_{bas}$ .

$$D_{bas_{i,j}} = 0 \quad \text{quando } W_{i,j}^{k-j} \leq W_{cj}; \quad (4)$$

$$D_{bas_{i,j}} = K_{bas_j} \cdot \left( \frac{W_{i,j}^{k-j} - W_{cj}}{W_{mj} - W_{cj}} \right) \quad \text{quando } W_{i,j}^{k-j} > W_{cj}. \quad (5)$$

Onde:  $W_{cj}$  [mm] limite para haver escoamento subterrâneo (parâmetro);  $K_{basj}$  [mm/dia] é o parâmetro de escoamento subterrâneo (drenagem muito lenta);  $D_{bas_{i,j}}$  [mm] é o escoamento subterrâneo (drenagem muito lenta).

Os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo referem-se ao escoamento que deixa a camada superior do solo. Tal escoamento não atinge imediatamente a rede de drenagem, uma vez que passa por reservatórios lineares, os quais retardam o avanço da água que escoar, e representam o tempo de propagação no interior da célula (figura 2).

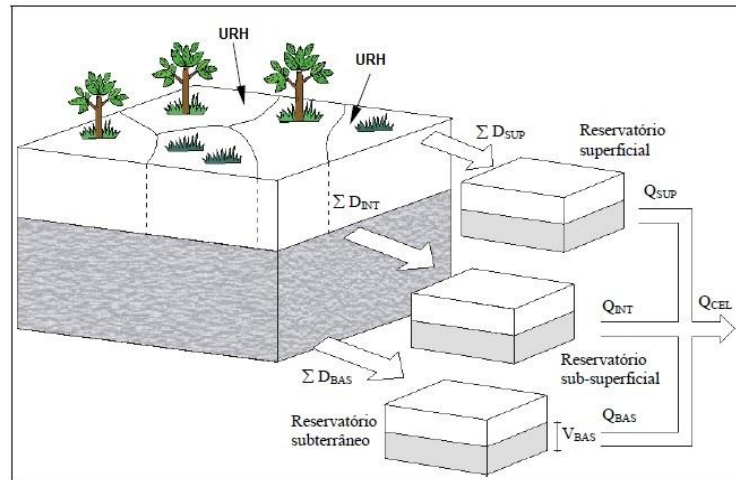


Figura 2: esquema de geração e propagação da água em uma célula (RIBEIRO NETO, 2006).

Assim, vale ressaltar que os tipos de escoamento não se misturam no interior do modelo, ou seja, o escoamento superficial vai para o reservatório superficial, o escoamento sub-superficial vai para o reservatório sub-superficial e o escoamento subterrâneo vai para o reservatório subterrâneo. A água não volta destes reservatórios para a camada superficial do solo, com a exceção da água do reservatório subterrâneo.

### *Parâmetros fixos e calibráveis*

Dois são os tipos de parâmetros utilizados no modelo: fixos e calibráveis (Tabela 3). Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos para cada aplicação do modelo MGB-IPH ou estimados com base em características físicas da bacia hidrográfica. Os parâmetros calibráveis são alterados a cada aplicação do modelo a uma bacia hidrográfica com o intuito de obter o melhor ajuste possível entre a vazão observada e a calculada.

Os parâmetros fixos utilizados pelo modelo MGB-IPH são: albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal.

O índice de área foliar expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. O IAF pode variar de 0,5 para pastagens amazônicas a 7,5 em soja irrigada (COLLISCHONN, 2001).

Outro parâmetro fixo é o albedo, que corresponde à parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. Em áreas agrícolas, o valor do albedo varia de acordo com a fase do ciclo de cultivo. Em regiões com época seca sazonal, o albedo pode aumentar, atingindo valores mais próximos ao do solo nu, podendo variar de 0,11 para florestas altas a 0,35 para solos expostos e seco (BAYER e COLLISCHONN, 2013)

Tabela 2: Valores de parâmetros de albedo reportados em revisão bibliográfica de

Classe	Valores de albedo
Florestas altas	0,11 — 0,16
Floresta amazônica	0,134
Florestas mistas	0,10 — 0,15
Florestas temperadas	0,15 — 0,20
Cultivos agrícolas	0,15 — 0,20 (altos) 0,20 — 0,26 (baixos)
Pastagens/gramíneas/campo	0,20 — 0,26
Cerrado brasileiro	0,13 (época úmida) e 0,18 (época seca)
Solo exposto	0,10 (úmido) e 0,35 (seco)

A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e dependente das variáveis ambientais, tais como: umidade do solo, temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.

A resistência superficial da vegetação depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, ou seja, sem déficit hídrico, os valores de resistência superficial são mínimos. À medida que o solo seca, a resistência superficial aumenta. Valores para a resistência superficial podem variar de 40 s.m<sup>-1</sup> (agricultura) a 200 s.m<sup>-1</sup> (cerrado) (COLLISCHONN, 2001).

O parâmetro altura da cobertura vegetal é utilizado para calcular a resistência aerodinâmica à evaporação. Valores encontrados na literatura indicam que altura da cobertura vegetal pode variar de 0,5 m (agricultura) a 30 m (floresta amazônica) (COLLISCHONN, 2001).

Tabela 3: Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH

Parâmetro	Descrição
Wm	Armazenamento de água no solo
B	Parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo.
Kint	Parâmetro de drenagem subsuperficial
Kbas	Parâmetro de escoamento subterrâneo.
Wc	Limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente.
Cb	Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.
Cs	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas células.
CI	Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células.

O Wm depende do tipo de solo e vegetação. Tal parâmetro influencia diretamente o balanço hídrico do solo, já que a quantidade de água retida no solo fica disponível para evapotranspiração até que seja drenada (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO NETO, 2006). Talvez esse seja o parâmetro mais sensível do modelo, o aumento ou diminuição do Wm, são facilmente percebidas na vazão calculada. Valores altos diminuem os picos de vazão e valores baixos de Wm aumentam os picos de vazões.

Várias aplicações do MGB-IPH têm mostrado que os valores para o  $W_m$  têm sido muito elevados, entre 1000 mm a 4000 mm para solos profundos e florestas (RIBEIRO NETO, 2006). Na aplicação desenvolvida pelo referido autor, o valor ideal para  $W_m$  ficou entre 6000 mm e 7000 mm para URH com solo profundo e florestas. Por outro lado, Saldanha et al. (2012) ajustaram o modelo com valores de  $W_m$  baixos, variando de 100 mm para o tipo de solo Neossolo Litólico a 350 mm para o nitossolo Vermelho.

O parâmetro  $b$  é utilizado para controlar a infiltração de água no solo. Valores altos desse parâmetro indicam que o hidrograma fica mais “nervoso” e que menor será a quantidade de água infiltrada no solo, aumentando, consequentemente, o escoamento superficial (COLLISCHONN, 2001). Usualmente, valores para o parâmetro  $b$  têm variado de 0,01 a 1,6 (COLLISCHONN, 2001; SILVA, 2005; NETO, 2006; GAMA, 2011; SALDANHA et al., 2012).

O  $K_{int}$  é o parâmetro que controla o escoamento sub-superficial. Algumas aplicações têm mostrado que os valores ideais para  $K_{int}$  (de 4 a 40 mm.dia<sup>-1</sup>) são sempre inferiores aos valores de condutividade hidráulica saturada dos diferentes tipos de solos (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO NETO, 2006; SILVA, 2005). O  $K_{bas}$  é o parâmetro que controla o escoamento de base. Valores elevados de  $K_{int}$  e  $K_{bas}$  aumentam a vazão total (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO NETO, 2006).

Por outro lado, Saldanha et al. (2012) adotaram valores de  $K_{int}$  bem variados para algumas sub-bacias do Rio Uruguai que fica localizada no sul do país. Para algumas sub-bacias o  $k_{int}$  foi dentro do limite estabelecido por Collischonn (2001) e para outros foram bem elevados. Por exemplo, para a sub-bacia do Rio Ijuí, com área de 9.452 km<sup>2</sup>, o  $k_{int}$  foi de 117,2 mm. A sub-bacia do Rio Guarita, que apresenta área de drenagem de 2.078 Km<sup>2</sup>, o  $k_{int}$  foi de 240,2 mm. E para Rio Passo Fundo, com área de 3.710 Km<sup>2</sup>, o  $k_{int}$  foi de 1,5 mm.

O tempo de retardo do modelo do reservatório linear simples é calculado por:

$$\begin{aligned} TKS &= C_s \cdot T_{ind}; \\ TKI &= C_i \cdot T_{ind}; \\ TKB &= C_b \cdot 86400. \end{aligned} \quad (6)$$

Onde  $C_B$ ,  $C_I$ ,  $C_S$  são parâmetros do modelo e  $T_{ind}$  é o tempo de concentração da célula calculada com a fórmula de Kirpich (equação 7).

$$T_{ind} = 3600 \cdot \left[ 0,868 \frac{L^3}{\Delta H} \right]^{0,385} \quad (7)$$

Onde L é a largura da célula e  $\Delta H$  a diferença de altura entre os pontos mais alto e mais baixo da célula. Os parâmetros  $C_s$  e  $C_l$  são calibrados, enquanto o parâmetro  $C_b$  pode ser estimado por meio da seguinte fórmula:

$$C_b = - \frac{ND}{\ln \left[ \frac{Q_{fr}}{Q_{iR}} \right]} \cdot 86400 \quad (8)$$

onde ND é o número de dias do período de recessão do hidrograma,  $Q_{iR}$  é a vazão no início da recessão e  $Q_{fr}$  é a vazão no final da recessão.

### *Ajuste do modelo*

A calibração do modelo MGB-IPH é realizada alterando os valores dos parâmetros, mas devendo sempre levar em consideração as características físicas do uso da terra/tipo de solo. Deve-se adotar os parâmetros que melhor representem as variáveis hidrológicas da bacia.

O modelo fornece dois tipos de calibração: manual e automática. Na calibração manual os parâmetros calibráveis devem ser ajustados diretamente pelo usuário atentando sempre para as características físicas da bacia. Em outras palavras, o parâmetro de armazenamento de água no solo ( $W_m$ ) é um parâmetro calibrável e sua calibração deve ser feita de acordo com o tipo de solo que a bacia apresenta. Por exemplo, se o solo da bacia apresenta dois tipos de solo, um raso e outro profundo, o  $W_m$  do solo raso tem que apresentar um valor menor que o  $W_m$  do solo profundo, não podendo acontecer o contrário.

Para que a calibração manual seja a melhor possível, torna-se necessário, a cada rodada ou tentativa da calibração, analisar o hidrograma comparando a vazão observada com a calculada pelo modelo. Além de analisar o hidrograma, é preciso verificar três funções-objetivo: erro de volume (EV), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões e o mesmo coeficiente para o logaritmo das vazões (NSlog). Os resultados do NS e NSlog são considerados tanto melhor quanto mais próximo de 1, e o EV é considerado tão melhor quanto mais próximo de zero. As fórmulas matemáticas de cada função são apresentadas a seguir:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (9)$$



$$NSlog = 1 - \frac{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{cal}(t)))^2}{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\overline{Q_{obs}(t)}))^2} \quad (10)$$

$$EV = 1 - \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \quad (11)$$

onde  $Q_{obs}(t)$  e  $Q_{calc}(t)$  são as vazões observada e calculada no instante de tempo  $t$ , e  $Q_{obs}$  é a vazão média observada.

A calibração automática utiliza algoritmos genéticos que consideram múltiplos objetivos na determinação dos parâmetros, conforme detalhamento apresentado em Collischonn (2001).

Na calibração automática deve ser indicado até quanto pode variar os parâmetros para cada URH, ou seja, deve ser estabelecida uma faixa de variação para cada parâmetro, e o modelo irá encontrar o valor ideal dentro dessa faixa de variação.

Um problema existente na calibração automática é que a busca pelo conjunto ótimo de parâmetros despreza as características físicas e ambientais da bacia. Alguns tipos de solos são mais profundos que outros, na calibração automática muitas vezes esse quesito não é bem representado, diferentemente da calibração manual, onde será mais fácil, em parte, se atentar às características físicas da bacia. A idéia de limitar a variação dos valores de busca dos parâmetros ótimos visa reduzir essa questão, embora não a elimine.

#### **2.1.4 Aplicações do MGB-IPH**

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído que vem sendo aplicado em diversas bacias hidrográficas brasileiras e da América do Sul e apresentando resultados satisfatórios.

Já que o objetivo da presente pesquisa é analisar como o modelo MGB-IPH irá se comportar na simulação de uma bacia hidrográfica que apresenta clima semiárido, a fundamentação teórica levará em consideração valores das estatísticas para período de calibração e validação, e, também, a representação da vazão calculada das demais aplicações do modelo, sem se ater as questões específicas de cada estudo, ou seja, se a pesquisa trabalhou com previsão de vazão ou análise de mudança de uso de solo, por exemplo. A tabela 4 elenca os valores das estatísticas encontradas em outras aplicações do modelo MGB-IPH.

Allasia et al. (2006) apresentam resultados da aplicação do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em diferentes bacias hidrográficas da América do Sul. Uma das bacias hidrográficas foi a do rio Taquari Antas, localizada no Rio grande do Sul, com área de 27.000 km<sup>2</sup>. A pesquisa mostrou que o MGB-IPH representou muito bem a vazão, apesar de subestimada a vazão máxima, como pode ser visto na figura 3. A calibração e validação do modelo foram bem ajustadas (Tabela 4).

Tabela 4: Valores das estatísticas nas demais aplicações modelo MGB-IPH

Bacia hidrográfica (área em km <sup>2</sup> )	Localização	Estatísticas de ajuste (CALIB)	Estatísticas de ajuste (VALID)	Referência bibliográfica
Taquari Antas (27.000 km <sup>2</sup> )	Rio grande do Sul	NS= 0,49 a 0,81; NSlog= 0,65 a 0,84; EV= -1,3 a 2,4%	NS= 0,67 a 0,77; NSlog=0,55 a 0,68; EV= -7,67 a 5,15 %	Collischonn (2001)
Taquari Antas (27.000 km <sup>2</sup> )	Rio grande do Sul	NS= 0,6 a 0,9; NSlog= 0,71 a 0,89; EV= -5,10 a 1,15%	NS=0,4 a 0,84; NSlog=0,75 a 0,86; EV=- 6,07 a 1,43 %	Allasia et al. (2006)
Rio Madeira (1.420.000 km <sup>2</sup> )	Brasil, Bolívia e Peru	NS= 0,75 a 0,94; NSlog= 0,72 a 0,93; EV= -19,4 a 0,58%	NS=0,55 a 0,91; NSlog=0,68 a 0,92; EV=-25,6 a -4,72%	Ribeiro Neto (2006)
Rio São Francisco (639.000 km <sup>2</sup> )	Minas Gerais e Nordeste	NS= 0,55 a 0,99; NSlog= 0,31 a 0,99; EV= -4,03 a 18,6%	NS= -1,43 a 0,99; NSlog= 0,12 a 0,98; EV= -6,73 a 13,1%	Silva (2006)
Taquari Antas (27.000 km <sup>2</sup> )	Rio grande do Sul	NS= 0,66 a 0,90; NSlog= 0,71 a 0,86; EV= -5,10 a -4,11%	NS= 0,67 a 0,83; NSlog=0,75 a 0,86; EV= -6,07 a 5,71 %	Collischonn (2007)
Rio São Francisco (639.000 km <sup>2</sup> )	Minas Gerais e Nordeste	NS= 0,82 a 0,84; NSlog= 0,83 a 0,84; EV= -5,60 a 6,32%	NS= 0,78 a 0,82; NSlog= 0,84; EV= -5,60 a -9,20%	Silva (2007)
Rio Negro (712.000 km <sup>2</sup> )	Manaus	NS= 0,75 a 0,79; NSlog= 0,87 a 0,90; EV= -18,8 a 26,6%,	NS=0,94; NSlog=0,97; EV=-18,4 a 35,4%,	Getirana et al. (2011)
Rio Huallaga (712.000 km <sup>2</sup> )	Peru	NS= - 0,26 a 0,72 NSlog= -0,67 a 0,81; EV= -15 a -1%,	Não validado.	Jiménez et al. (2011)
Rio dos Sinos (3.747 km <sup>2</sup> )	Rio grande do Sul	NS= 0,286; NSlog= - EV= 3,812%,	Não mencionado	Pereira et al. (2012)
Rio Paraopeba (12.150 km <sup>2</sup> .)	Minas Gerais	NS=0,78 a 0,81; NSlog= - EV= - 3,1 a -6,6%	NS=0,76 a 0,89; NSlog= - EV= -11,5 a 3,0 %	Meller et al. (2012)
Rio Paraopeba (12.150 km <sup>2</sup> .)	Minas Gerais	NS= 0,76 a 0,86; NSlog= - EV= -6,6 a -3,1%,	NS=0,76 a 0,89; NSlog= - EV= -11,5 a 3%	Meller et al. (2014)

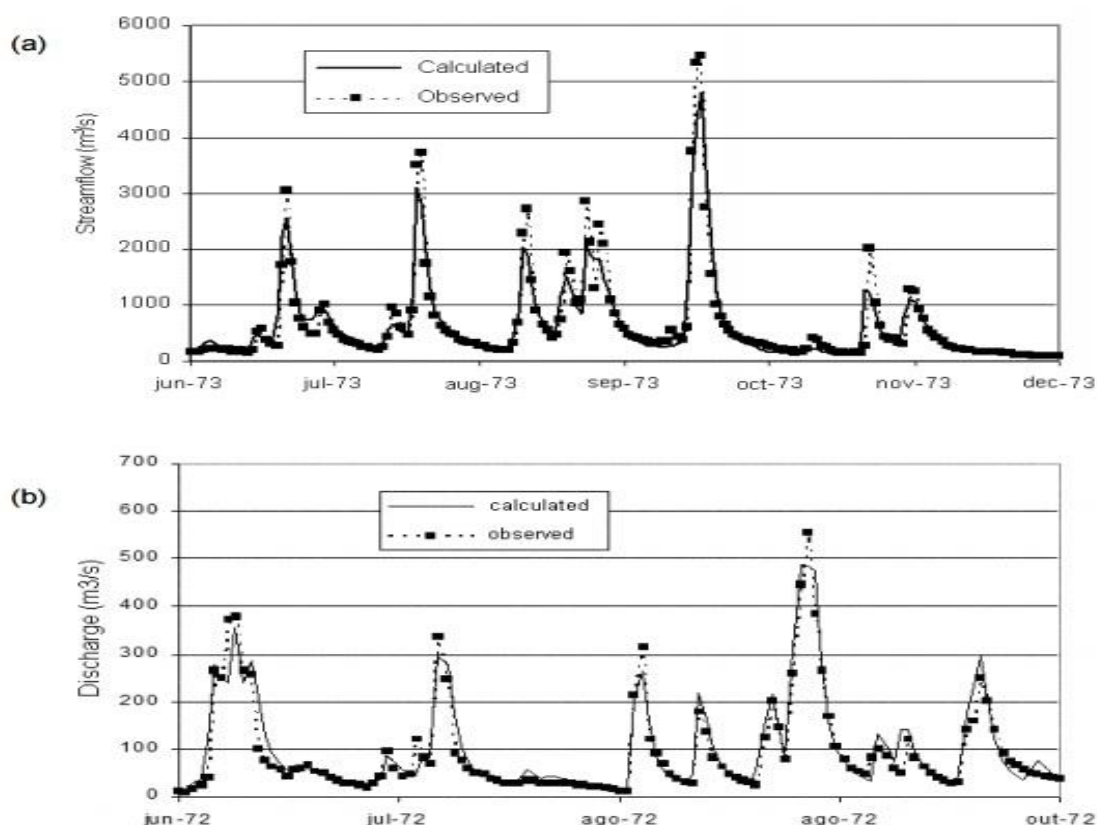


Figura 3: Hidrogramas calculados e observados durante o período de calibração: (a) do Rio Taquari Antas até Muçum (15 826 km<sup>2</sup>); (b) Rio Carreiro em Passo Carreiro (1.250 km<sup>2</sup>).

Fonte: Allasia et al. (2006).

Getirana et al. (2011) aplicaram o MGB-IPH na bacia Hidrográfica do rio Negro localizada na cidade de Manaus com o objetivo de apresentar o estudo hidrológico do rio Negro, utilizando dados altimétricos e gravimétricos para avaliação da parametrização do modelo. A bacia tem uma área de drenagem de, aproximadamente, 712.000 km<sup>2</sup>. Os resultados da pesquisa mostraram que o MGB-IPH é capaz de reproduzir vazões na bacia de maneira satisfatória, apesar do insuficiente monitoramento pluviométrico. As maiores dificuldades encontradas na pesquisa supracitada foi a falta de dados de precipitação. A tabela 4 mostra os valores das funções objetivas obtidas no estudo para o período de calibração e validação. O estudo não cita a estatística para o período de validação das estações Taraqua e Cucuí, assim como, o coeficiente NSlog para a estação Caracaraí no período de calibração.

Em outra pesquisa desenvolvida por Collischonn et al. (2011), o MGB-IPH foi adaptado para mostrar a influência da captação da água e a interferência de açudes no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Quaraí, situada na região da fronteira entre Brasil e

Uruguai. A bacia apresenta área de drenagem de 14.800 km<sup>2</sup>. O resultado da pesquisa mostrou que a demanda de água supera a disponibilidade hídrica na bacia, e que as retiradas de água diretamente do rio tem um impacto maior do que a retirada de água dos açudes na disponibilidade hídrica de forma geral. O modelo representou relativamente bem a vazão.

Meller et al. (2012) aplicaram o modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, situada na porção sudeste de São Paulo e sul do estado de Minas Gerais. A bacia tem uma área de drenagem de 12.000km<sup>2</sup>. O estudo apresenta um método de assimilação de dados para previsão de vazão em tempo real. O resultado da pesquisa mostrou que o procedimento de assimilação de dados teve impacto positivo nos resultados da previsão de vazão. E em termos de coeficiente NS, o uso do procedimento de assimilação promove uma melhora de 10% nas antecedenças iniciais, diminuindo para cerca de 3% para o horizonte de previsão. A Tabela 4 apresenta os valores das funções objetivas alcançadas pela pesquisa supracitada.

Em outra pesquisa, Meller et al. (2014) aplicaram o MGB-IPH com o intuito de realizar a previsão de cheia associada por conjunto de previsões de precipitação. A bacia hidrográfica estudada foi a do rio Paraopeba, situada na região centro-sul do estado de Minas Gerais, com área de 12.150 km<sup>2</sup>. E em termos de ajuste do modelo, pode-se resaltar que a calibração e validação apresentaram ótimos valores para as funções objetivas.

Os estudos relatados anteriormente servem para mostrar que o MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído que vem sendo aplicado continuamente ao longo do tempo e apresentando resultados satisfatórios. Além do mais, o objetivo de sua aplicação pode variar bastante, desde previsão de vazão à análise de mudança de uso e ocupação do solo, dentre outros.

Nesse sentido, Sorribas et al. (2011) aplicaram o MGB-IPH com o objetivo de conectar os processos do ciclo do carbono nas fases terrestre e aquática em bacias hidrográficas, com vistas à análise integrada do balanço de carbono em águas interiores. O modelo foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Ijuí (10.703km<sup>2</sup>), situada no planalto meridional gaúcho, com foco nas sub-bacias do Taboão e Turcato, no rio Potiribu. O modelo hidrológico MGB-IPH utilizado para representar os processos hidrológicos apresentou bons resultados para a simulação hidrológica da bacia hidrográfica do Ijuí. O modelo de carbono MGB-IPH-C responde aos processos hidrológicos de forma dinâmica e apresenta flexibilidade para representação da variabilidade temporal e espacial nas concentrações de carbono no solo e nos trechos de rio.

Adam et al. (2013) utilizaram o MGB-IPH para avaliar o impacto de possíveis cenários de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, afluente da margem esquerda do rio Uruguai.

Bayer et al. (2013) verificaram a sensibilidade do modelo distribuído para grandes bacias MGB-IPH a mudanças de uso da terra, em termos de vazões médias de longo termo. Os resultados das simulações mostraram que o modelo reproduz, de forma coerente, o comportamento médio das bacias submetidas ao desmatamento em um grande número de estudos experimentais.

Collischonn (2011) aplicou o MGB-IPH à bacia do rio Quaraí (14.800km<sup>2</sup>), situada na região de fronteira entre o Brasil e Uruguai. Os resultados mostraram que a demanda de água supera a disponibilidade na bacia, e que as retiradas de água diretamente dos rios tem um impacto maior do que a retirada de água dos açudes na disponibilidade hídrica de forma gera.

## **2.2 Modelagem de processos hidrológicos em regiões semiáridas**

### **2.2.1 Processos hidrológicos no semiárido**

Sabe-se que a região semiárida paraibana é caracterizada por apresentar uma grande variabilidade climática, sendo marcada por frequentes períodos de estiagem e secas, como também, pela má distribuição das chuvas durante o período do inverno (MOLLE, 1994).

Devido a essa grande variabilidade climática do Nordeste brasileiro, é fácil identificar a existência de dois períodos bem característicos, um chuvoso e outro seco. A concentração nítida de precipitação em um único período, além de bacias possuírem, em sua maior parte, subsolo de natureza cristalina, faz com que os rios pertencentes ao semiárido assumam comportamento intermitente, o que, notadamente, acarreta problemas na modelagem hidrológica (FREITAS, 1994).

A vegetação predominante na região semiárida é do tipo caatinga, com plantas xerófilas caducifólias, ou seja, plantas adaptadas à aridez e que perdem suas folhas em determinada região do ano devido à falta de chuva, vegetação com características intrínsecas da região semiárida. A vegetação caatinga, devido às suas características, apresenta uma forte influencia sobre os processos hidrológicos da região.

Sobre a questão da influência da vegetação sobre o escoamento, Rodrigues et al. (2013) desenvolveram uma pesquisa com o intuito de avaliar e comparar o comportamento

hidrológico em pequenas bacias investigando a influência da ação antrópica sobre as respostas hidrológicas.

O estudo foi conduzido em duas microbacias adjacentes e com distintos usos da terra no semiárido do nordeste do Brasil. Nesta investigação foram considerados 24 eventos chuva-deflúvio, correspondendo a toda a estação chuvosa de 2009. Os resultados mostraram que a prática de raleamento da caatinga (corte da vegetação caatinga) apresentou modificações no escoamento, mas apenas nos eventos iniciais e que o rápido crescimento da vegetação herbácea reduziu o escoamento superficial direto na microbacia raleada, que apresentou valores de lâmina escoada inferiores aos da microbacia preservada; foi possível verificar, também, que as descargas máximas na microbacia raleada foram superiores às da bacia preservada.

Outro fator importante a ser ressaltado é que, para a região semiárida, a taxa de evaporação é sempre maior que a de precipitação. E uma vez que há um déficit de precipitação, os solos do semiárido são secos durante grande parte do ano e apresentam pouca profundidade, e ainda ocorre o afloramento de rocha cristalina (ARAUJO, 2011).

Já que o solo apresenta pouca profundidade, pode-se ressaltar que a taxa de escoamento nessa região é mais elevada que a de infiltração, o que pode influenciar no regime de vazão na época chuvosa. Como a precipitação é a principal fonte de recarga dos recursos hídricos, espera-se que em um determinado período do ano a vazão dos rios nessa região chegue a valores mínimos (MOLLE, 1994).

A região semiárida apresenta uma característica peculiar que deve ser levada em consideração no processo de modelagem para o desenvolvimento de uma simulação hidrológica mais realista possível.

## **2.2.2 Estudos de modelagem hidrológica no semiárido**

Alguns estudos foram desenvolvidos em bacias localizadas na região semiárida brasileira e vários foram os modelos utilizados e com diferentes objetivos.

Freitas (1994) utilizou os modelos BOUGHTON e CN – 3S em seis bacias hidrográficas localizadas na região semiárida brasileira, procurando avaliar o desempenho dos modelos frente às diferentes características físicas e climáticas dessa região. As bacias apresentavam áreas de drenagem variando de 16 a 19.123 km<sup>2</sup>. O autor verificou que o modelo BOUGHTON (modelo australiano para representar regiões semiáridas) representou de forma satisfatória a vazão observada. Já para o modelo CN -3S muitos parâmetros foram

classificados como pouco sensíveis, o modelo não obteve, notadamente nos meses de chuva, vazões calculadas condizentes com os valores históricos, e que o modelo não representou bem a vazão observada. A representação a nível diário foi bastante precária. Tabela 5 os valores estatísticos obtidos pelos modelos.

Tabela 5: valores das estatísticas. Fonte: Freitas (1994).

Bacia	Histórico Média Desvio Padrão Assimetria	BOUGHTON Média Desvio Padrão Assimetria	CN-3S Média Desvio Padrão Assimetria
Ameiroz	6,79 57,11 15,01	7,11 54,58 15,15	8,94 75,41 25,92
Iguatu	38,12 160,37 8,50	44,94 146,20 9,01	52,10 193,95 10,41
Lapinha	4,43 14,42 6,75	4,58 18,44 5,23	5,73 7,93 1,91
Lavras	15,32 58,49 7,43	18,51 55,87 8,66	21,35 30,83 2,15
Matriz	0,38 2,00 9,50	0,44 1,74 9,36	0,66 0,70 1,40
Salobro	0,02 0,11 10,95	0,02 0,06 6,24	0,02 0,10 17,00

Silans et al. (2000) desenvolveram um estudo com o intuito de descrever um modelo hidrológico distribuído AÇUMOD (modelo hidrológico distribuído desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba - UFPB). O modelo foi aplicado a bacia

hidrográfica do Rio do Peixe no Estado da Paraíba, situada na região sertão, com área de 3476km<sup>2</sup>, e foi rodado com passo de tempo mensal. Os resultados desta pesquisa foram satisfatórios, já que calibração e validação do modelo foram efetuadas sobre observações mensais, Os valores da função objetivo F (adaptação do NS), do coeficiente de correlação e do erro quadrático médio são respectivamente 0,04, 0,94 e 13%.

Outra aplicação do modelo distribuído AÇUMOD foi feita por Santos e Silva (2007) na bacia hidrográfica do rio Pirapama – PE, com área de drenagem de 600 km<sup>2</sup>, O modelo foi calibrado e validado com dados mensais. As estatísticas obtidas pelo modelo foram: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,83, desvio médio quadrático (MSE) de 0,087% e erro médio quadrático (REMQ m<sup>3</sup>/s) de 6,90%.

Paiva (2008) desenvolveu uma pesquisa utilizando três modelos hidrossedimentológicos: WESP (Watershed Erosion Simulation Program), KINEROS2 (Kinematic Runoff Erosion Model) e WEPP (Water Erosion Prediction Project), Os modelos foram aplicados em parcelas e microbacias da Bacia Experimental de São João do Cariri-PB e Bacia Experimental de Sumé-PB com o objetivo de comparar os modelos. Os resultados do estudo mostraram que o modelo KINEROS2 apresentou, na validação, coeficientes NS maiores ou igual a 0,9, O modelo WESP, a nível diário, apresentou um NS superior a 0,9 na validação. O WEPP apresentou um  $R^2$  de 0,85. Vale salientar que a parametrização do modelo WEPP é mais detalhada, ou seja, para simular o regime de uma bacia hidrográfica, o modelo necessita de uma quantidade elevada de parâmetros, o que pode dificultar um pouco a simulação.

Ainda segundo o autor, o modelo WEPP representou bem o escoamento e apenas razoavelmente bem a produção de sedimentos nas parcelas, porém nas microbacias enquanto simulou razoavelmente bem o escoamento, a simulação da produção de sedimento apresentou grandes discrepâncias. Ambos os modelos KINEROS2 e WESP apresentaram parâmetros estáveis e representativos para a região conforme as simulações em duas bacias bastante distantes entre si, porém na mesma região, Foi constatado que o efeito de escala não era detectável com clareza nas unidades da modelagem.

Escarião et al. (2012) desenvolveram uma pesquisa na bacia do rio Pianco – PB com o intuito de avaliar a influência de um modelo hidrológico empírico estatístico, um modelo hidrológico conceitual concentrado, um modelo hidrológico conceitual distribuído (simulado com passo de tempo diário) e um modelo em rede neural artificial em relação à sensibilidade a mudanças climáticas. Os modelos são, respectivamente, SFMODEL, GRH, MIKE SHE e Redes Neurais Artificiais (RNA) e foram aplicados na bacia hidrográfica delimitada na



estação fluviométrica Piancó. Os modelos foram calibrados no período de 1964 a 1983 e validado no período de 1984 a 1990. Os resultados dessa pesquisa mostram que os modelos utilizados têm capacidade de reproduzir de forma satisfatória a série histórica de vazão e que claramente há diferenças nas vazões simuladas pelos modelos (Figura 4), tanto em nível anual quanto em nível mensal, demonstrando que o modelo hidrológico utilizado no estudo da resposta hidrológica a variações climáticas influencia diretamente os resultados.

A tabela 6 mostra a comparação dos resultados obtidos no estudo supracitado quanto à calibração e validação dos modelos utilizados. Segundo os referidos autores, foi possível verificar, ainda, que, à medida que se aumenta a variação da precipitação, fica maior a diferença entre os modelos. Os modelos conceituais GRH e MIKE SHE sofrem maior mudança que os empíricos SFMODEL e RNA.

Tabela 6: comparação dos resultados da calibração e validação para as diferentes categorias de modelo, Fonte: Escarião et al. (2012).

Fase	Qcal (m <sup>3</sup> /s)	Estatística	Modelos			
			SFMODEL	GRH	MIKE SHE	RNA
Calibração	11,8	Qcal (m <sup>3</sup> /s)	12,6	11,8	11,5	11,9
		Erro Volume (%)	6,90	0,19	1,80	1,01
		Erro médio (m <sup>3</sup> /s)	16,8	10,8	19,6	10,9
		Coef, Corr,	0,82	0,93	0,85	0,91
		R <sup>2</sup>	0,67	0,86	0,55	0,84
Validação	23,7	Qcal (m <sup>3</sup> /s)	18,5	21,5	20,0	21,1
		Erro Volume (%)	21,9	9,1	15,5	10,9
		Erro médio (m <sup>3</sup> /s)	34,6	19,2	23,7	16,7
		Coef, Corr,	0,85	0,95	0,91	0,88
		R <sup>2</sup>	0,63	0,89	0,83	0,78

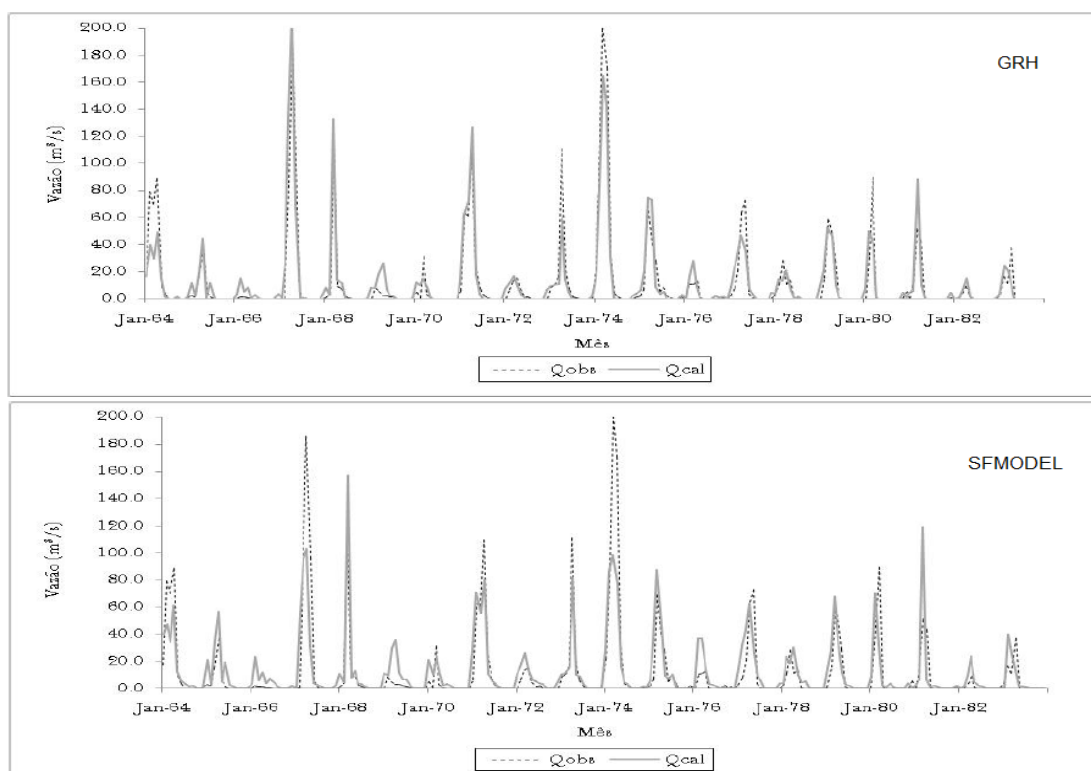


Figura 4: Hidrograma da calibração dos modelos GRH e SFMODEL,

Fonte: Escarião et al. (2012).

Montenegro e Ragab (2012) desenvolveram um estudo que combinam observações hidrológicas e resultados da modelagem da bacia hidrográfica do Rio Tapacurá, no semiárido pernambucano, com área de drenagem de 76,2 km<sup>2</sup>. Nessa pesquisa foi utilizado o modelo DiCaSM (Distributed Catchment Scale Model (Ragab e Bromley, 2010). O DicaSM foi desenvolvido para estimar o estado de equilíbrio ideal em bacias utilizadas para captação da água, sendo possível simular o impacto causado pelas alterações climáticas e de uso da terra sob os fluxos de água em cenários futuros. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de calibração foi de 0,94 e na validação variou de 0,62 a 0,97. Os resultados da pesquisa mostraram a capacidade do modelo para simular a vazão e a umidade do solo em diferentes escalas. Os impactos dos cenários das mudanças climáticas simuladas de baixa emissão de gases de efeitos estufa, na pior perspectiva, indicaram a possibilidade de redução da disponibilidade hídrica em regiões semiáridas.

Ribeiro Neto et al. (2007) aplicaram o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em cinco sub-bacias da região semiárida da bacia rio São Francisco e compararam os resultados do MGB-IPH com um modelo concentrado muito utilizado em bacias de clima semiárido, que é o modelo MODHAC (LUNNA, 1997). As áreas de drenagens das sub-bacias variam de

3.662 km<sup>2</sup> a 12.398 km<sup>2</sup>. O modelo de reservatório de interceptação do MGB-IPH foi transformado em parâmetro do modelo, já que tal reservatório é limitado pelo porte da vegetação. O modelo foi calibrado no período de 1978 a 1990 e validado a no período de 1991 a 2000. Os resultados da pesquisa mostraram que o MGB-IPH possui potencial para ser utilizado em grandes bacias de regiões semiáridas. Entretanto, em virtude os resultados de baixa qualidade no período de verificação do modelo, os autores sugeriram que torna necessário dar sequência em atividades que visem à modificação da sua parametrização com o intuito de melhorar o desempenho do modelo MGB-IPH. Segundo os referidos autores, o mecanismo de geração de escoamento por excesso da capacidade de infiltração é um exemplo de uma característica que um modelo hidrológico indicado para o semiárido deve possuir e que, ainda, não é representado no modelo MGB-IPH. Os valores das funções objetivo podem ser visto na tabela 6. Pode-se ver que o modelo MGB-IPH foi bem ajustado, embora os autores não mencionaram valores de NSlog (coeficiente para o logaritmo das vazões).

Segundo os referidos autores, as modificações melhoraram o desempenho do modelo, principalmente, no período de estiagem, pois, nas bacias, verificam-se situações em que há registro de precipitação e não há escoamento no rio. A forma encontrada para impedir que o modelo gerasse escoamento resultante da precipitação nesse período foi aumentando o reservatório de interceptação. A figura 5 mostra a comparação da vazão observada e a calculada com o modelo MGB-IPH e o MODHAC, onde é possível perceber que o MGB-IPH representou satisfatoriamente o regime de vazão, porém, gerando pico médio de vazão onde não existiria, entre os anos de 1985 e 1986.

Tabela 7: comparação dos resultados da calibração e validação para as diferentes categorias de modelo. Fonte: Ribeiro Neto et al. (2007).

Bacia	Estação	Área (Km <sup>2</sup> )	MGB-IPH				MODHAC			
			Calibração		Verificação		Calibração		Verificação	
			NS	ΔV%	NS	ΔV%	NS	ΔV%	NS	ΔV%
Pajeú	S,Talhada	5,772	0,82	0,16	0,26	83,69	0,45	24,77	0,16	63,54
Pajeú	Floresta	12,398	0,83	0,09	0,50	10,86	0,30	0,22	0,01	81,43
Moxotó	Inajá	8,213	0,71	0,13	0,08	5,61	-	-	-	-
Salitre	Abreus	11,936	0,55	0,23	2,58	38,1	-	-	-	-
Poço	Comp, L, do Boi	3,662	0,70	0,13	0,48	34,27	-	-	-	-

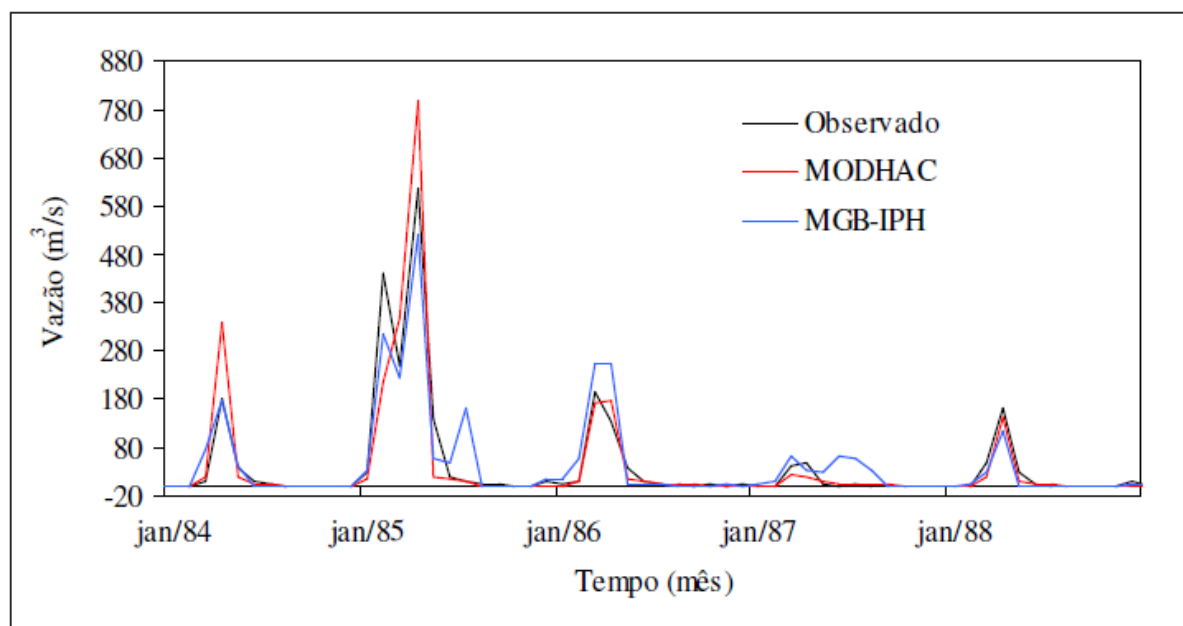


Figura 5: Vazões observada e calculada em Floresta com o MGB-IPH (modificado) e MODHAC (RIBEIRO NETO et al, 2007),

Souza e Souza (2010) desenvolveram a modelagem a hidrológica da bacia do rio Piancó utilizando uma técnica de Rede Neurais Artificiais (RNA). O Estudo teve o intuito de avaliar a capacidade da RNA modelar o processo chuva-vazão em base mensal e se considerou, durante o seu treinamento, a influência da arquitetura da rede e da inicialização dos pesos. Após o treinamento, com base no desempenho do modelo, foi escolhida a melhor arquitetura para modelar vazões médias mensais na bacia estudada. A arquitetura de RNA que produziu melhor desempenho resultou em valores para o coeficiente de determinação, de eficiência e erro padrão da estimativa de 0,92, 77,0% e 8,29, respectivamente.

Lima Sobrinho (2012) aplicou o MGB-IPH a bacia hidrográfica do Rio Ipanema – PE, que apresenta área de drenagem de 226 km<sup>2</sup>. Dados dos postos pluviométricos e climatológicos das séries históricas foram utilizados para calibração do modelo hidrológico no período entre 1977 a 2008. Segundo o autor, na calibração, a nível diário, os valores estatísticos alcançados de NS = 0,405 e r = 0,68 demonstram que os dados da bacia foram insuficientes para o ajuste do modelo, o que pode estar associado à extensa área sem cobertura de postos para uma grande variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos, o que influencia também nas análises hidrológicas da região. O modelo superestimou a vazão observada nos picos médios e máximos.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Rio Piancó (figura 6), localizada na Paraíba, que apresenta uma área total de 9.205 km<sup>2</sup> e é a principal sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu/PB. A bacia do rio Piranhas-Açu nasce no alto sertão paraibano, estendendo-se por esse estado e pelo Rio Grande do Norte, desaguando no Oceano Atlântico.

A bacia hidrográfica do Rio Piranha-açu é subdividida em Unidades de Planejamento Hidrológico UPHs, sendo o Rio Piancó uma das UPHs. A UPH do Rio Piancó situa-se no extremo sudoeste do Estado da Paraíba, tendo como fronteiras o Ceará, a oeste, Pernambuco, ao sul, o Alto e Médio Piranhas, ao norte e a bacia do Rio Espinharas, a leste, abrangendo uma área de 9.205 km<sup>2</sup>. Tem o rio Piancó como rio principal. Seus principais afluentes são os rios Jenipapo e Gravatá e os riachos de Santana, Minador, Canoas, Vermelho, Maria e Verde (RP-03 – Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu, 2013).

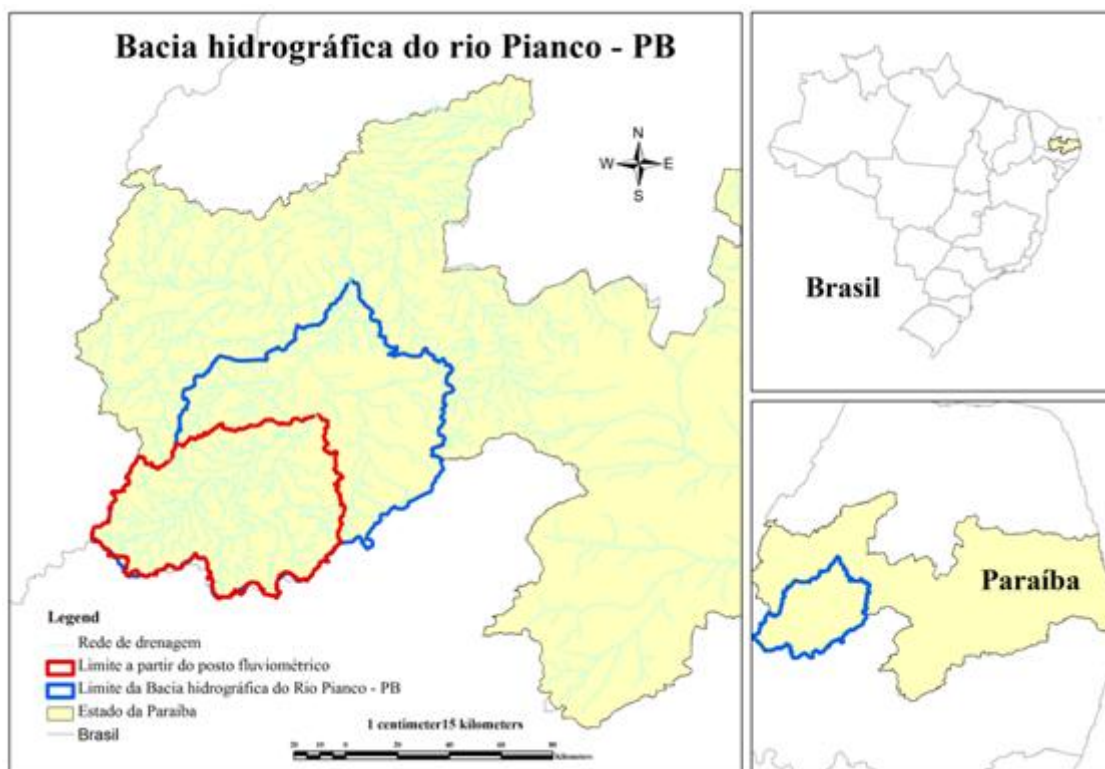


Figura 6: limite geográfico da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB

A bacia do Piancó encontra-se inserida na zona Awig, segundo a classificação climática de Köppen, denominada tropical úmido com estação chuvosa concentrada no verão e no outono. Grande parte do seu curso atravessa esta mesma região, enquanto o seu baixo curso e pequena parte dos seus afluentes da margem direita atravessam regiões classificadas como seca de tipo estepe com estação seca no inverno (RP-03 – Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu, 2013).

A bacia do rio Piancó apresenta-se como típica do clima semiárido, possuindo todas as características físicas e hidroclimatológicas representativas do semiárido do Nordeste brasileiro. Além disso, possui grande importância em termos de abastecimento de água para o sertão paraibano (ESCARIO et al. 2012), banhando 15 municípios.

A vegetação predominante é a caatinga e o tipo de uso do solo é a atividade agrícola. A bacia hidrográfica apresenta quatro tipos de solo: Litossolos, argissolos, cambissolos e luvisolos.

O período chuva ocorre entre os meses de janeiro a maio, com uma variação de 110 mm a 230 mm entre os respectivos meses (figura 7).

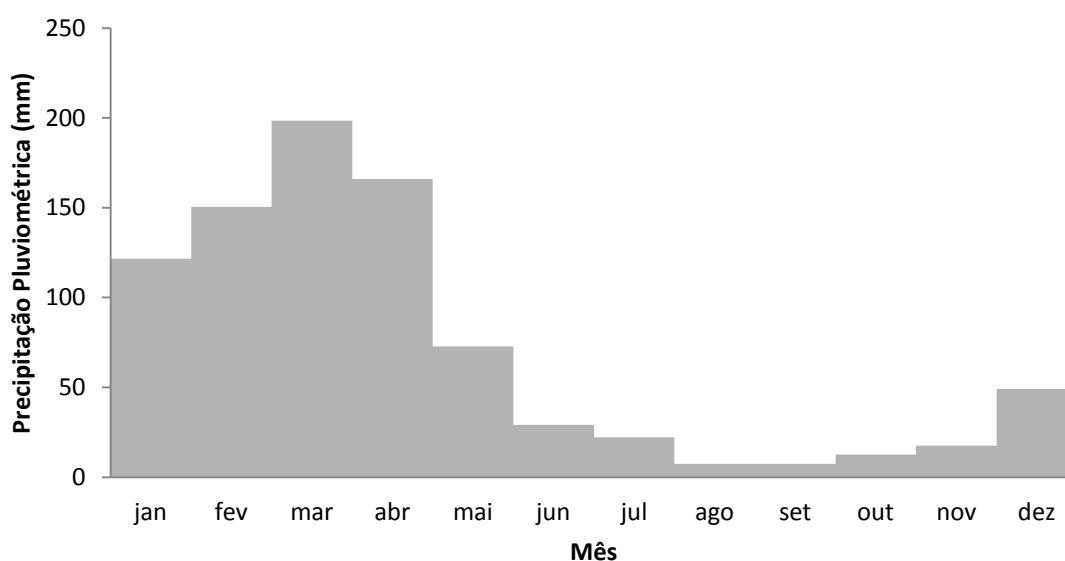


Figura 7: precipitação média mensal da bacia hidrográfica do rio Piancó

Neste estudo a modelagem hidrológica abrange parte da bacia do rio Piancó, aquela situada a montante do posto fluviométrico Piancó. Essa sub-bacia do rio Piancó estudada abrange uma área de 4603,39 km<sup>2</sup> (figura 8). De acordo com UFPB (2001), o posto fluviométrico Piancó não é influenciado por reservatórios a montante da bacia hidrográfica.

### 3.2 Dados disponíveis e visão geral do estudo

Os dados de entrada para o modelo MGB-IPH são: precipitação, dados meteorológicos, vazão, dados referentes aos tipos e uso dos solos e vegetação, e dados topográficos (Tabela 1).

Os dados de precipitação pluviométrica da Bacia do rio Piancó foram obtidos no portal eletrônico HidroWEB da ANA (Agência Nacional das Águas), complementados por dados cedidos da AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba). A Tabela 8 mostra os postos pluviométricos utilizados na pesquisa e sua localização.

Tabela 8: Postos pluviométricos utilizados na pesquisa

Nome do Posto	Código do Posto	Latitude	Longitude
Piancó	00737006	-07 12 51	-37 55 33
Princesa Isabel	00738013	-07 44 00	-38 01 00
Itaporanga	00738017	-07 18 00	-38 10 00
Coinceição	00738020	-07 33 00	-38 31 00
Manaira	00738015	-07 42 00	-38 10 00
Nova Olinda	00738014	-07 28 00	-38 03 00
Boa Ventura	00738012	-07 24 00	-38 13 00
Ibiara	00738018	-07 29 00	-38 25 00
Juru	00737016	-07 32 00	-37 50 00
Caiçara	00738028	-07 51 00	-38 34 00
Garrotes	00738019	-07 23 00	-38 00 00
Serra Grande	00738010	-7 15 00	-38 19 00
Bom Jesus	00738023	-7 21 00	-38 22 00
Bonito de Santa Fé	00738022	-7 19 00	-38 31 00

Os dados de vazão foram obtidos do site da ANA (Agência Nacional das águas) foi utilizada série de vazões do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000), que é monitorado a partir do ano de 1963.

Os dados meteorológicos foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Uma vez que não existe disponibilidade de dados de monitoramento das condições meteorológicas dentro da bacia hidrográfica do rio Piancó, foram utilizados os dados

meteorológicos da estação São Gonçalo, localizado próximo da área em estudo (cerca de 33.9 km do limite da bacia e de 59,9 km do limite gerado a partir do posto fluviométrico) Figura 8.

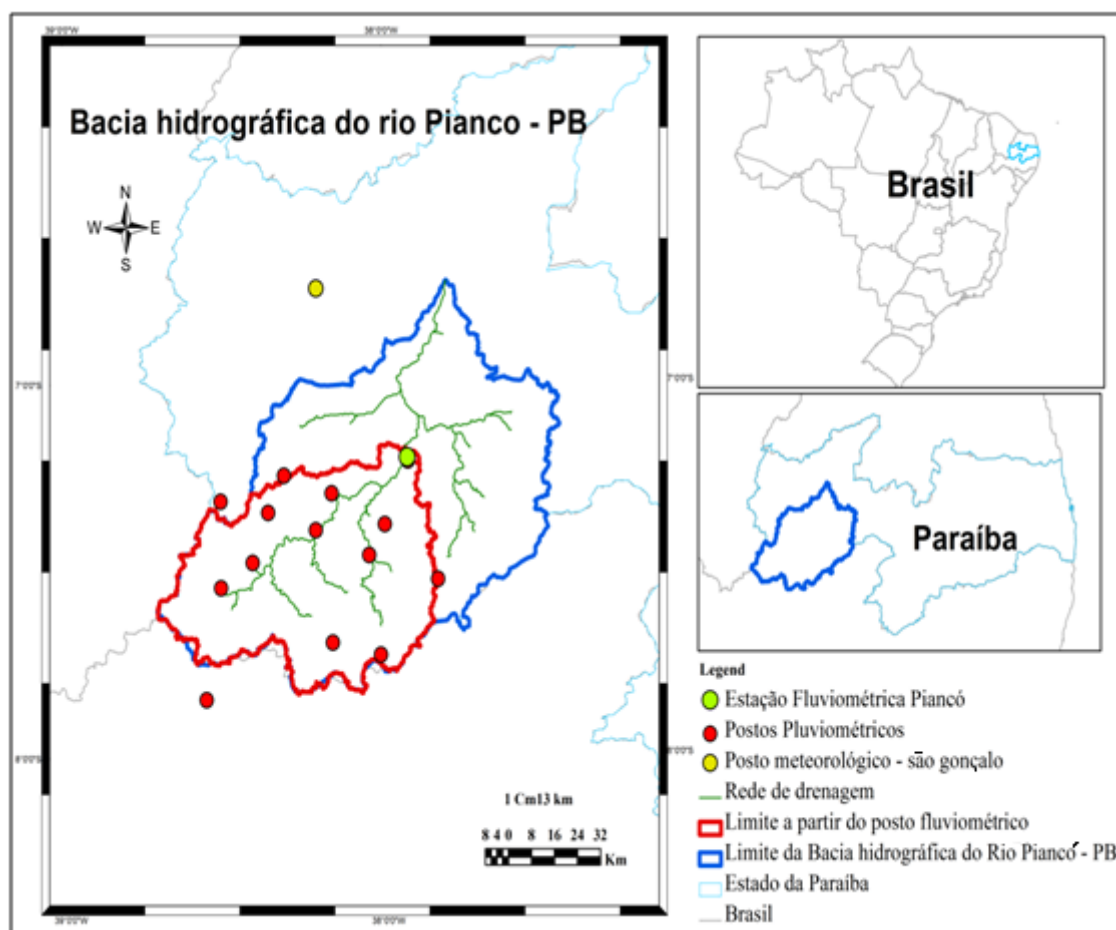


Figura 8: localização dos postos pluviométricos, meteorológicos e fluviométrico

Os dados do tipo e uso do solo e da vegetação foram obtidos no site do MMA (Ministério do Meio Ambiente/<http://www.mma.gov.br/>). A partir dos mapas de vegetação e solo foram definidas as unidades de respostas hidrológicas, como é descrito em detalhes no item 3,3,2. Os dados de topografia e drenagem foram extraídos do processamento do MDE proveniente dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que apresenta resolução espacial de 90 m.

Todos os procedimentos referentes à discretização da bacia hidrográfica (etapa 1), definição e preparação das URH (etapa 2) e dos dados de precipitação e vazão (etapa 3), bem como referentes ao ajuste do modelo (etapa 4) e à análise dos processos hidrológicos simulados (etapa 5) são descritas nos itens que seguem e configuram o conjunto de procedimentos que compõem a metodologia deste trabalho, conforme Figura 9.



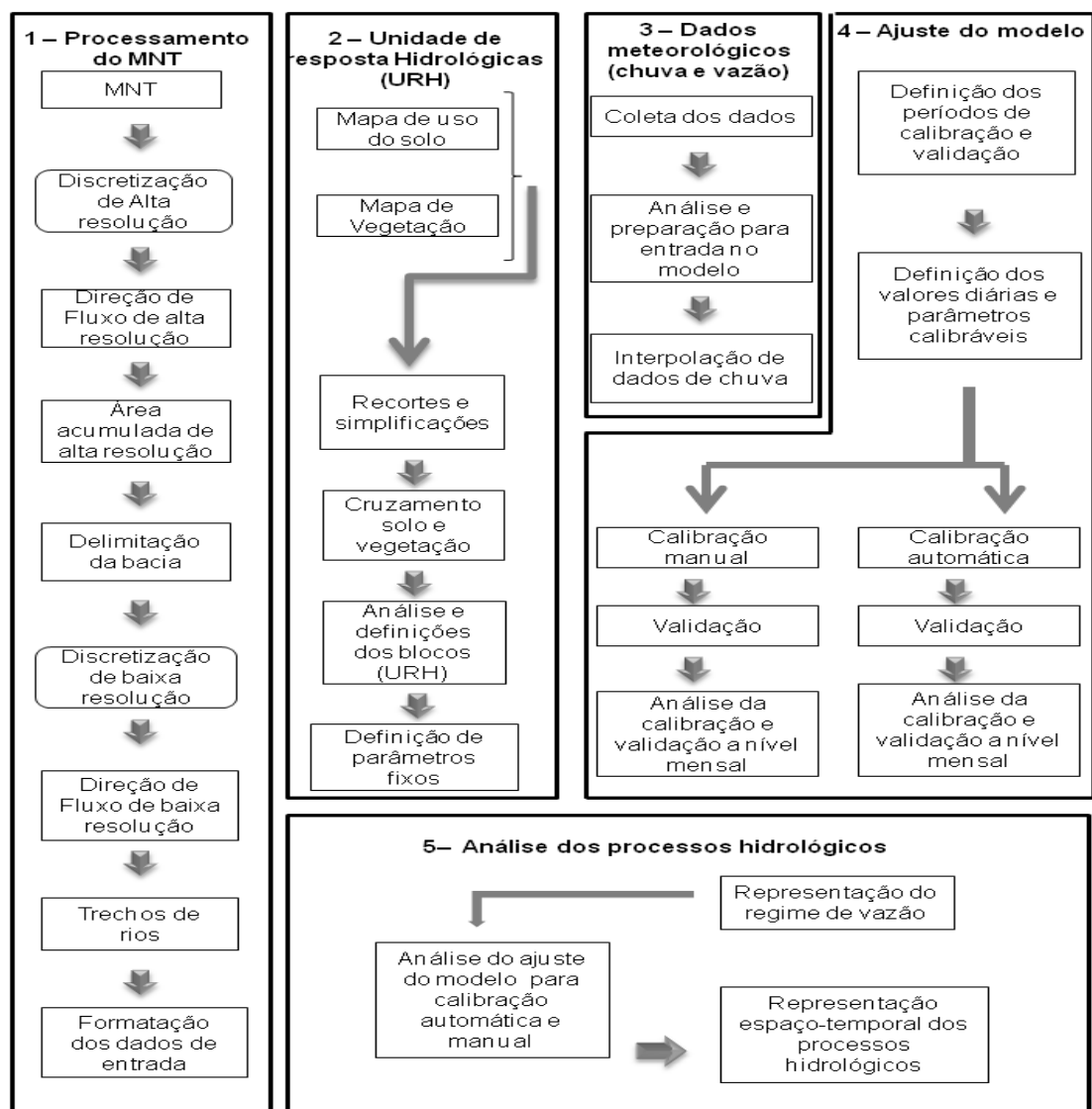


Figura 9: etapas do estudo

### 3.3 Aplicação do modelo MGB-IPH

#### 3.3.1 Processamento do MNT

Nessa etapa, foi feito o processamento dos dados de elevação do terreno (MDE) provenientes do SRTM para extrair as direções de fluxo de alta e baixa resolução espacial, a rede de drenagem, o comprimento e declividade dos trechos dos rios. Como alta resolução espacial foi considerada a grade de  $0,001^\circ$  (100 m) e como baixa resolução espacial foi considerada a grade de  $0,05^\circ$  (5 km), que é o tamanho da grade da discretização do modelo hidrológico adotado no estudo. A resolução mais fina de  $0,001^\circ$  foi adotada tendo em vista a disponibilidade dos dados do MDE do SRTM na resolução espacial de  $0,000833333^\circ$  e

visando ter multiplicidade entre as resoluções alta e baixa, que é um requisito do conjunto de operações que envolvem a extração da rede de drenagem (PAZ, 2008). Para fins de entendimento do texto, denomina-se pixel o elemento da grade de alta resolução espacial e célula o elemento da grade de baixa resolução espacial.

O processamento do MDE foi desenvolvido utilizando as rotinas em linguagem Fortran, componentes das ferramentas de preparação de dados do próprio modelo MGB-IPH (PAZ, 2008). As rotinas computacionais são listadas na tabela 9.

Tabela 9: Rotinas em linguagem Fortran utilizadas no estudo,

Rotina	Função
MNTAlta4A	Gerar as direções de fluxo de alta resolução
Areaacu	Gerar áreas acumuladas de drenagem de alta e baixa resolução
DirFluxo4	Gerar direção de fluxo de baixa resolução
TRECHOS5b	Extração de comprimentos e declividades dos trechos de rio que conectam as células do modelo hidrológico
DRENAGEM	Gera a drenagem vetorial de baixa resolução
CORRIGE	Verificação e correção das direções de fluxo de baixa resolução
DELBACIA	Delimitação da bacia de alta e baixa resolução

A primeira etapa consiste em gerar as direções de fluxo de alta resolução, ou seja, gerar uma imagem raster onde cada elemento (pixel) contém um código que indica para qual pixel vizinho ocorre a drenagem. Atribui-se uma única direção para cada pixel, que pode ter oito valores.

A determinação das direções de fluxo é feita com a rotina MNTAlta4A, cujo algoritmo de cálculo segue o algoritmo D8 (eight deterministic neighbours) com algumas variações. O algoritmo D8 seleciona a direção de fluxo em função da maior declividade, tomada como o quociente da diferença de cota pela distância entre os pixels (PAZ et al., 2006).

A determinação da direção de direção de fluxo de baixa resolução foi traçada com a utilização da rotina Dirfluxo4. O algoritmo da rotina DirFluxo4 consiste em identificar um pixel exutório para cada célula, seguir o caminho de fluxo de pixel em pixel a partir do pixel exutório da célula e conforme esse caminho traçado determinar para qual célula vizinha a célula analisada drena.

O passo seguinte consiste em extrair os comprimentos e trechos de rios que conectam as células do modelo. Como outros métodos de propagação do escoamento, o método de Muskingun-Cunge utilizado pelo modelo MGB-IPH para a propagação de escoamento superficial necessita de informações do trecho de rio ao longo do qual é feita a propagação. Dessa forma, é preciso ter o comprimento e a declividade de cada trecho de rio associado à ligação entre duas células.

Posteriormente foi utilizada a rotina DRENAGEM para traçar a rede de drenagem vetorial de baixa resolução. Vale salientar que não foi necessário realizar correções na rede drenagem, nesse sentido, não foi preciso utilizar a rotina CORRIGE, em função da excelente concordância entre a rede de drenagem de baixa resolução representada no modelo hidrológico e a rede de drenagem derivada diretamente do MDE na resolução espacial mais fina (figura 10). E por final foi feita a delimitação da bacia hidrográfica.

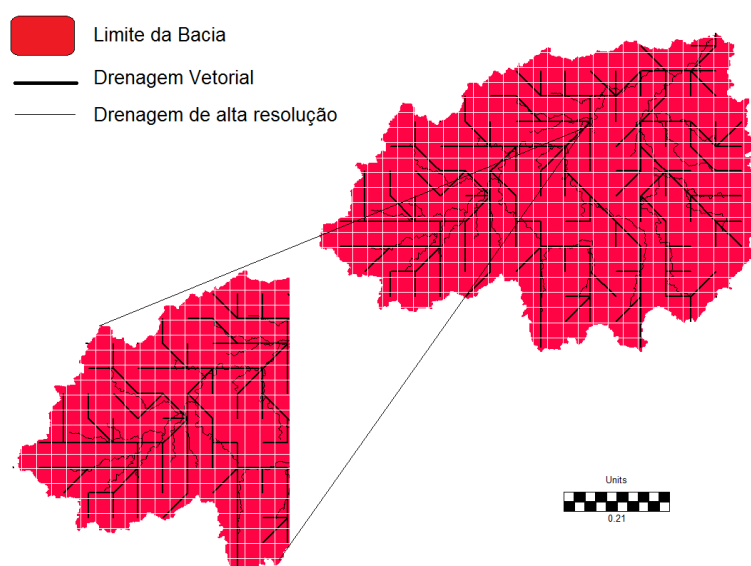


Figura 10: Extração da rede de drenagem e limite da bacia derivada do MDE

### 3.3.2 Unidades de resposta hidrológica

Para realizar a preparação das unidades de respostas hidrológicas, foram analisados os dados de vegetação e solo coletados junto ao portal eletrônico do Ministério do Meio Ambiente – MMA.

As informações de cobertura vegetal e tipo de solo são cruzadas para definir quais classes são representadas no modelo hidrológico, constituindo as unidades de resposta hidrológica. Tal definição repercute no número de parâmetros a serem calibrados no modelo

hidrológico e também no grau de diferenciação dessas características que está sendo considerado na modelagem (figura 13 e Tabela 10).

O tipo de vegetação predominante na área em estudo é a caatinga e o uso do solo é para atividade agrícola (figura 11). Foram identificados, também, quatros tipos de solos: argissolos, litossolos, cambissolos e luvisolos (figura 12). A porcentagem da área de cada classe pode ser visto na tabela 10.

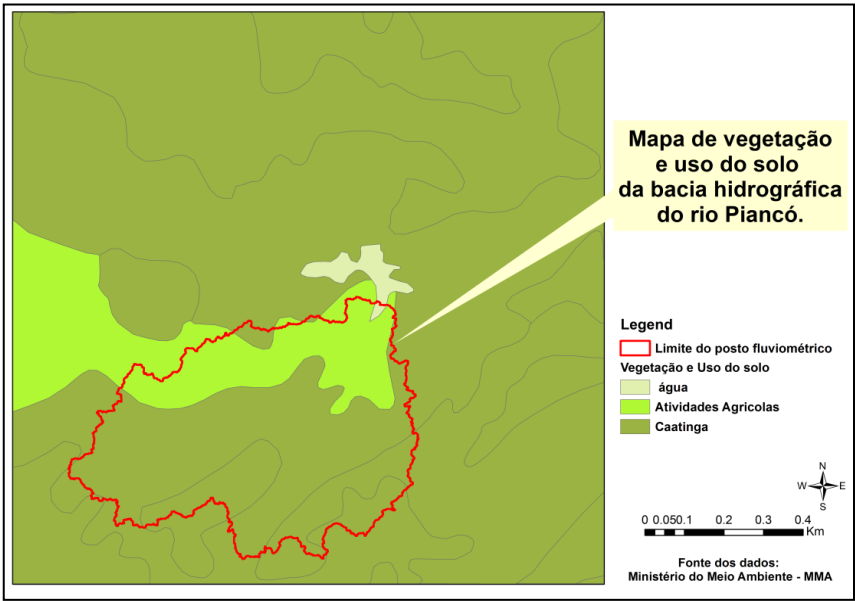


Figura 11: Mapa de vegetação/ uso do solo da bacia hidrográfica do rio Piancó

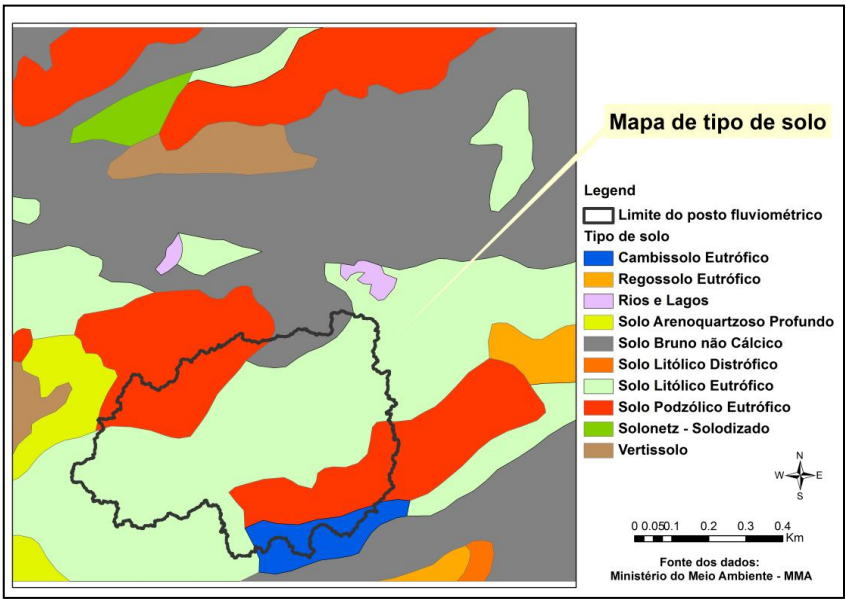


Figura 12: Mapa de tipo do solo da bacia hidrográfica do rio Piancó

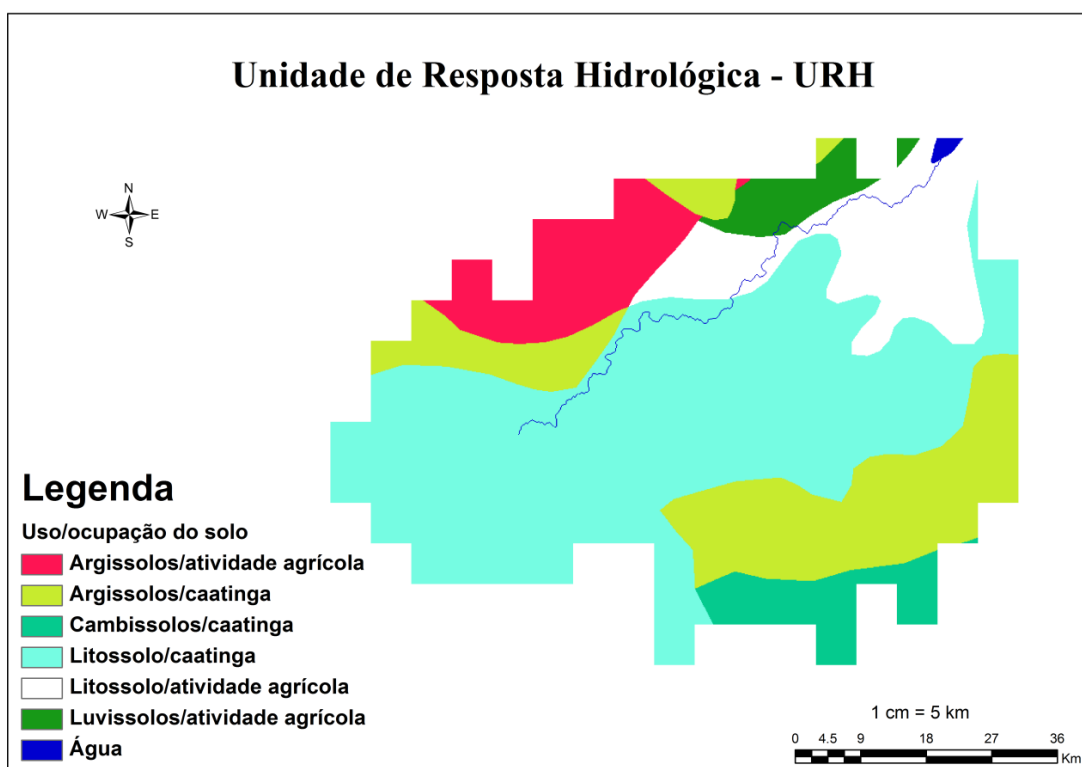


Figura 13: classes de uso/tipo solo para a Bacia do Rio Piancó – PB

Tabela 10: Unidade de resposta hidrológica (HRU) da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB

ID	Área (km <sup>2</sup> )	Área %	Uso, ocupação e tipo de solo
1	910,12	19,8%	Argissolos/caatinga
2	2352,22	51,1%	Litosossolos/caatinga
3	229,42	5,0%	Cambissolos/caatinga
4	392,95	8,5%	Argissolos/atividade agrícola
5	135,50	2,9%	Luvissolos/atividade agrícola
6	583,18	12,7%	Litólitosolo/atividade agrícola
7	17,73	0,4%	Água
Total	4603,39	100,0%	

### 3.3.3 Definição dos parâmetros fixos

Como já mencionado anteriormente, dois são os tipos de parâmetros utilizados no modelo: fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos. Os

parâmetros calibráveis são alterados a cada aplicação do modelo, com o intuito de obter o melhor ajuste possível entre a vazão observada e calculada.

Os parâmetros fixos utilizados pelo modelo MGB-IPH são: Albedo, Índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal. A definição de cada parâmetro fixo ocorreu com base na revisão bibliográfica e aplicações do modelo MGB-IPH, basicamente, a principal aplicação do modelo MGB-IPH que apresenta uma pequena cobertura vegetal do tipo caatinga foi encontrado em Silva (2005). Vale salientar que foi difícil encontrar valores adequados para o bioma caatinga, pois apenas Ribeiro Neto (2006), Silva (2005) e Lima Sobrinho (2012) aplicaram o MGB-IPH a uma bacia hidrográfica com características semiáridas.

O Índice de área foliar expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ( $m^2.m^{-2}$ ) e é um parâmetro que pode ser medido (COLLISCHONN, 2001).

Conforme relata os mesmos autores, o IAF de florestas é alto, com valores maiores do que 6, enquanto o IAF de pastagens atinge no máximo o valor 5. E vale salientar que, para o bioma caatinga, onde a vegetação é do tipo caducifólia, ou seja, perde suas folhas no período seco, o IAF tende a variar de acordo com o período chuvoso.

Nesse sentido, quanto maior for o período chuvoso, maior será o IAF de determinada região. Com base nisso, o IAF da bacia hidrográfica do rio Piancó foi definido de acordo com Silva (2005), ou seja, levando em consideração os valores adotados em sua pesquisa, mas sempre atentando para o regime de precipitação anual da bacia (Figura 7). Os valores de IAF adotados estão apresentados na (Tabela 11).

Tabela 11: valores do parâmetro Índice de área Foliar (IAF) para a bacia hidrográfica do rio Piancó

ID	Uso	Jan	Fev	Mar	Abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	Dez
1	Argissolos/caatinga	4	4	4	4	4	1,2	1	1	1	1,5	2	3
2	Litosossolos/caatinga	4	4	4	4	4	1,2	1	1	1	1,5	2	3
3	Cambissolos/caatinga	4	4	4	4	4	1,2	1	1	1	1,5	2	3
4	Argissolos/atividade agrícola	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3
5	Luvissolos/atividade agrícola	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3
6	Litossolo/atividade agrícola	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3
7	Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Outro parâmetro fixo é o albedo, que corresponde à parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. O valor do albedo de uma região agrícola pode variar de acordo com a fase do ciclo de cultivo, alternando assim entre o solo lavrado e recém-semeado, praticamente nu, e a fase de crescimento e maturação. Em regiões com uma destacada época seca sazonal, o albedo de pastagens também pode aumentar, atingindo valores mais próximos ao do solo nu (COLLISCHONN, 2001).

Nesse sentido, o parâmetro albedo foi definido a partir dos valores utilizados por Silva (2005) e ainda observando o período chuvoso da região em estudo (figura 7), uma vez que o índice de área foliar está diretamente ligado ao albedo, já que a vegetação caatinga perde suas folhas no período de estiagem ou seco, deixando o solo exposto (Tabela 12).

Tabela 12: valores do parâmetro albedo para a bacia hidrográfica do rio Piancó

ID	Uso	Jan	Fev	mar	Abr	Mai	Jun	jul	ago	Set	out	nov	Dez
1	Argissolos/caatinga	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,13
2	Litosossolos/caatinga	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,13
3	Cambissolos/caatinga	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,13
4	Argissolos/atividade agrícola	0,2	0,2	0,2	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21
5	Luvissolos/atividade agrícola	0,2	0,2	0,2	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21
6	Litossolo/atividade agrícola	0,2	0,2	0,2	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21
7	Água	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta (COLLISCHONN, 2001).

A definição do parâmetro resistência superficial ocorreu de acordo com Silva (2005), ou seja, adotando, a princípio, os valores utilizados em sua pesquisa. Contudo, Collischonn (2001) relata que a resistência superficial da vegetação depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, ou seja, sem déficit hídrico, os valores de resistência superficial são mínimos, à medida que o solo seca, a resistência superficial aumenta.

Nesse sentido, a definição do parâmetro resistência superficial também foi traçada observando a variação da chuva ao longo do ano (figura 7), já que a área em estudo apresenta clima semiárido, o que indica que o solo apresentará menor resistência superficial no período chuvoso (Tabela 13).

Tabela 13: valores do parâmetro resistência superficial para a bacia hidrográfica do rio Piancó

ID	Uso	jan	fev	mar	Abr	Mai	jun	Jul	ago	set	out	nov	dez
1	Argissolos/caatinga	55	55	55	55	55	60	70	70	70	60	55	55
2	Litosossolos/caatinga	55	55	55	55	55	60	70	70	70	60	55	55
3	Cambissolos/caatinga	55	55	55	55	55	60	70	70	70	60	55	55
4	Argissolos/atividade agrícola	70	70	70	70	70	70	70	70	80	90	80	70
5	Luvissolos/atividade agrícola	70	70	70	70	70	70	70	70	80	90	80	70
6	Litólitosolo/atividade agrícola	70	70	70	70	70	70	70	70	80	90	80	70
7	Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Por último, a definição do parâmetro altura da cobertura vegetal ocorreu conforme Silva (2005). Para a pesquisa foi adotado um valor fixo de altura para a vegetação nativa, ou seja, a altura da vegetação nativa não varia ao longo do ano. Para a atividade agrícola, uma vez que existe o manejo agrícola, ocorreu a variação da altura da vegetação de acordo com ciclo de colheita. Para isso foi necessário analisar o regime de precipitação da região, levando em consideração que o período de maior desenvolvimento do cultivo seria na parte chuvosa do ano (tabela 14).

Tabela 14: valores do parâmetro altura da cobertura vegetal para a bacia hidrográfica do rio Piancó

ID	Uso	Jan	Fev	mar	abr	Mai	jun	Jul	ago	Set	out	nov	Dez
1	Argissolos/caatinga	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	Litosossolos/caatinga	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	Cambissolos/caatinga	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	Argissolos/atividade agrícola	0,6	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3
5	Luvissolos/atividade agrícola	0,6	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3
6	Litólitosolo/atividade agrícola	0,6	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3
7	Água	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

### 3.3.4 Preparação dos dados de precipitação

Os valores de precipitação observados nos postos pluviométricos são utilizados para estimar a precipitação em todas as células do modelo, em todos os dias da simulação.

Para isso foi empregada a rotina computacional INTERPLU, integrante do pacote computacional do modelo hidrológico MGB-IPH. A rotina utiliza como dados de entrada as



séries de dados observados nos postos pluviométricos, as coordenadas dos postos e as informações de discretização da bacia (numeração e localização das células).

Na versão do INTERPLU empregada nesta pesquisa, é utilizado o método de interpolação por inverso da distância ao quadrado, cuja descrição teórica pode ser encontrada em Borrough (1986); Mendes e Cirilo (2001); e COLLISCHONN e TUCCI (2001).

Para cada dia do período simulado, a chuva é interpolada para cada célula a partir dos dados de pluviômetros vizinhos com dados válidos situados dentro de um determinado raio de busca. Esse raio é determinado dinamicamente em cada interpolação a ser feita (ou seja, para cada dia e célula), em função da identificação do posto pluviométrico com dado válido no dia em questão situado mais próximo da célula em análise. A distância desse posto em relação à célula é calculada e o raio de busca é definido como cinco vezes tal distância (Figura 14).

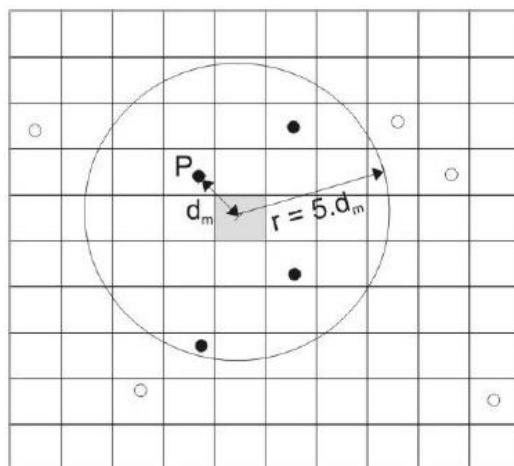


Figura 14 – Identificação do posto pluviométrico mais próximo (P) de um elemento da planície (em cinza) e seleção dos postos (círculos pretos cheios) localizados dentro de um raio (r) igual a cinco vezes à distância mínima (dm) para efetuar a interpolação da precipitação para o elemento da planície (postos pluviométricos não selecionados são indicados pelos círculos pretos vazios). Fonte: Paz (2010).

### 3.3.5 Preparação dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados pelo MGB-IPH são: temperatura, umidade, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica.

Ao contrário dos dados pluviométricos, os dados meteorológicos não são interpolados para uso do modelo hidrológico MGB-IPH. Para cada célula da discretização do modelo é identificado qual posto meteorológico situado mais próximo. Para cada dia da simulação,

quando tal posto tem dados válidos, são usados esses dados para a célula em questão. Quando tal posto apresenta falhas, são usados dados médios mensais desse posto para os cálculos correspondentes à célula. Nesta pesquisa, como apenas um posto meteorológico foi usado, todas as células utilizaram seus dados para a simulação. Os valores médios mensais das variáveis meteorológicas utilizadas no modelo hidrológico são apresentados na Figura 15. Em termos médios mensais, a umidade do solo varia de 52,3% a 63,7% ao longo do ano. A temperatura varia de 23,4°C a 27,8°C. A pressão piche varia de 92,6 kpa a 98,7 kpa e a Insolação, de 7,2 horas/dia a 9,58 horas/dia.

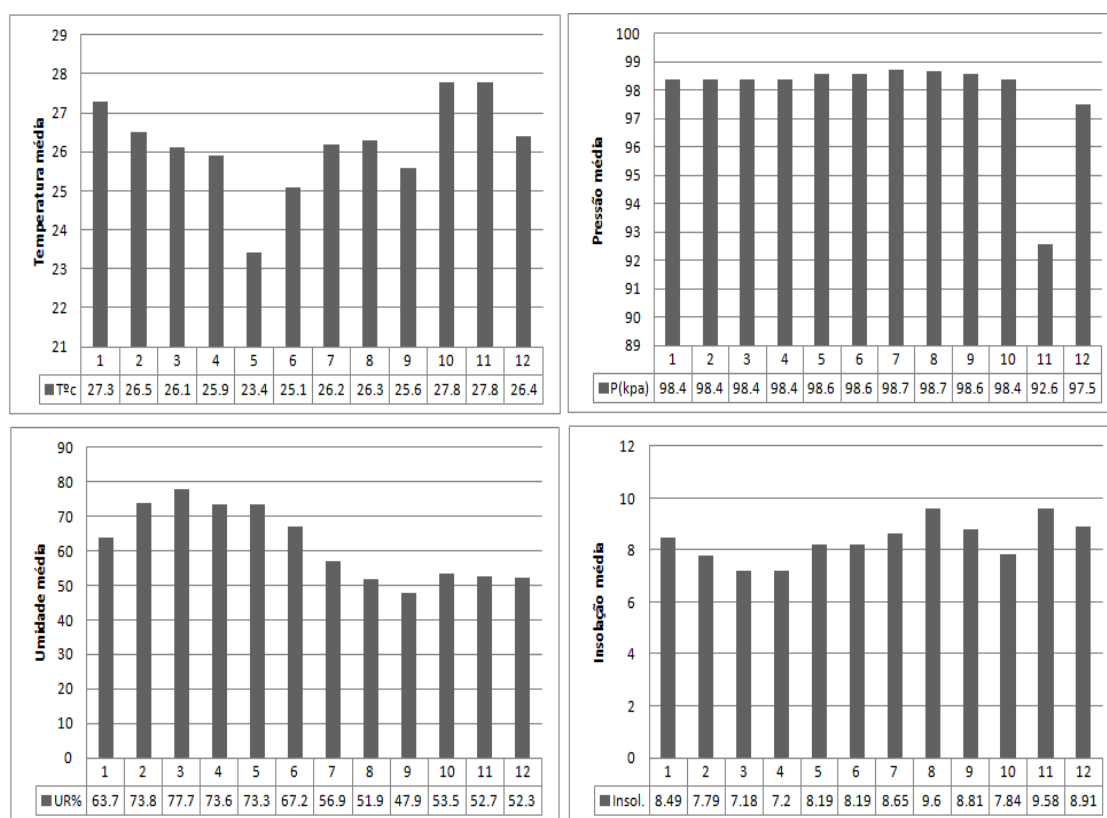


Figura 15: dados meteorológicos médios da estação São Gonçalo

### 3.3.6 Preparação dos dados de vazão

Os dados de vazão foram obtidos no site da Agência Nacional das Águas – ANA. Foi utilizado a série de vazões do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000). Os dados obtidos do portal HidroWEB da ANA foram trabalhados para o formato de entrada do modelo MGB-IPH, sem nenhum procedimento de preenchimento de falhas. A presença de falhas em alguns dias faz com que o modelo ignore tais dias na comparação entre vazão observada e calculada no cálculo das funções-objetivo dentro do processo de calibração e validação.

### 3.3.7 Ajuste do modelo

A definição do período utilizado para a calibração e validação do modelo MGB-IPH foi feita a partir da análise da disponibilidade de dados observados no posto fluviométrico Piancó e nos postos pluviométricos selecionados.

O período da calibração inicia no dia 01 de janeiro do ano de 1970 e se estende até o dia 31 de dezembro do ano de 1990. O período utilizado para validar o modelo tem início no dia 1 de janeiro do ano de 1991 e se estende ao dia 31 de dezembro do ano de 2011. O modelo MGB-IPH foi rodado com passo de tempo diário.

A disponibilidade de dados dos postos pluviométricos pode ser visto nas figuras 16 e 17. De modo geral, a maior parte dos postos pluviométricos, no período de calibração, apresentou mais de 90% de disponibilidade de dados, com exceção dos postos Itaporanga, com 61,9%, e Ibiara, com 78,1%, esses valores, respectivamente, equivalem a 2924 e 1680 dias de dados falhos para os postos em um período que compreende 7670 dias (Figura 16).

Os postos pluviométricos no período de validação apresentaram menores quantidades de dados disponíveis que no período de calibração, com variação de 75% a 94% de disponibilidade total. O posto pluviométrico Itaporanga apresentou uma alarmante quantidade de falhas. O período de validação, assim como da calibração, compreende 7670 dias, deste valor, 7397 dias eram falhos no posto Itaporanga, sendo disponível apenas 273 dias com dados monitorados (figura 17).

O posto fluviômetro Piancó no período de calibração apresentou 92,97% de disponibilidade de dados, ou seja, dos 7670 dias utilizados para calibrar, 7131 dias apresentaram monitoramento válido da vazão (Figura 18). No período de validação o posto fluviométrico apresentou quantidade maior de dados disponíveis que na calibração, 95,31% dos 7670 apresentaram dados, o que equivale a 7310 dias com monitoramento adequado da vazão (Figura 19).

Assim foi possível definir um considerado período de anos para calibração e validação. Sendo 21 anos para calibração e 21 anos para validação do modelo (figura 20).

Vale salientar que o período utilizado para calibrar e validar o modelo apresenta comportamento de vazão semelhante em termos de ocorrência dos maiores picos de vazão, na vazão média e na vazão mínima, como ilustrado pelo hidrograma observado apresentado na Figura 20.

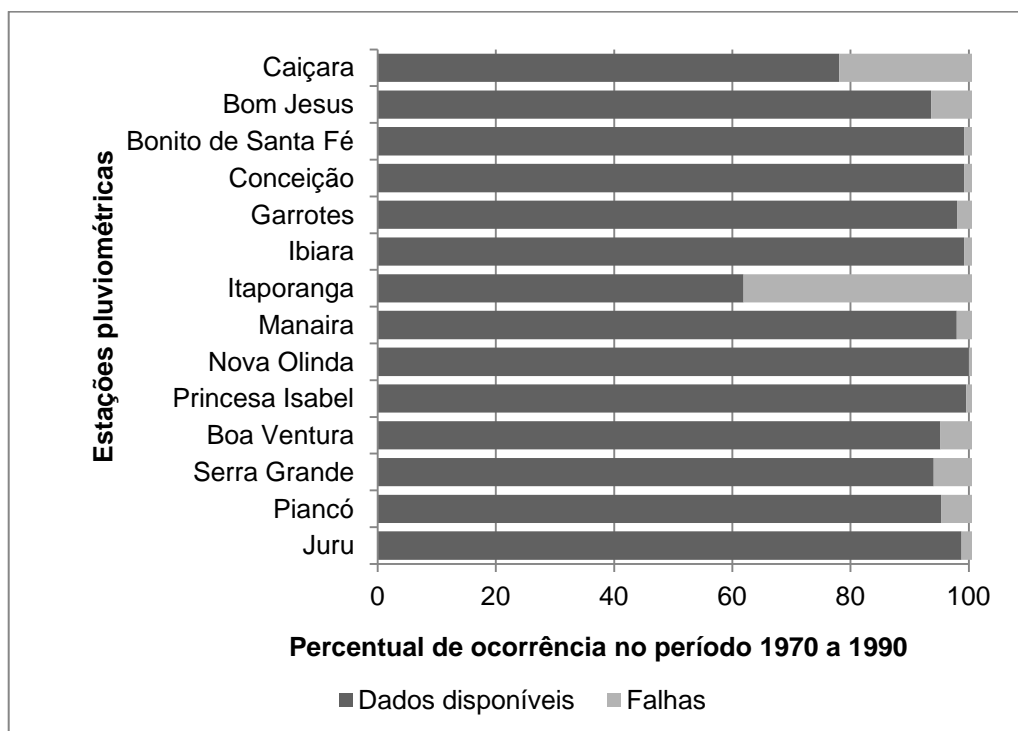


Figura 16: disponibilidade de dados dos postos pluviométricos para o período de calibração

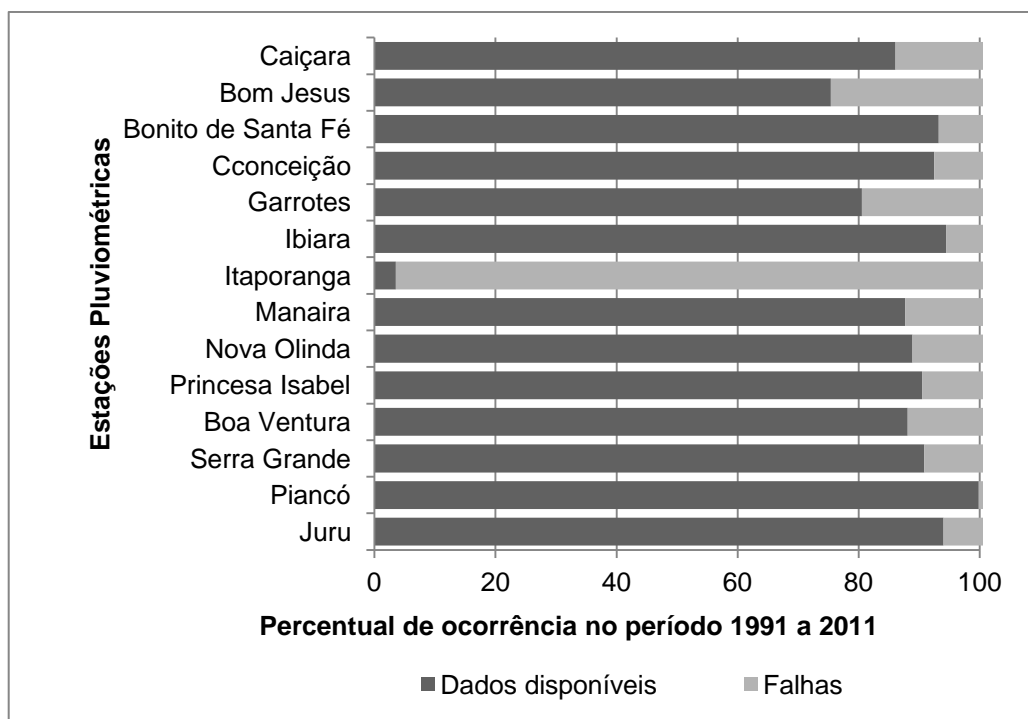


Figura 17: disponibilidade de dados dos postos pluviométricos para o período de validação

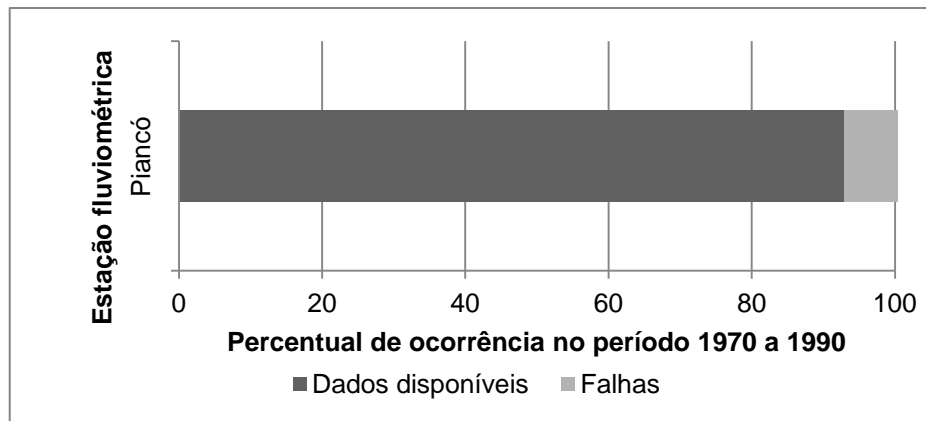


Figura 18: disponibilidade de dados do posto fluviométrico Piancó para o período de calibração do modelo MGB-IPH

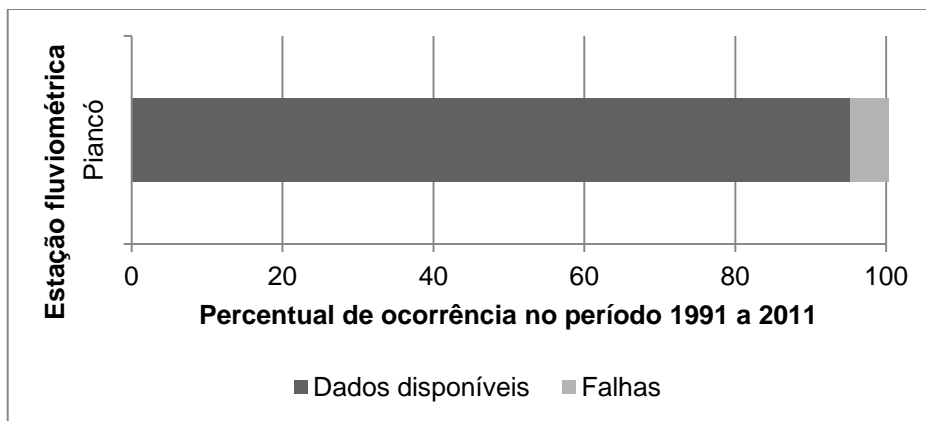


Figura 19: disponibilidade de dados do posto fluviométrico Piancó para o período de validação do modelo MGB-IPH

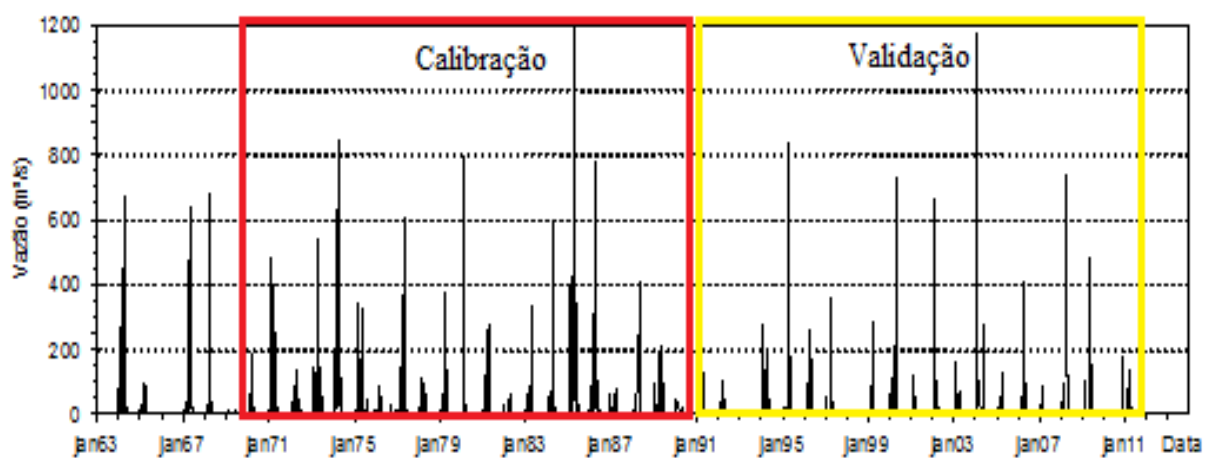


Figura 20 – Dados de vazão observados no posto fluviométrico Piancó – PB.

A calibração do modelo foi realizada de duas maneiras distintas, uma denominada calibração automática e outra calibração manual. Na automática, foi utilizada a versão padrão do algoritmo de otimização do MGB-IPH, que consiste em procurar os valores ótimos dos parâmetros calibráveis segundo as três funções objetivas implementadas no referido algoritmo: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões diárias, Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões diárias e Erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (equações 9, 10 e 11). A definição dos parâmetros calibráveis na calibração automática é feita indicando de qual valor mínimo a tal valor máximo pode ser encontrado o valor ideal para cada parâmetro calibrável, ou seja, é fornecido um valor mínimo e máximo e dentro desse limite indicado o algoritmo de otimização do MGB-IPH irá encontrar o valor ideal do parâmetro  $W_m$ ,  $b$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{bas}$ , entre outros parâmetros calibráveis do modelo.

Paralelamente, foi realizado outro ajuste do modelo via calibração manual. Os mesmos parâmetros iniciais usados na calibração automática foram tomados como ponto de partida para o ajuste manual. Esse procedimento consistiu em definir, por tentativa e erro, a partir dos valores de parâmetros calibráveis utilizados por Silva (2005), a melhor representação da vazão observada.

Para isso, foi necessário analisar a sensibilidade que cada parâmetro calibrável apresenta no resultado do modelo. Também foram comparados, visualmente, os hidrogramas da vazão observada e calculada pelo modelo com o intuito de encontrar o melhor ajuste possível e, também, as funções objetivas que informam o quão bom é a simulação hidrológica.

Após o ajuste do modelo, tanto pelo procedimento automático quanto pelo procedimento manual, a quantificação da concordância entre vazões observadas e calculadas foi estendida para além do uso das três funções-objetivo mencionadas. Foram calculados o coeficiente de correlação ( $r$ ), o erro médio absoluto (EMA) e a raiz do erro médio quadrático (REMQ) segundo equações 12, 13 e 14, além do coeficiente de eficiência de referência (BE – normalized benchmark efficiency), proposto por Schaeffli e Gupta (2007) (equação 15), e já utilizado por Getirana et al, (2011). E, também, o coeficiente de eficiência volumétrica (VE) apresentado por Criss e Winston (2008) (equação 16).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})(Q_{cal_i} - \overline{Q_{cal}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{cal_i} - \overline{Q_{cal}})^2}} \quad (12)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Qcal_i - Qobs_i| \quad (13)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qcal_i)^2}{n}} \quad (14)$$

$$BE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Qobs(t) - Qsim(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Qobs(t) - Qref(t)]^2} \quad (15)$$

$$VE = 1 - \frac{\sum |Qcal - Qobs|}{\sum Qobs} \quad (16)$$

Onde:

$Qcal$  é a vazão calculada;  $Qobs$  é a vazão observada;  $\overline{Qo}$  é a vazão média observada;  $Qref$  é a vazão de referência no momento  $t$ ;  $Qsim$  é a vazão simulada;  $\overline{Qcal}$  é a vazão média calculada;  $Qobs_i$  é a vazão observada no mês  $i$ ;  $n$  é o número de dados na série;  $Qcal_i$  é a vazão calculada no mês  $i$ ;  $Qcal_i$  é a vazão calculada,  $Qobs_i$  é a vazão observada e  $n$  é o número de observações realizadas.

As medidas de desempenho  $r$ ,  $EMA$  e  $REMQ$  são amplamente utilizadas para avaliar ajustes de modelos hidrológicos e foram adotadas neste trabalho para ampliar as comparações do desempenho alcançado com o modelo hidrológico MGB-IPH com resultados de outros estudos. Os coeficientes  $BE$  e  $VE$  foram adotados visando possibilitar inferências mais adequadas sobre o grau de concordância entre vazões observadas e calculadas.

O coeficiente  $BE$  é utilizado como forma alternativa de avaliação ao coeficiente  $NS$ , visto que o valor de  $NS$  mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente ao modelo mais simples possível, que seria considerar a vazão média constante durante todo o ano, como comentado em Schaeffli e Gupta (2007). Para rios com forte componente sazonal, a comparação do desempenho do modelo com a estimativa constante da média anual enfraquece a relevância do valor de  $NS$ . O coeficiente  $BE$ , por outro lado, é similar ao  $NS$ , porém mede o desempenho do modelo hidrológico relativamente a considerar a média

histórica de vazões em cada dia do calendário, também variando de 0 a 1, sendo tanto melhor quanto mais próximo de 1.

O coeficiente VE varia de 0 a 1 e procura avaliar o desvio entre hidrogramas observado e calculado pela medição da área entre eles, expresso em termos de fração de volume de água escoado (CRISS E WINSTON, 2008).

Outra maneira utilizada para avaliar o desempenho do modelo foi com comparações entre os hidrogramas da vazão observada e vazão calculada a nível mensal. Além da comparação visual, todas as medidas de desempenho (NS, NSlog, EV, r, EMA, REMQ, BE e VE) anteriormente citadas foram também utilizadas para verificar o ajuste do modelo a nível mensal.

### **3.3.8 Análise da relação dos processos hidrológicos simulados e uso da terra**

Os processos simulados pelo MGB-IPH são: escoamento superficial, intermediário e de base, evapotranspiração e umidade.

A análise da relação entre os processos simulados e uso da terra foi desenvolvida comparando a simulação da umidade, evapotranspiração real e escoamento com o comportamento esperado para cada HRU, ou seja, observando o comportamento esperado para determinado tipo de solo, vegetação e uso da terra, com o simulado pelo modelo MGB-IPH. Além disso, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre cada processo hidrológico em regiões semiáridas para servir de base científica com o intuito de ajudar a validar o modelo.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Representação do regime de vazões no rio Piancó**

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao ajuste do modelo MGB-IPH. Foram desenvolvidos dois tipos de ajuste: o manual e o automático, que utiliza o algoritmo de otimização multiobjetivo, já incluso no modelo hidrológico. Posteriormente, são apresentados os hidrogramas de vazão e estatísticas para o período de calibração, tanto para a manual e automática a nível diário e a nível mensal. Também são apresentadas as estatísticas e hidrogramas de vazão referentes ao período de validação do modelo, tanto a nível diário quanto a nível mensal.



#### 4.1.1 Ajuste do modelo hidrológico

##### Parâmetros ajustados

O modelo MGB-IPH foi calibrado no período de 1970 a 1990 e validado no período de 1991 a 2011. A definição dos parâmetros fixos e calibráveis ocorreram, inicialmente, conforme Silva (2005). Vale salientar que poucas foram as aplicações do modelo hidrológico MGB-IPH a bacias de rios intermitentes, e que apresente todas as características de uma bacia hidrográfica de regiões semiáridas, o que dificultou consideravelmente a definição, a priori, dos parâmetros e ajuste do modelo.

Contudo, pode-se considerar que o modelo MGB-IPH foi bem ajustado quanto à reprodução do regime hidrológico do rio Piancó (Ver capítulo definições dos parâmetros calibráveis). Valores dos parâmetros calibráveis manualmente, após ajuste, podem ser visualizados na tabela 15. Os valores dos parâmetros fixos foram apresentados no item *Definição dos parâmetros fixos e calibráveis*,

Tabela 15: Parâmetros calibrados manualmente

<i>Uso/tipo de solo e vegetação</i>	<i>Wm (mm)</i>	<i>b (-)</i>	<i>Kbas (mm)</i>	<i>Kint (mm)</i>	<i>XL (-)</i>	<i>CAP (mm)</i>	<i>Wc (mm)</i>
Argissolos/caatinga	730	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Litosossolos/caatinga	430	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Cambissolos/caatinga	630	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Argissolos/atividade agrícola	730	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Luvissolos/atividade agrícola	530	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Litossolo/atividade agrícola	430	0,11	0,001	2	0,67	0	0,05
Água	0	0,1	0,08	2	0,67	0	0,5

Pode-se perceber que o Wm (capacidade máxima de armazenamento de água no solo) adotado na presente pesquisa apresentou valores inferiores aos adotados na maioria das demais aplicações do modelo hidrológico. O Wm variou de 430 mm, para URH com litossolos e vegetação do tipo caatinga, a 730 mm para solos argissolos e com atividade agrícola.

Por exemplo, na aplicação desenvolvida por Ribeiro Neto (2006), para a bacia hidrográfica do Rio Madeira, o valor ideal para Wm ficou entre 6000 mm e 7000 mm para solo profundo e florestas, no entanto, o modelo foi calibrado automaticamente. Silva (2005),

também encontrou valores elevados de  $W_m$  utilizando a calibração manual, variando de 571 mm para vegetação do tipo caatinga a 7885 mm para pastagem com solo profundo.

Saldanha et al, (2012), na bacia hidrográfica do rio Uruguai, ajustaram o modelo com valores de  $W_m$  baixos, variando de 100 mm para o tipo de solo Neossolo Litólico a 350 mm para o nitossolo Vermelho.

Apesar dos estudos relatados não serem desenvolvidos em regiões semiáridas, percebe-se que o parâmetro  $W_m$  representa satisfatoriamente cada tipo de solo, ou seja, quando o tipo do solo de uma região apresenta maior profundidade o valor de  $W_m$  ideal tende a ser elevado e se o solo for de que pequena profundidade o  $W_m$  ideal tende a ser um valor baixo. O mesmo pode ser observado para a bacia do rio Piancó.

O tipo de vegetação e uso do solo parece influenciar mais o parâmetro  $b$  (parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo), daí torna-se necessário analisar a relação cobertura do solo/processo de infiltração de água no solo e, posteriormente, realizar testes para encontrar o melhor ajuste possível, em relação ao  $W_m$  e  $b$ .

Lima Sobrinho (2012), ao aplicar o MGB-IPH à bacia hidrográfica do rio Ipanema – PE, localizada em região de clima semiárido. Os valores de  $W_m$  adotados pelo o referido autor variaram de 80 mm a 95 mm. O que mostra que a definição dos parâmetros, tanto fixos como calibráveis, muitas vezes é algo subjetivo, já que depende, primeiramente, da interpretação de como o autor irá desenvolver a análise da escolha do  $W_m$  e, também, se irá encontrar ou não valores adequados na literatura sobre o tema em questão e, principalmente, de como o modelo irá representar o regime de vazão e quais os ajustes necessários para isso.

Uma maneira de reduzir essa subjetividade é partir de valores já utilizados para determinados tipos de URH nas demais aplicações do modelo e tentar o melhor ajuste possível. E, também, como vem sendo observado em outras aplicações, não especificar tanto cada parâmetro sem ter base científica e bibliográfica para isso, nesse caso, talvez generalizar cada parâmetro seja a melhor opção, ou seja, adotar um único valor para parâmetro o  $W_m$ , um para  $b$ , outro para  $k_{bas}$  e  $k_{int}$  de acordo com o tipo e uso do solo e da vegetação, ou para cada posto fluviométrico utilizado. Ambos os procedimentos foram adotados na presente pesquisa.

O parâmetro  $b$  ficou dentro do valor estabelecido de variação das demais aplicações do modelo, Segundo Collischonn (2001), o  $b$  pode variar de 0,01 a 1,6. Tal parâmetro controla as vazões pequenas e médias. Valores elevados de  $b$  indicam que mais água infiltra no solo. Na presente pesquisa foi adotado um valor generalizado de  $b$ , 0,11, ou seja, cada tipo e uso do solo e vegetação recebeu o mesmo valor para o parâmetro  $b$ . O valor ideal encontrado para a

bacia hidrográfica do rio Piancó parece ser condizente com os tipos de solos existentes na região em estudo, já que são solos com baixa capacidade de infiltração.

A escolha de generalizar o valor do parâmetro  $b$  ocorreu devido ao fato de não existir base bibliográfica para especificar tanto tal parâmetro, o mesmo acontecendo para o parâmetro  $k_{bas}$ ,  $k_{int}$ ,  $x_l$ ,  $CAP$  e  $W_c$ .

Silva (2005) aplicou o MGB-IPH a bacia do rio São Francisco. Um dos tipos de vegetação encontrado na bacia é a caatinga de solo profundo e intermediário, mesmo tipo de solo encontrado na bacia do rio Piancó. O valor para o parâmetro  $b$  adotado pelo autor variou de 0,2 a 1,29.

Um questionamento que pode ser feita sobre o parâmetro  $b$  é: como o mesmo tipo de solo e vegetação pode ter valores de parâmetros  $b$  tão diferentes de aplicação para aplicação e até mesmo em uma única aplicação do modelo? Isso parece ocorrer devido ao ajuste necessário para encontrar a melhor representação do regime de vazão pelo modelo hidrológico. No próprio estudo do Silva (2005), tal parâmetro, apesar de apresentar mesma vegetação e tipo de solo, obteve um valor diferente para cada estação fluviométrica calibrada.

Lima Sobrinho (2012) adotou um único valor para parâmetro  $b$ , assim cada bloco recebeu o mesmo valor que foi o 0,1. Ribeiro Neto (2006) utilizou a calibração automática e ordenou que cada parâmetro devesse variar de acordo com o limite indicado por Collischonn (2001). O valor encontrado pelo algoritmo de otimização variou de 0,11 a 1,17. Vale salientar que o referido autor também generalizou o parâmetro  $b$ , assim, cada o posto fluviométrico utilizado recebe um único valor entre 0,11 a 1,17. Isso mostra que não há como definir um parâmetro ideal para determinada HRU, sendo sempre necessário escolher o parâmetro que apresente o melhor ajuste para o modelo.

O  $K_{int}$  é o parâmetro que controla o escoamento sub-superficial, Algumas aplicações têm mostrado que os valores ideais para  $K_{int}$  variam de 4 a 40  $mm.dia^{-1}$ . No entanto, o valor do  $K_{int}$  adotado na presente pesquisa, ou que ajudou a estabelecer o melhor ajuste da representação da vazão observada foi 2  $mm.dia^{-1}$ , valor bastante inferior aos encontrados por Ribeiro Neto (2006) e Saldanha et al. (2012). Vale salientar que as características da bacia hidrográfica estudada por tais autores eram bem diferentes da bacia do rio Piancó.

Silva (2005), para a bacia do rio São Francisco, utilizou um valor de  $k_{int}$  para URH com vegetação do tipo caatinga e solo profundo e para URH de vegetação do tipo caatinga e solo litólico que apresentou amplitude de 0,5 a 113  $mm.dia^{-1}$ . E Lima Sobrinho (2012) generalizou utilizando o valor de 12  $mm.dia^{-1}$ . Ribeiro Neto (2006) e Saldanha et al. (2012) também utilizaram valores bem elevados de  $k_{int}$ , o que mostra que muitas vezes os

parâmetros precisam sair da faixa de amplitude indicada na literatura para se obter um melhor ajuste entre as vazões observadas e calculadas.

O Kbas é o parâmetro que controla o escoamento de base, Valores elevados de Kint e Kbas aumentam a vazão total (COLLISCHONN, 2001); (RIBEIRO NETO, 2006). As demais aplicações do MGB-IPH tem mostrado que valores de Kbas tem variado de 0,001 a 6,34, Para a bacia hidrográfica do rio Piancó o valor ideal de Kbas foi 0,001, o limite mínimo da amplitude fornecido pela literatura. Como tal parâmetro controla o escoamento de base, e uma vez que valores maiores aumentam o escoamento de base e valores menores diminuem, o valor obtido para o Kbas na presente pesquisa parece ser condizente com a realidade da bacia do Piancó, que apresenta solos rasos e com afloramentos cristalinos, onde há pouca infiltração de água no solo, e conseqüentemente, pouco escoamento sub-superficial e de base.

Como não foi encontrado na literatura valores ideais para os parâmetros XL, CAP e Wc, optou-se por não ajusta-los e adotar valores iniciais obtidos por Silva (2005). No entanto, estes parâmetros são de baixas sensibilidades e tem pouca influencia na representação do regime de vazão, ou seja, a alteração de tais parâmetros não modifica tanto o hidrograma de vazão.

Outra maneira de ajustar o modelo MGB-IPH foi a calibração automática com o algoritmo de otimização multiobjetiva incluído no sistema computacional do modelo. Nesse tipo de calibração é estabelecida uma amplitude de variação para cada parâmetro calibrável e, dentro desse intervalo, o algoritmo de otimização multiobjetiva encontra o melhor valor para cada parâmetro calibrável e o melhor ajuste possível para modelo. O limite mínimo e máximo de variação indicado para cada parâmetro pode ser visto na tabela 16.

Tabela 16: Limites dos parâmetros para calibração automática

<i>Parâmetro</i>	<i>Limite mínimo</i>	<i>Limite máximo</i>
B (-)	0,002	4,5
KINT(mm.dia <sup>-1</sup> )	0,4	133,9
KBAS (mm.dia <sup>-1</sup> )	0,03	2,2
CS (-)	2,4	120
CI (-)	48	2400
Wm - Argissolos/caatinga (mm)	88	880
Wm - Litosossolos/caatinga (mm)	54	540
Wm - Cambissolos/caatinga (mm)	158,4	1584
Wm - Argissolos/atividade agrícola (mm)	200	2000
Wm - Luvissolos/atividade agrícola (mm)	200	2000
Wm - Litossolo/atividade agrícola (mm)	200	2000

Por mais que na calibração automática para o parâmetro  $b$  o limite de variação tenha ultrapassado a amplitude indicada por Collischonn (2001), é possível notar que o algoritmo de otimização escolheu valores dentro do limite indicado pela literatura, como pode ser visto na tabela 17 e 18.

Tabela 17: parâmetros calibrados automaticamente,

<i>Uso/tipo de solo e vegetação</i>	<i>Wm (mm)</i>	<i>B (-)</i>	<i>Kbas (mm)</i>	<i>Kint (mm)</i>	<i>XL (-)</i>	<i>CAP (mm)</i>	<i>Wc (mm)</i>
Argissolos/caatinga	212	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Litosossolos/caatinga	492	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Cambissolos/caatinga	660	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Argissolos/atividade agrícola	1954	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Luvissolos/atividade agrícola	721	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Litossolo/atividade agrícola	554	0,067	0,03	2,73	0,67	0	0,05
Água	0	0,01	0,08	2,73	0,67	0	0,5

Tabela 18: parâmetros calibrados automaticamente

CS (-)	28
CI (-)	61
CB (dias)	500
QB_m³/s	0,001

A calibração automática obteve ajuste aceitável para o modelo, representou bem o regime de vazões, como é visto no item que segue. No entanto, um dos problemas encontrados nesse tipo de calibração é que os aspectos físicos da bacia podem ser negligenciados.

Por exemplo, o solo do tipo litólico, de acordo com o Sistema de Brasileiro de Classificação do solo desenvolvido pela Embrapa (2006), compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha matriz não ultrapassa 50 cm. E os argilosos são solos medianamente profundos a profundos. Com base nessas informações, pode-se afirmar que o solo argiloso tem maior capacidade de armazenamento de água que o litólico, por ser um solo de maior profundidade. Porém, na calibração automática tal aspecto não foi bem representado, já que o  $W_m$  (parâmetro da capacidade de armazenamento de água no solo) do argissolo foi inferior ao do litólico, quando na verdade deveria ser ao contrário.

Por outro lado, a calibração automática pode ser muito útil em relação ao ajuste do modelo. Uma opção que pode ser utilizado é rodar a calibração automática antes da manual e, a partir dos valores dos parâmetros obtidos, desenvolver a calibração manual procurando

sempre representar de forma adequada as características físicas da bacia. As duas formações de calibração representaram satisfatoriamente o regime de vazão da bacia hidrográfica do rio Piancó, como é visto a seguir.

### Qualidade do ajuste ao nível diário

A nível diário, foi possível observar que modelo MGB-IPH superestimou alguns picos de vazões com  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $610 \text{ m}^3/\text{s}$  na calibração manual entre setembro de 1970 a janeiro de 1972, janeiro de 1974 a setembro de 1974 e setembro de 1976 a janeiro de 1978 (Figura 22a) e subestimou o pico máximo de vazão ( $790 \text{ m}^3/\text{s}$ ) entre janeiro de 1980 a setembro de 1980. Percebe-se que o modelo representou melhor pequenos picos de vazões.

Já para o restante do período da calibração manual (Figura 22), o modelo subestimou os picos de vazão acima de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mas representando satisfatoriamente as vazões abaixo de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . A figura 21 mostra o hidrograma de vazão resultante da calibração manual nos anos de 1985 a 1989.

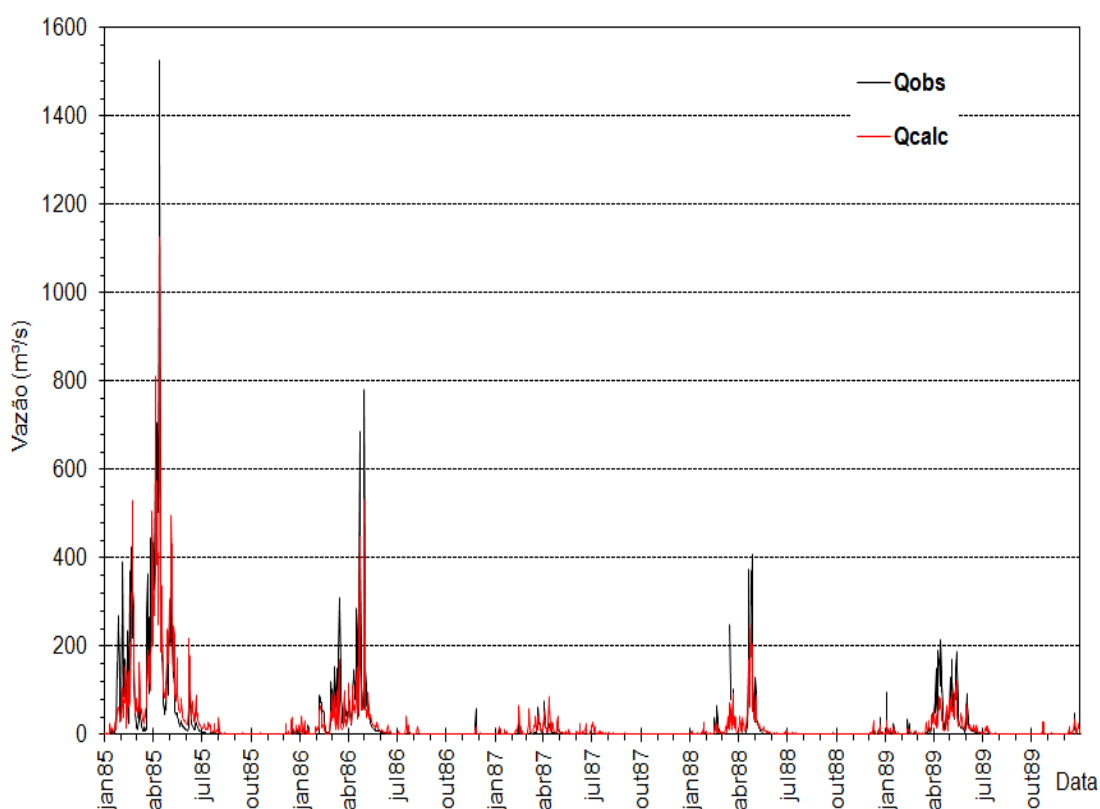


Figura 21: hidrograma de vazão na calibração manual no posto fluviométrico Piancó.

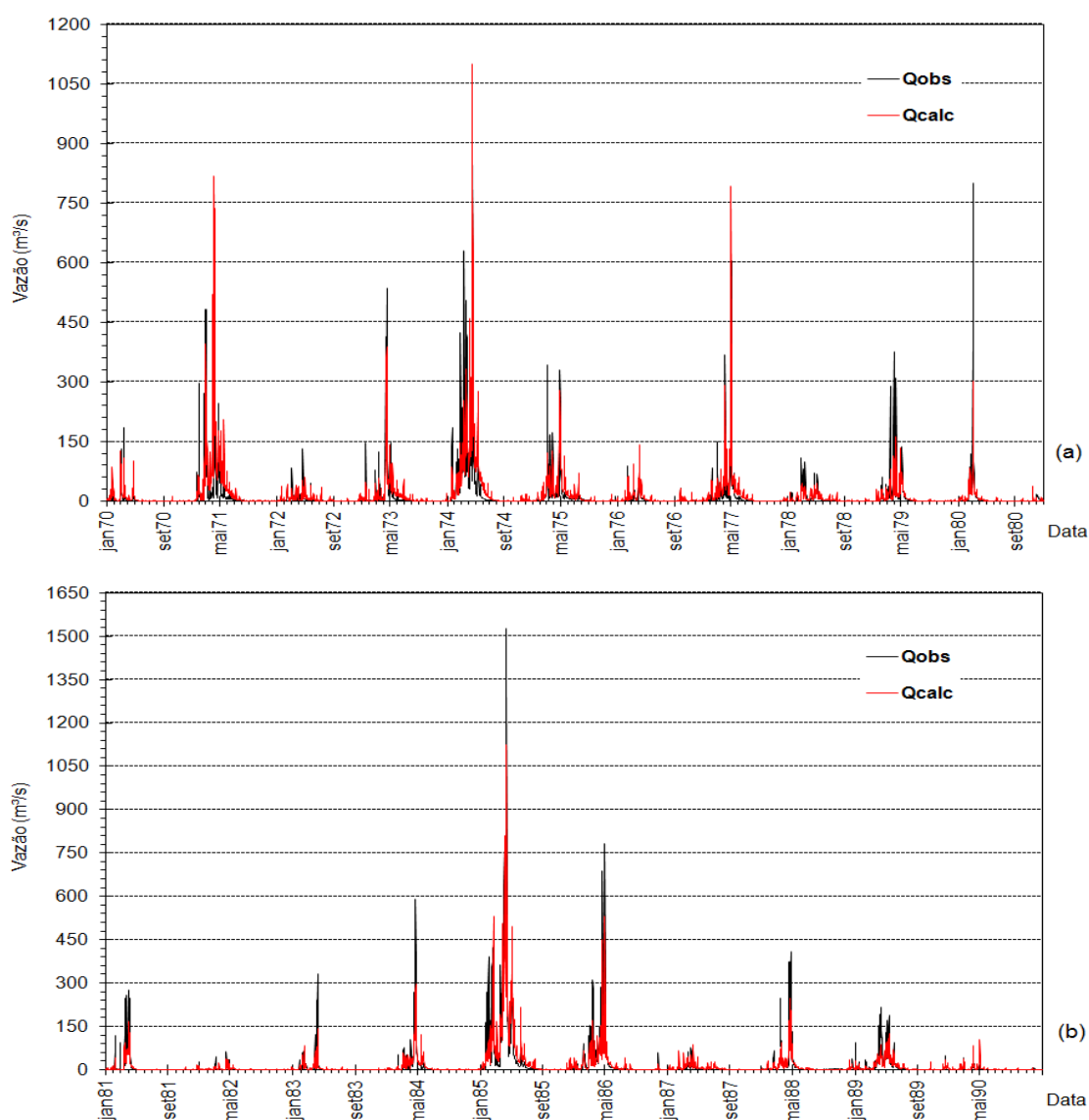


Figura 22: hidrograma de vazão na calibração manual no posto fluviométrico Piancó.

Apesar do MGB-IPH ter superestimado alguns picos de vazões de média a máxima e subestimado picos médio a pequenos, os valores das funções objetivo mostram que o modelo obteve um bom ajuste tanto na calibração manual como na automática (tabelas 19 e 20). Isso pode ser demonstrado comparando os valores das funções objetivo obtidas pelo MGB-IPH na presente pesquisa com valores de funções objetivo obtidas por outros modelos hidrológicos para a bacia do rio Piancó.

Tabela 19: Estatísticas a nível diário na calibração manual

<i>NS</i>	<i>NSlog</i>	<i>EV%</i>	<i>r</i>	<i>EMAm<sup>3</sup>/s</i>	<i>REMQt<sup>3</sup>/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,7	-0,11	3,42	0,84	10,64	35,15	0,35	0,64

Tabela 20: Estatísticas a nível diário na calibração automática

<i>NS</i>	<i>NSlog</i>	<i>EV%</i>	<i>r</i>	<i>EMAm<sup>3</sup>/s</i>	<i>REMQm<sup>3</sup>/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,72	-0,34	0,86	0,85	10,01	33,97	0,39	0,66

Comparando outras aplicações do MGB-IPH, o erro de volume apresentou valor bastante aceitável. Por exemplo, Meller et al, (2014) para o Rio Paraopeba (12,150 km<sup>2</sup>) encontraram o erro de volume de -6,6 a -3,1%, Valores ideais de EV% são mais próximo de zero possível.

Os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para a bacia do rio Piancó foram bem semelhantes aos encontrados em outras aplicações do MGB-IPH. No entanto, segundo Shaepli e Gupta (2007), o Nash-Sutcliffe (NS) não mede o quão bom é o ajuste do modelo, uma vez que a equação utiliza a média das vazões observadas de todo o período da simulação.

O uso do valor médio das vazões observadas como referência pode ser um meio de predição pouco eficiente em casos de séries temporais de grande sazonalidade ou relativamente útil em situações onde a série temporal é definida por flutuações em torno de um valor médio relativamente constante. Assim, Schaepli e Gupta (2007) propõem utilizar um coeficiente que leva em conta a variabilidade sazonal do valor utilizado como referência.

A diferença entre o coeficiente denominado *normalized benchmark efficiency* (BE) (SHAEPLI E GUPTA, 2007) para o NS é que ao invés de utilizar a média das vazões observadas é utilizada a vazão de referência, ou seja, no caso do ajuste a nível diário do modelo, é utilizada uma média para cada dia do ano, para nível mensal adota-se uma média para cada mês do ano.

A presente pesquisa adotou o BE como forma de verificar o quão bom foi o ajuste do modelo para o rio Piancó. Porém, vale ressaltar que o BE não foi utilizado no momento da calibração do modelo, como com as demais funções objetivas NS, NSlog e Erro de volume. Dessa forma, depois que o modelo foi calibrado é que o coeficiente BE foi calculado, sendo obtido a nível diário, o valor de 0,64, valor não distante do encontrado para o NS. Getirana et al. (2011) adotaram o BE e encontraram valores que a nível diário variaram de -1,5 a 0,7.

Por outro lado, Criss e Winston (2008) questionaram se o NS ou qualquer modificação presente, verdadeiramente, a métrica ideal para a comunidade hidrológica. Embora ambos, NS e BE, sejam convenientemente adimensionais e fáceis de calcular, são limitados à medida que vão desde o valor  $-\infty$  a 1, indicando perfeita concordância entre o modelo e a medição observada. Estranhamente, grandes valores negativos retornados por NS ou BE não indicam necessariamente que algum modelo apresentou ajuste muito deficiente, mas apenas que a



vazão observada é muito constante ou que por outro lado é muito próximo dos valores de referência (as médias de cada dia ou mês).

Nesse sentido, os referidos autores propuseram a eficiência volumétrica (VE) que, diferente do NS e BE, seu valor ideal varia de 0 a 1. E sua equação não utiliza a média das vazões do período ou a média dos dias ou do mês de um ano. Mas utiliza o somatório das vazões observadas com intuito de comparar diretamente a vazão observada com a calculada. O Valor de VE obtido para o rio Piancó pode ser visto na tabelas 19 e 20.

Ainda sobre o ajuste do modelo, pode ser visto que o valor de NSlog para o rio Piancó foi muito inferior aos encontrados nas demais aplicações do MGB-IPH. O Valor ideal de NSlog é 1, assim, teoricamente, quanto mais próximo de 1 melhor seria o ajuste para o modelo hidrológico. Porém, por mais que o modelo fosse calibrado com o intuito de melhorar tal estatística, não foi possível atingir um estimativa melhor para NSlog. Essa medida de desempenho é muito impactada por erros nas vazões baixas e, como se trata de rio intermitente, cuja vazão é nula por vários períodos de tempo, os erros do modelo em não acertar um valor exatamente zero é severamente punido no cômputo do NSlog. Como o MGB-IPH foi pouco aplicado a bacia de rios intermitentes, não existe base bibliográfica para comparar com os resultados obtidos pela presente pesquisa. Esses resultados podem indicar que o MGB-IPH, apesar de apresentar resultados satisfatórios, precisa ser modificado para representar, mais fielmente possível a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas com características semiáridas, de rios intermitentes.

Ribeiro Neto et al. (2007) ao aplicar o MGB-IPH a uma sub-bacia localizada na porção semiárida do rio São Francisco, desenvolveram algumas modificações no modelo. Os autores, com o objetivo de melhorar os resultados das simulações, desenvolveram três modificações: uso de intervalo de tempo mensal, modificação do reservatório de interceptação e retirada da propagação na rede drenagem.

No entanto, para a presente pesquisa, foi possível perceber que trabalhar com o nível de tempo mensal produz resultados melhores em termos de hidrogramas, como pode ser visto no item que segue, algo que de certa forma é esperado, pois quanto maior o passo de tempo de cálculo, menores são as flutuações e a variabilidade, inclusive incertezas ou mesmo erros na chuva diária observada são minimizados ao trabalhar com passo de tempo mensal,

Por outro lado, outra modificação proposta por Ribeiro Neto et al. (2007) pode ser pertinente em relação à modelagem de bacias de regiões semiáridas com modelo hidrológico distribuído MGB-IPH. Os autores propuseram que o MGB-IPH, além da geração do escoamento por excesso de saturação, pode ser modificado para gerar o escoamento gerado

pelo excesso da capacidade de infiltração. Essa modificação pode ajudar a melhorar a representação dos picos máximos de vazão que na de calibração manual (1970 a 1990), entre os anos de 1980 a 1990 não puderam ser melhores representados mesmo tentando ajustar os parâmetros calibráveis e talvez, com tal modificação o ajuste dos parâmetros calibráveis possa ser feito com maior facilidade, além de melhorar valores das funções objetivas.

Percebe-se, a partir da comparação dos valores das estatísticas obtidos na calibração automática e manual (Tabela 19 e 20) pelo MGB-IPH para o rio Piancó, que a calibração manual apresentou melhores valores para as funções objetivas NS, NSlog e EV% e demais estatísticas utilizadas, o que mostra que a calibração automática a pode gerar resultados satisfatório, porém sendo limitada pelo fato de não representar, adequadamente, fatores físicos da bacia, como relatado anteriormente.

A figura 23 mostra o hidrograma de vazão na calibração automática nos anos de 1985 a 1989. A mostra figura 24 mostram o hidrograma de vazões para a calibração automática (1970 a 1990). Percebe-se que, assim, como na calibração manual, que entre os anos de 1970 e 1980 (Figura 24a) as vazões máximas foram superestimadas, mas os picos mínimos não foram tão bem representados como foi calibração manual.

Entre os anos de 1991 a 2011 (Figura 24b) a calibração automática subestimou o pico máximo de vazão, mas o modelo representou melhor que nos dez primeiros anos de calibração os picos médios de vazão.

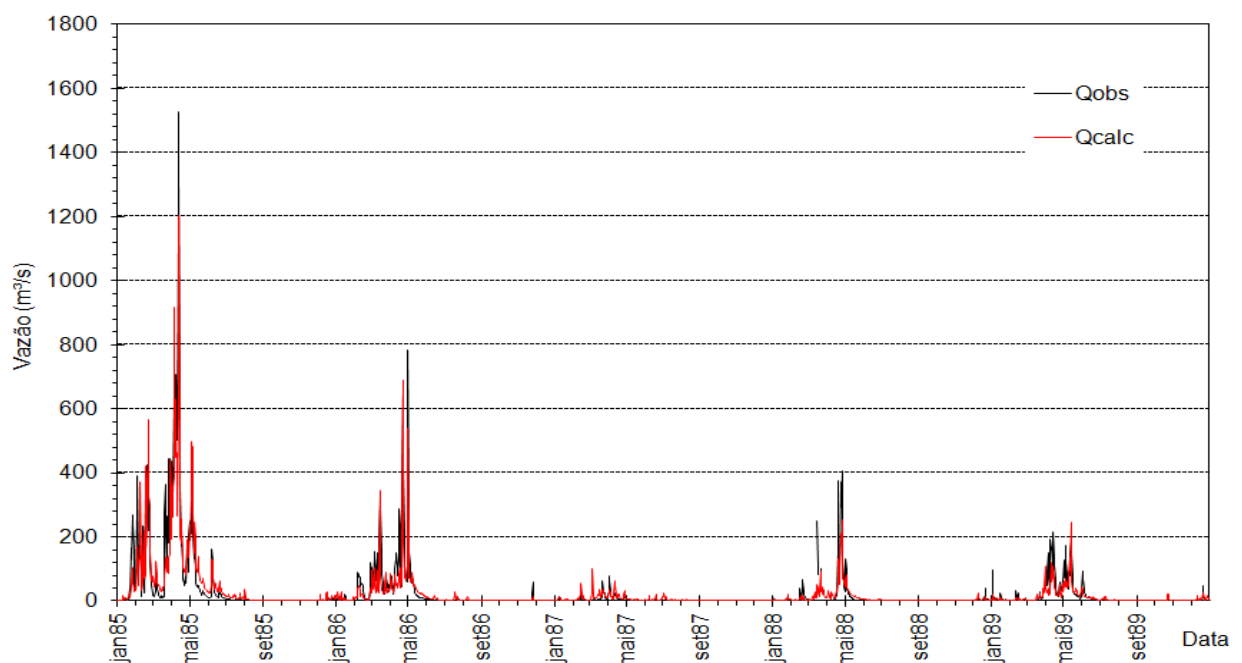


Figura 23: Hidrograma de vazão na calibração automática entre os anos de 1985 a 1989

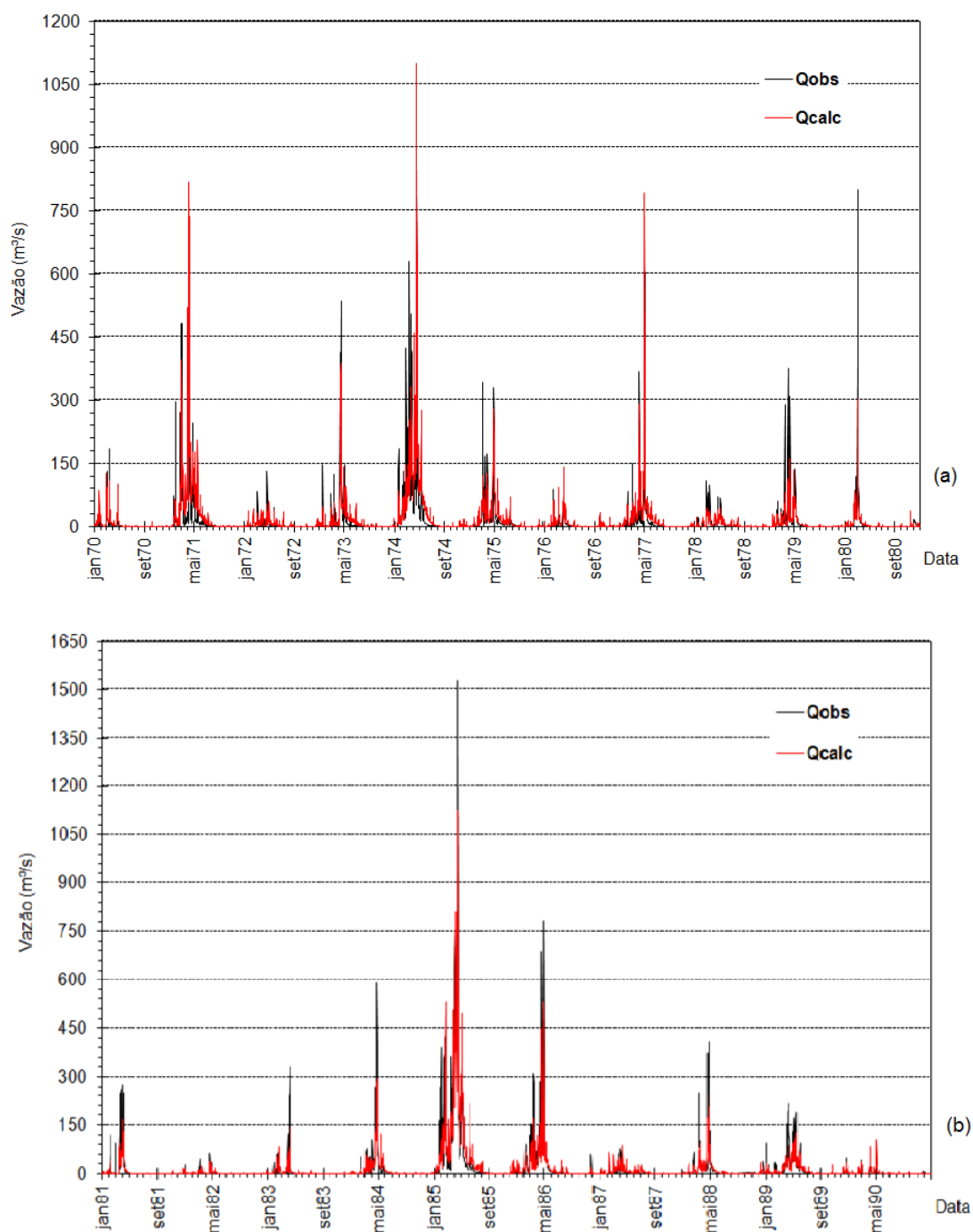


Figura 24: Hidrograma de vazão na calibração automática período de 1970 a 1990

Outra forma de análise que pode mostrar o quão bom foi ajuste do modelo hidrológico são os gráficos de dispersão, que servem para mostrar a relação/associação entre variáveis,

Analisando as figuras 25 e 26, percebe-se que vazões até 200  $\text{m}^3/\text{s}$  foram melhores representadas pelo MGB-IPH para o rio Piancó, pois houve maior concentração de pontos em

volta da linha 1:1, não apresentando muita discrepância entre as vazões calculadas e observadas.

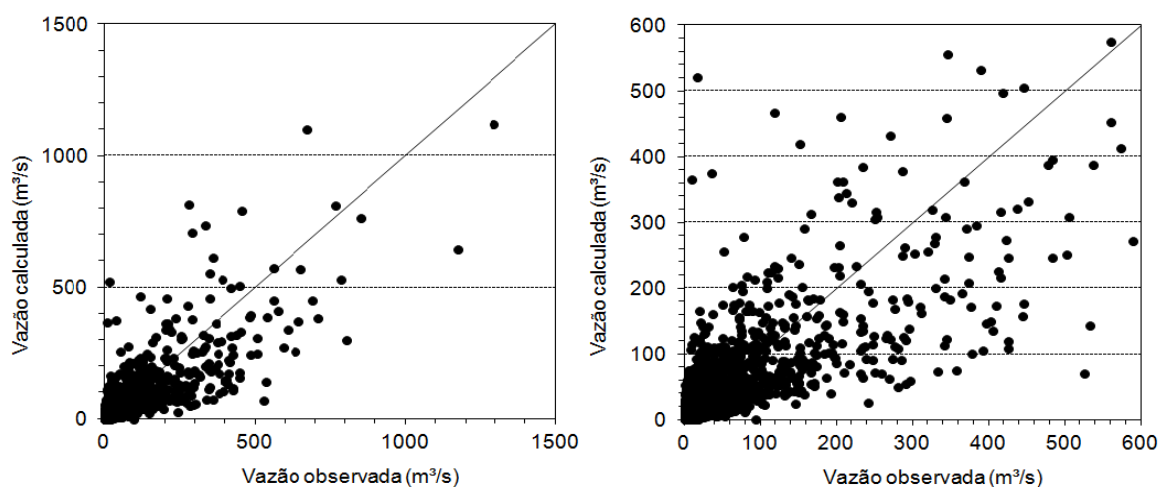


Figura 25: Gráfico de dispersão da calibração manual

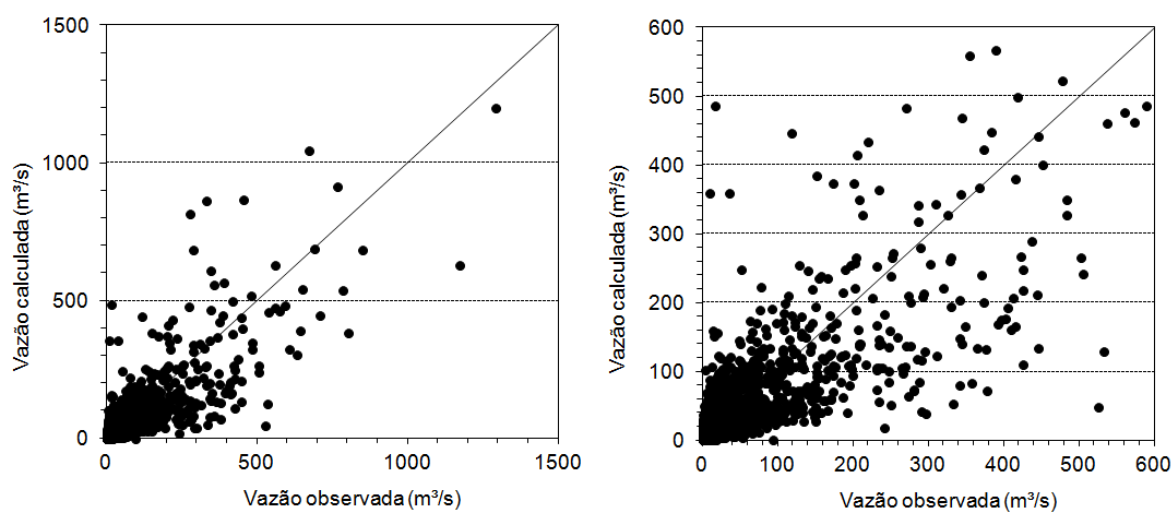


Figura 26: Gráfico de dispersão da calibração automática,

Na validação do modelo, que compreende o período de 1991 a 2011 (Figura 28). A figura 27 mostra o hidrograma de vazão do período de calibração no ano de 2003 a 2009. Observa-se que o MGB-IPH superestimou os picos de vazões máximas (janeiro a setembro de 1995 e maio de 200) e subestimou alguns picos de vazões com 350 m³/s. Os picos de vazões com 150 m³/s foram melhores representados.

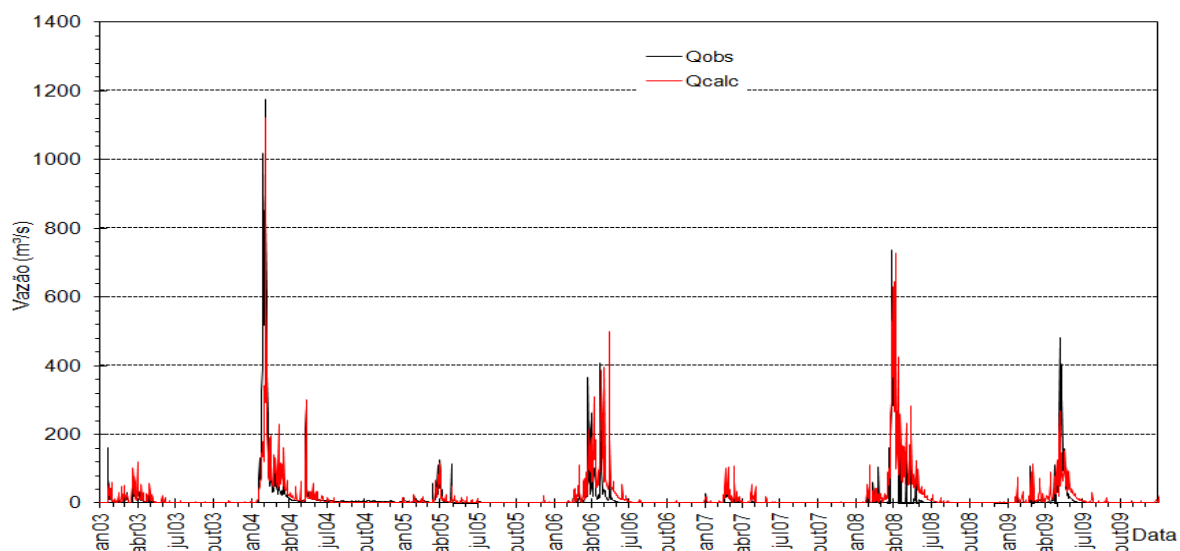


Figura 27: Hidrograma no período de validação do modelo (2003-2009) para o posto fluviométrico Piancó

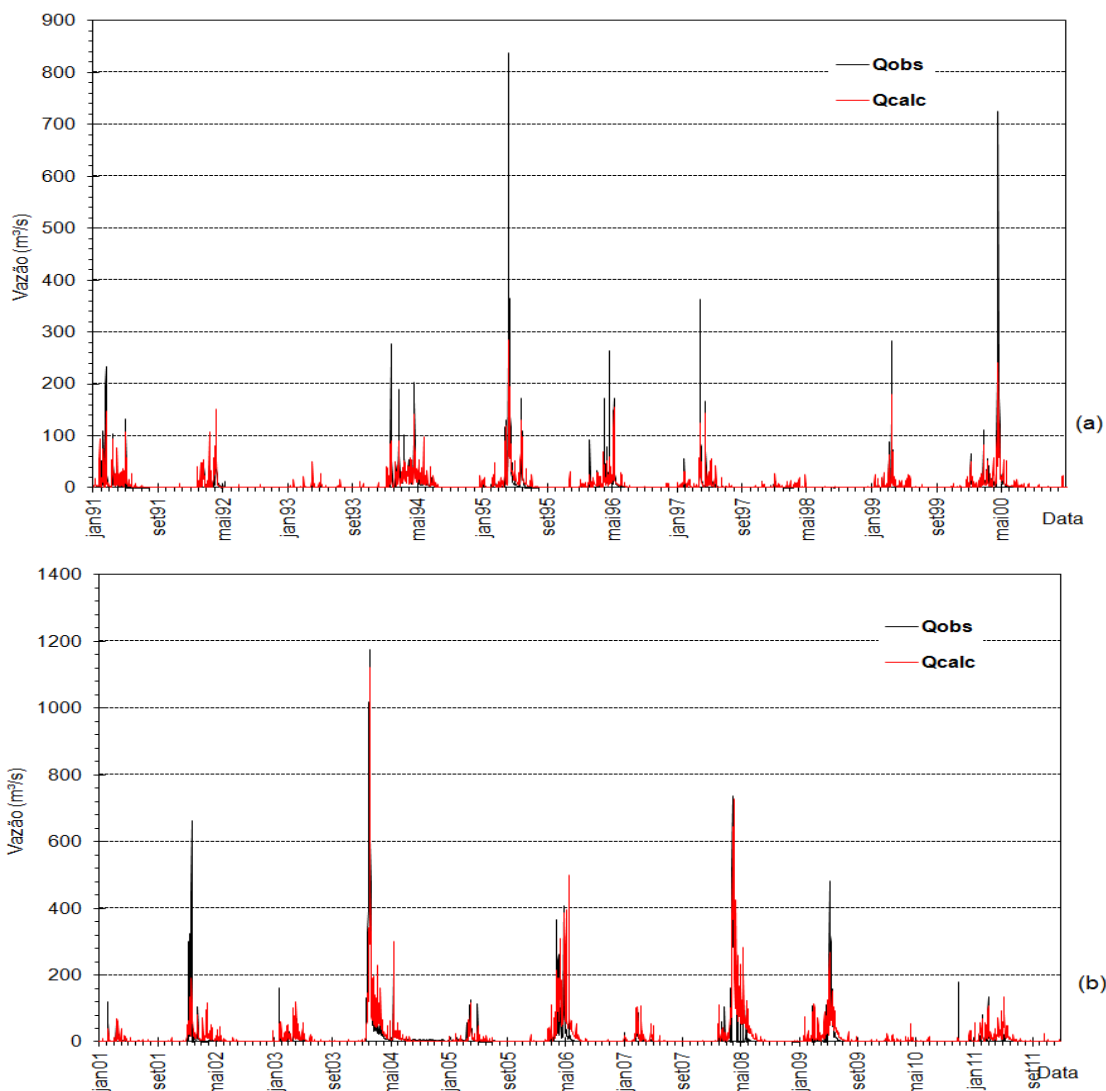


Figura 28: hidrograma no período de validação do modelo para o posto fluviométrico Piancó

Tabela 21 mostra as estatísticas para o período de validação. Percebe-se que os valores obtidos para a validação reduziram em relação ao período de calibração, em termos das estatísticas NS, NSlog, r, VE e BE. O erro de volume na validação foi maior na validação, mas o erro médio absoluto apresentou melhor resultado que na calibração,

Tabela 21: Estatísticas a nível diário na validação

<i>NS</i>	<i>NSlog</i>	<i>EV%</i>	<i>r</i>	<i>EMAm<sup>3</sup>/s</i>	<i>REMQm<sup>3</sup>/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,65	-0,18	9,49	0,81	6,81	29,12	0,26	0,62

A figura 29 mostra o gráfico de dispersão para o período de validação. Percebe-se que as vazões até 100 m<sup>3</sup>/s foram melhores representadas pelo MGB-IPH e que vazões de média a máxima foram subestimadas.

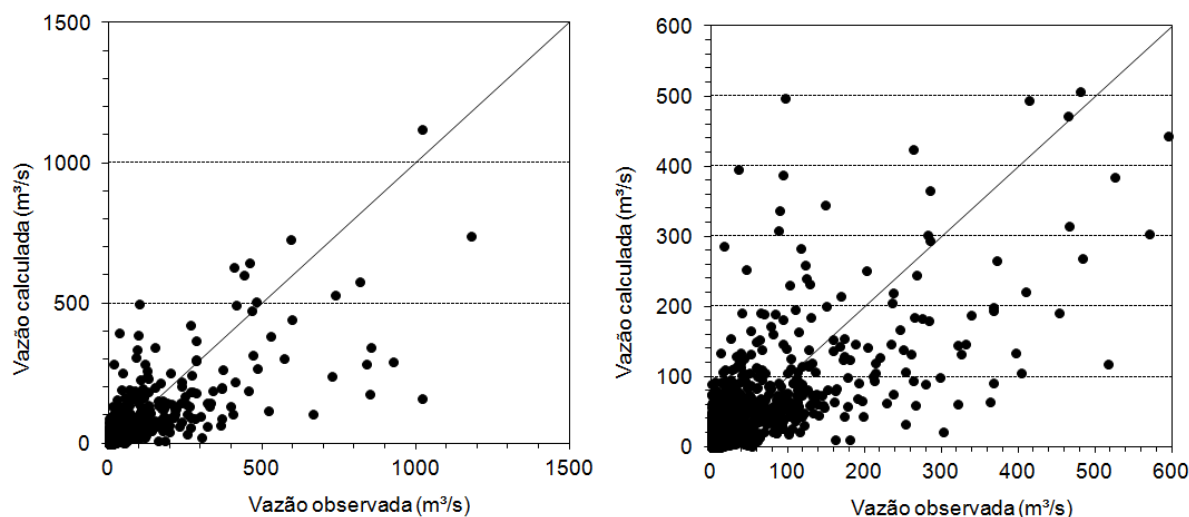


Figura 29: gráfico de dispersão da validação do modelo

#### 4.1.3 Qualidade do ajuste ao nível mensal

A figura 30 mostra o hidrograma de vazão para o período de calibração manual a nível mensal. Pode-se perceber que MGB-IPH obteve um ajuste melhor a nível mensal em comparação com o diário, apesar de ter superestimado um pico vazão de 100 m<sup>3</sup>/s entre janeiro a novembro de 1971 e subestimando o pico vazão de 400 m<sup>3</sup>/s em março de 1985.

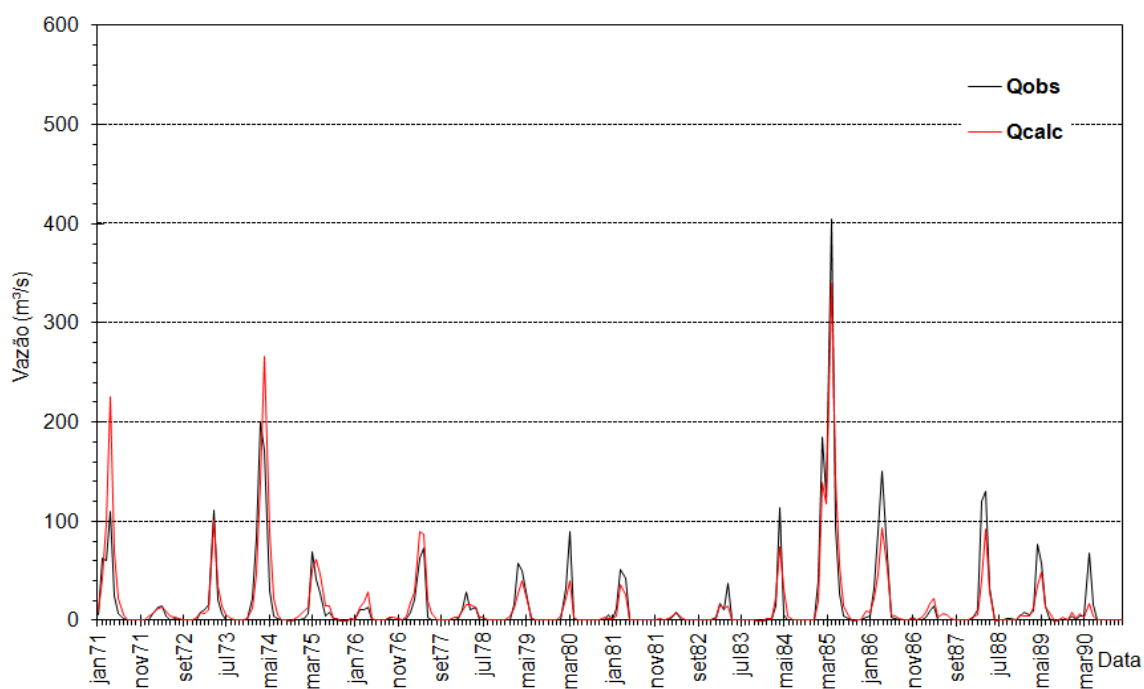


Figura 30: hidrograma da calibração manual a nível mensal para o posto fluviométrico Piancó

A tabela 22 mostra as estatísticas obtidas com o modelo MGB-IPH para o rio Piancó a nível mensal para a calibração manual. O modelo produzir resultados melhores a nível mensal, observa-se que os valores das estatísticas são superiores positivamente para o nível mensal em relação ao diário.

Tabela 22: Estatísticas a nível mensal na calibração manual

<i>NS</i>	<i>NSlog</i>	<i>EV%</i>	<i>R</i>	<i>EMAm<sup>3</sup>/s</i>	<i>REMQm<sup>3</sup>/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,82	0,04	0,06	0,91	7,85	17,89	0,53	0,72

Para saber o quão foi o ajuste do modelo a nível mensal, torna-se importante comparar os valores das estatísticas com outras aplicações do modelo MGB-IPH em bacias de clima semiárido.

Escarião et al. (2012) encontraram valores de *r* (coeficiente de correlação) para quatro modelos hidrológicos aplicados à bacia do rio Piancó bem próximos ao obtido pelo MGB-IPH na presente pesquisa. O melhor valor de *r* encontrado pelos autores mencionados foi de 0,86 para o modelo conceitual concentrado GHR. Outro modelo utilizado pelos referidos autores foi MIKE SHE, que é um modelo hidrológico distribuído, que apresentou coeficiente de correlação de 0,55, inferior ao MGB-IPH. Valores de erro médio absoluto obtidos pelo MGB-

IPH para o rio Piancó foram semelhantes aos alcançados por Escarião et al, (2012) na mesma bacia.

O erro de volume em porcentagem (EV%) encontrado para os modelos utilizado pelos referidos autores foi menor que o obtido pelo MGB-IPH, O MIKE SHE teve  $\Delta V\%$  de 1,80% e o modelo GHR obteve 0,19%.

Ribeiro Neto et al. (2007) aplicaram o MGB-IPH a uma sub-bacia localizada na porção semiárida do rio São Francisco e obteve valores de NS equivalentes aos obtidos pelo o MGB-IPH para o rio Piancó. Os NS obtidos pelos autores mencionados variaram de 0,55 a 0,83, Para a bacia do rio Piancó, o MGB-IPH apresentou NS de 0,82. Por outro lado, assim como os resultados obtidos a níveis diários pelo modelo para o rio Piancó, o NSlog apresentou estimativa muito inferior às demais aplicações MGB-IPH.

A figura 31 apresenta o diagrama de dispersão para a calibração manual. Percebe-se que o modelo representou satisfatoriamente o regime de vazão a nível mensal para o rio Piancó.

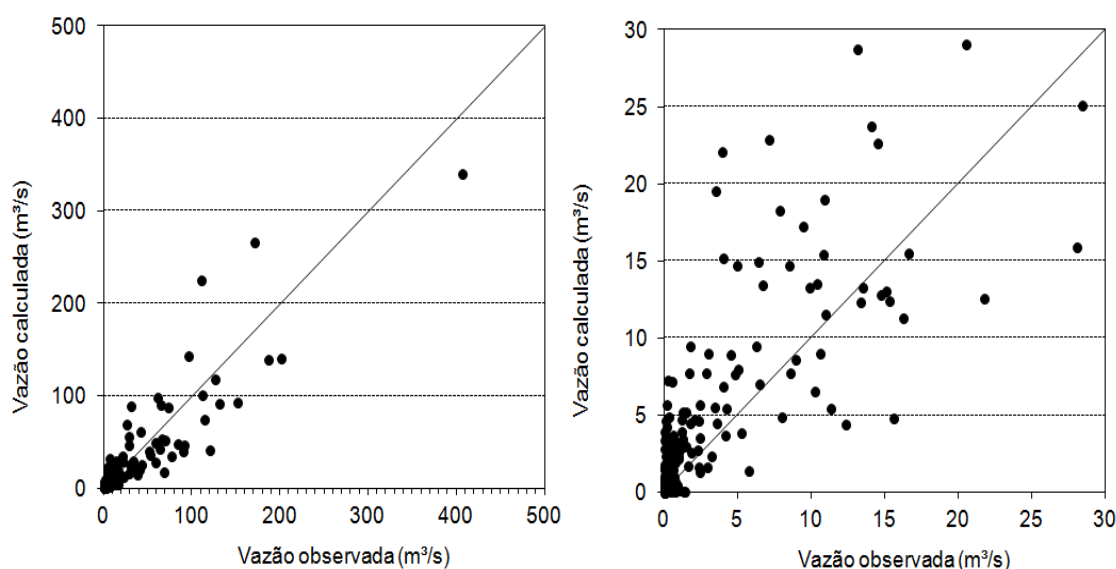


Figura 31: gráfico de dispersão mensal da calibração manual

Na figura 32 pode ser visto o hidrograma de vazões da calibração automática do modelo (1970 a 1990). Percebe-se que a vazão calculada na calibração automática não apresentou diferenças significativas em relação à calibração manual.

Porém, as estatísticas apresentaram diferenças (Tabela 23). O NS para calibração automática foi melhor, mas NSLog se apresentou negativo, assim como, o erro de volume. A calibração manual apresentou estatísticas melhores NSlog e EV%. O r apresentou melhor



resultado para a calibração automática a nível mensal, assim como o erro médio absoluto (EMA), a raiz do erro médio quadrático (REMQ  $\text{m}^3/\text{s}$ ) e VE e BE.

Tabela 23: Estatísticas a nível mensal na calibração automática do modelo

<i>NS</i>	<i>NSI</i>	<i>EV%</i>	<i>R</i>	<i>EMA_m³/s</i>	<i>REMQ_m³/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,85	-0,03	-2,55	0,92	7,07	16,49	0,58	0,76

Getirana et al. (2012) aplicaram o MGB-IPH a bacia do rio Negro (712,000  $\text{km}^2$ ) e adotou o coeficiente BE para verificar o ajuste do modelo. Os autores obtiveram valores que variam de -1,2 a 0,7. O que mostra que, para o rio Piancó, a estatística obtida para o BE foi bastante satisfatória, pois, tanto na calibração automática e manual, tal coeficiente apresentou um valor acima de 0,7.

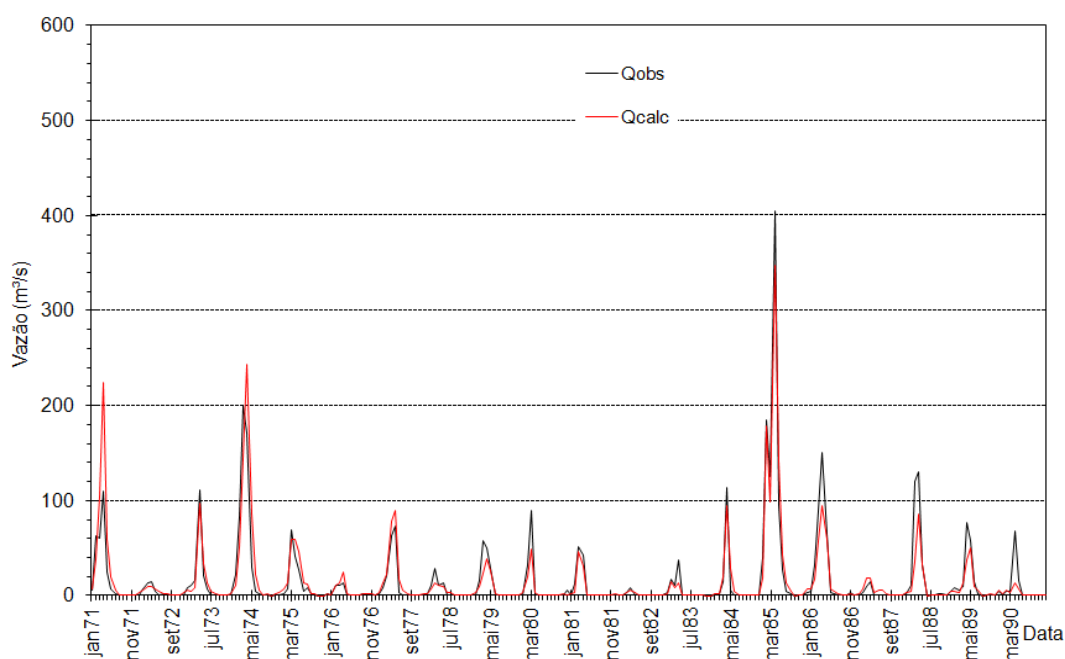


Figura 32: hidrograma na calibração automática a nível mensal para o posto fluviométrico Piancó

A figura 33 mostra o diagrama de dispersão para a calibração automática a nível mensal. Observa-se que não houve mudanças em relação à representação das vazões em comparação a calibração manual.

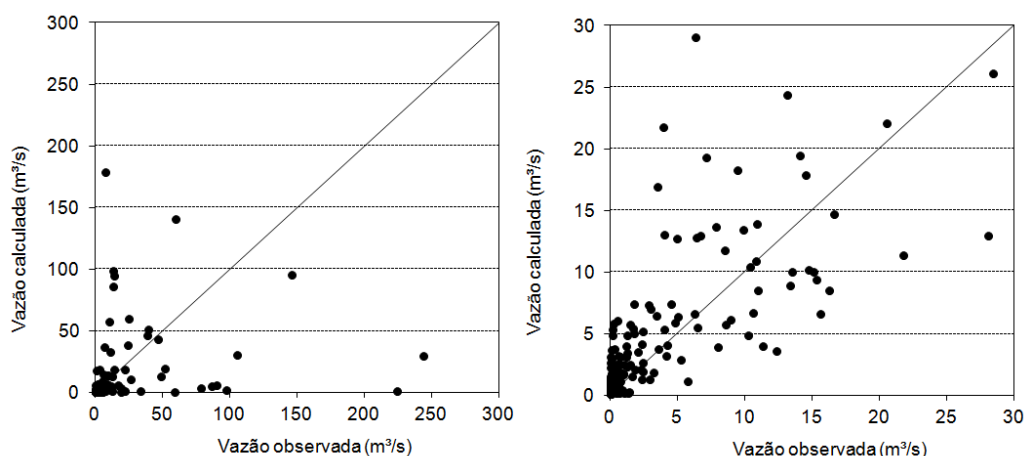


Figura 33: gráfico de dispersão mensal da calibração automática

A validação do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH mostrou que a representação a nível mensal das vazões pelo modelo foi satisfatória (Figura 34). O modelo subestimou picos de 100 m<sup>3</sup>/s de vazão e superestimou picos de 250 m<sup>3</sup>/s e picos pequenos de 70 m<sup>3</sup>/s, mas mostrando o que tem capacidade ou ser modelo promissor para modelagem hidrológica de grandes bacias de regiões semiáridas.

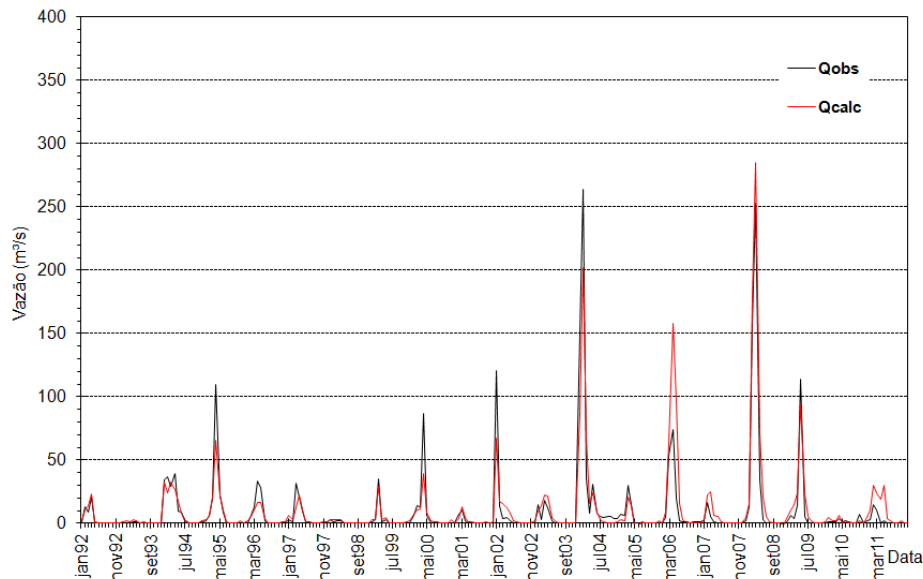


Figura 34: hidrograma de vazão mensal da validação do modelo para o posto fluviométrico Piancó

A tabela 24 mostra as estatísticas obtidas pelo MGB-IPH para a bacia hidrográfica do rio Piancó no período de validação do modelo a nível mensal. Mostrando que o N, NSlog, R,

EMAm<sup>3</sup>/s, REMQm<sup>3</sup>/s, assim como o BE, apresentaram valores melhores na validação a nível mensal do que na calibração manual a nível mensal. No entanto, o erro de volume foi maior.

Tabela 24: Estatísticas a nível mensal na validação do modelo

<i>NS</i>	<i>NSlog</i>	<i>EV%</i>	<i>R</i>	<i>EMAm<sup>3</sup>/s</i>	<i>REMQm<sup>3</sup>/s</i>	<i>VE</i>	<i>BE</i>
0,84	0,05	10,5	0,92	4,9	12,64	0,51	0,81

No geral, as estatísticas obtidas para o rio Piancó com o MGB-IPH mostraram valores semelhantes às demais aplicações do modelo. Apenas o NSlog não apresentou valor igualmente alto às demais aplicações do modelo, indicando que, para bacias de regiões semiáridas, talvez seja necessário realizar algumas modificações no modelo. Infelizmente, não existe referência bibliográfica sobre o MGB-IPH em bacias de clima semiárida que apresente estatísticas para NSlog, assim, limitando o trabalho de comparação de resultados obtidos pela presente pesquisa. Ribeiro Neto et al. (2007), para sub-bacia de clima semiárido do rio São Francisco encontraram valores de NS que variaram de -2,58 a 0,5 e EV% que variou de 5,61 a 83,69 para a validação do MGB-IPH.

A figura 35 mostra o diagrama de dispersão para o período de validação a nível mensal para o rio Piancó. Na figura 35, gráfico a esquerda da figura, percebe-se que, em geral, o modelo representou bem as vazões. Mas no gráfico a direita, com o eixo x e y minimizado, observa-se que a vazão calculada entre 1m<sup>3</sup>/s a 3 m<sup>3</sup>/s apresentou mais dispersão em comparação a vazão observada.

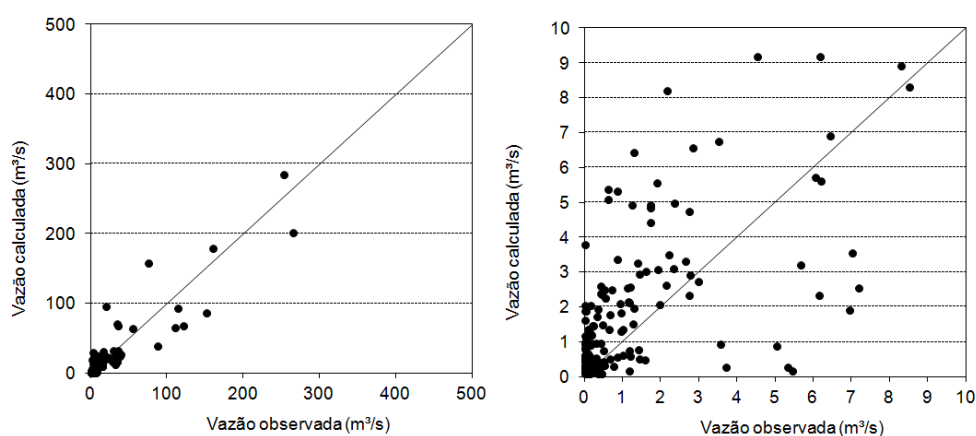


Figura 35: gráfico de dispersão mensal para o período de validação

## 4.2 Representação espaço-temporal dos processos hidrológicos

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às análises dos processos hidrológicos, tais como: evapotranspiração, umidade do solo e geração do escoamento calculado pelo modelo hidrológico distribuído MGB-IPH.

### 4.2.1 Evapotranspiração

Na modelagem do rio Piancó foi possível perceber que o modelo MGB-IPH simulou o processo de evapotranspiração de forma coerente (Figura 36). Observa-se que o comportamento da evapotranspiração gerada pelo modelo foi coerente com a precipitação pluviométrica observada para todo período simulado, a média anual variou, no período de 1970 a 2011, de 369 mm a 1280 mm. Em termos de comparação, a precipitação média anual, para o mesmo período, variou de 336 mm a 1819 mm.

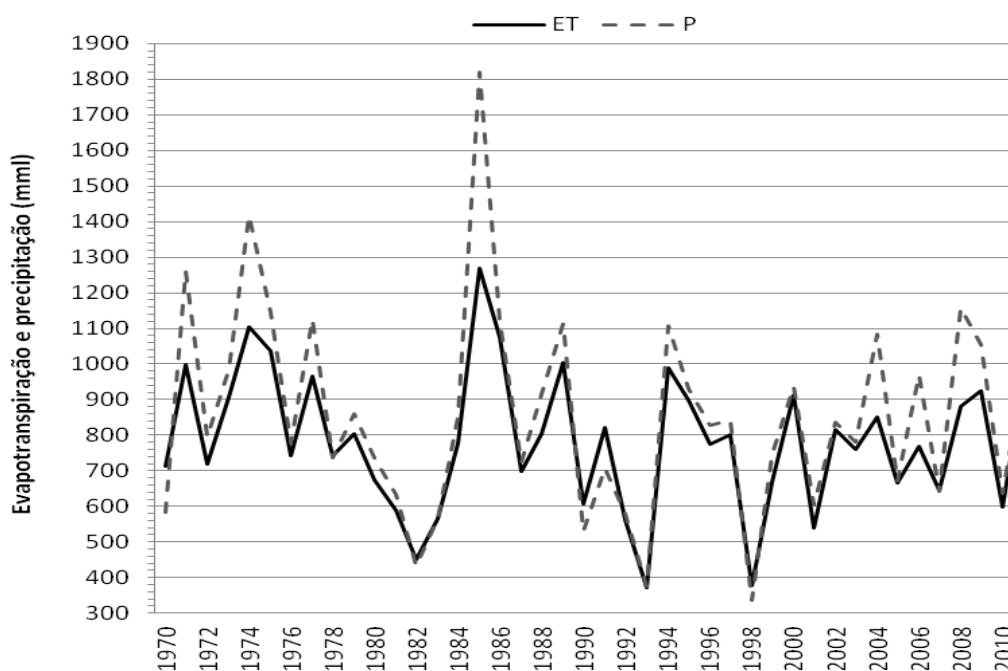


Figura 36: Variação da evapotranspiração real anual na bacia do rio Piancó

A figura 37 mostra a evapotranspiração mensal para a bacia do rio Piancó, enfatizando e reforçando o que foi relatado anteriormente. Percebe-se que os maiores picos de evapotranspiração ocorreram em resposta ao total de água precipitada na bacia. Dessa forma,

pôde-se observar que a evapotranspiração gerada pelo MGB-IPH está condizente com a precipitação pluviométrica, e respeitando a quantidade de água acumulada.

Ao longo do ano, a evapotranspiração média mensal variou de 16 mm a 118 mm. Em média, a precipitação pluviométrica mensal para o mês de janeiro é de 121 mm, e o modelo MGB-IPH calculou que evapotranspiração média mensal de janeiro foi de 68,33 mm. Assim, pode-se dizer que, em média, 56 % do precipitado no mês de janeiro foi evaporadora. As maiores taxas médias de evapotranspiração ocorreram nos meses de março e abril, 110 mm e 118 mm, respectivamente, sendo também os meses que apresentaram maiores médias de precipitação pluviométrica, março com 198 mm e abril com 166 mm, sendo evaporados 56 % e 71% da precipitação pluviométrica para os referidos meses.

A evapotranspiração real média entre os meses de junho a dezembro apresenta-se maior que a de precipitação pluviométrica, indicando que existe um déficit hídrico nesse período do ano. Por exemplo, a precipitação média para o mês de julho foi de 22 mm e evapotranspiração média de 69 mm, mostrando que mais de 100% do precipitado foi evaporado. Isso é possível devido à quantidade de água acumulada no solo provinda de eventos chuvosos anteriores.

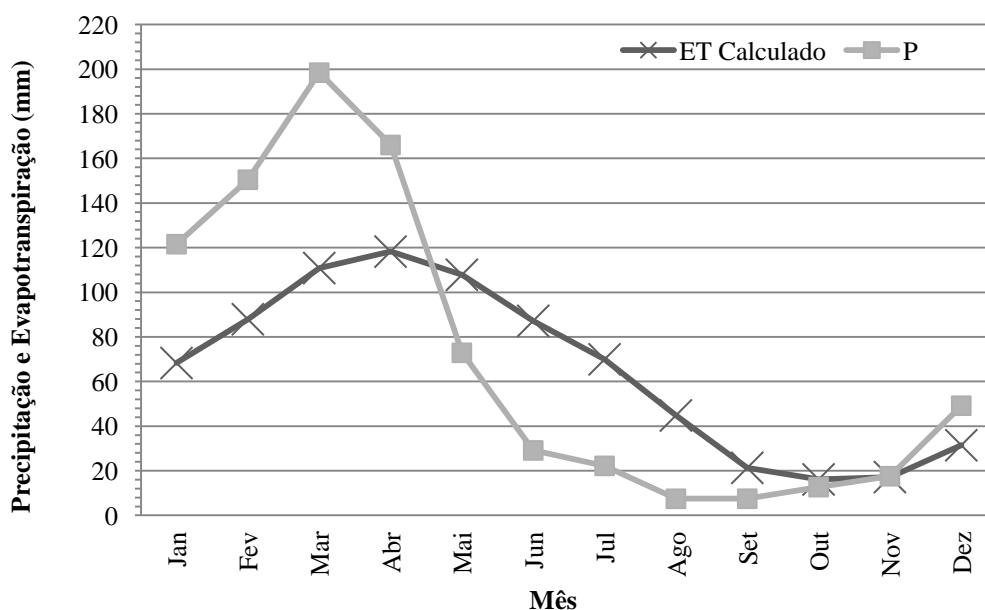


Figura 37: Variação da evapotranspiração real e chuva mensal na bacia do rio Piancó

Na tabela 25 pode ser visualizado o valor médio anual da evapotranspiração para os diferentes HRU adotados nas simulações. Para os diferentes tipos de HRU a evapotranspiração média anual variou de 771,47 a 883,28 mm.ano<sup>-1</sup>.

Tabela 25: Evapotranspiração por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal

<i>ID</i>	<i>Uso/tipo de solo e vegetação</i>	<i>E (mm.ano<sup>-1</sup>)</i>
1	Argissolos/caatinga	791,74
2	Litossolos/caatinga	776,45
3	Cambissolos/caatinga	771,47
4	Argissolos/atividade agrícola	838,21
5	Luvisolos/atividade agrícola	787,27
6	Litolitossolo/atividade agrícola	746,32
7	Água	883,28

Geralmente, há uma tendência para que a vegetação de maior porte associada a solos com maior profundidade conduza às maiores taxas de evapotranspiração (RIBEIRO NETO, 2006). Porém, para a bacia do rio Piancó foi observado que a profundidade dos solos pouco influenciou, diferentemente ao observado pelo referido autor na aplicação do MGB-IPH ao rio madeira (floresta amazônica). Pois, HRUs com solos argissolos e com cobertura vegetal do tipo caatinga, que, teoricamente, deveriam apresentar total de água evapotranspirada anual superior às HRUs de mesmo tipo de solo e com atividade agrícola, não respeitaram tal regra. E vale salientar que, na presente pesquisa, as HRUs que apresentaram o mesmo tipo de solo receberam o parâmetro de capacidade de armazenamento de água exatamente iguais, independentemente do tipo de uso do solo ou vegetação, ou seja, o argissolos/caatinga e o argissolos/atividade agrícola tem a mesma capacidade de armazenamento de água, ou o mesmo  $W_m$ .

Portanto, pode-se concluir que os parâmetros fixos (albedo, IAF, altura das árvores, resistência superficial) estão atuando sobre cada HRU com mesmo tipo de solo e fazendo com que eles apresentem valores diferentes entre si.

Em termos de qual HRU resultou em mais evapotranspiração, observa-se que o HRU com solo tipo Argissolos e vegetação caatinga contribui em 1,97% a mais que HRU Litossolos/caatinga e 2,56% que o HRU 3. O HRU Litossolos/caatinga resultou em evapotranspiração de 0,64 % a mais que a HRU Cambissolos/caatinga. Dessa forma, percebe-se que, em relação aos HRUs com solos argissolos, litossolos e cambissolos e vegetação caatinga, o tipo de solo está influenciando mais a evapotranspiração, pois apresentam a mesma composição vegetal, mas variação nos valores de evapotranspiração,

Já em relação às HRUs com solo Argissolos, Luvisolos e Litolitossolo, ambos com uso agrícola, observa-se que o HRU Argissolos/atividade agrícola evapotranspirou 6,47 % a mais para que o HRU Luvisolos/atividade agrícola e 10,96% em relação ao HRU Litolitossolo/atividade agrícola. O HRU Luvisolos/atividade agrícola apresenta taxas de

evapotranspiração superior ao HRU Litolitossolo/atividade agrícola em 5,2 %. O HRU Argissolos/caatinga e Argissolos/atividade agrícola apresentam o mesmo tipo de solo, mas uso do solo e vegetação diferentes, o HRU com uso agrícola apresentou maior taxa de evapotranspiração, e em relação ao HRU com vegetação caatinga, evapotranspirando 5,5% a mais.

Em termos de evapotranspiração real a nível diário, observa-se que o MGB-IPH apresentou média de 2 mm para a bacia do rio Piancó. Folhes e Soares (2009) verificaram, para a região semiárida cearense, com estimativa de sensoriamento remoto (SIG) e pesquisa de campo, que a evapotranspiração média diária para o período de 24 de outubro de 2005 a 08 de agosto de 2006 é de 3,7 mm.

Bezerra (2013) verificou, para a região semiárida do Rio Grande do Norte, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, utilizando SIG e dados observados de temperatura do ar e precipitação, que área de solos expostos apresentaram taxas de evapotranspiração menores que  $1,0 \text{ mm, dia}^{-1}$ , enquanto que a vegetação nativa (caatinga muito rala e sem folhas) apresentou taxa que variou de  $1,0$  a  $3,0 \text{ mm, dia}^{-1}$ . A vegetação caatinga mais densa apresentou valores que variaram de  $3,0$  a  $5,0 \text{ mm, dia}^{-1}$ . Os valores acima de  $5 \text{ mm, dia}^{-1}$  representam área de superfície líquida (reservatório).

Silva et al. (2012) encontraram taxas de evapotranspiração de referência diária (ET<sub>o</sub>), para o perímetro irrigado de São Gonçalo – PB, com auxílio de sensoriamento remoto (SIG), que esteve entre 5,4 e 6,1 mm, em 14 de setembro e 19 de dezembro de 2008, respectivamente. Nas áreas irrigadas, prevaleceram valores maiores que 3 mm e, nas áreas de sequeiro e ocupadas com habitações humanas, foram observados valores entre 0 e 2 mm.

Apesar do presente estudo não ter feito pesquisa de campo para definir os detalhes específicos sobre a característica do tipo de vegetação, ou seja, se é caatinga rala ou densa, percebe-se que os valores obtidos pelo MGB-IPH estão semelhantes aos encontrados por Silva et al. (2012). E que, de acordo com os valores obtidos pelo modelo hidrológico e com valores obtidos pelo referido autor, a vegetação da bacia do rio Piancó apresenta taxa de evapotranspiração equivalente à caatinga muito rala,

A figura 38 mostra a variação da evapotranspiração real calculada pelo MGB-IPH para o HRU Argissolos/caatinga ( $791,74 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) e para o HRU Argissolos/atividade agrícola ( $838,21 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) para a célula 90 (coordenadas geográficas  $-37,973407^\circ \text{ L}$  e  $-7,722406^\circ \text{ S}$ ). Percebe-se que existe uma diferença de evapotranspiração, comparando uma HRU com a outra. E que, assim como a evapotranspiração, houve um teor maior de umidade no HRU Argissolos/atividade agrícola (figura 40b), o que também pode ser visto na Tabela 26.

Pode-se observar que a umidade diária variou de 7cm a 58cm para o HRU argissolos/caatinga (Figura 40a), e 7cm a 72cm para HRU com argissolos/atividade agrícola (Figura 40b). A evapotranspiração diária variou de 0 mm a 11 mm no HRU argissolos/caatinga. Para o HRU argissolos/atividade agrícola, observa-se variação de taxa de evapotranspiração foi inferior, 0 mm a 6,7 mm, diferentemente do que é mostrado na Tabela 25. No entanto, é necessário ressaltar que tais valores referem-se a apenas uma célula da grade da bacia, mas que representa comportamento padrão em relação às demais células.

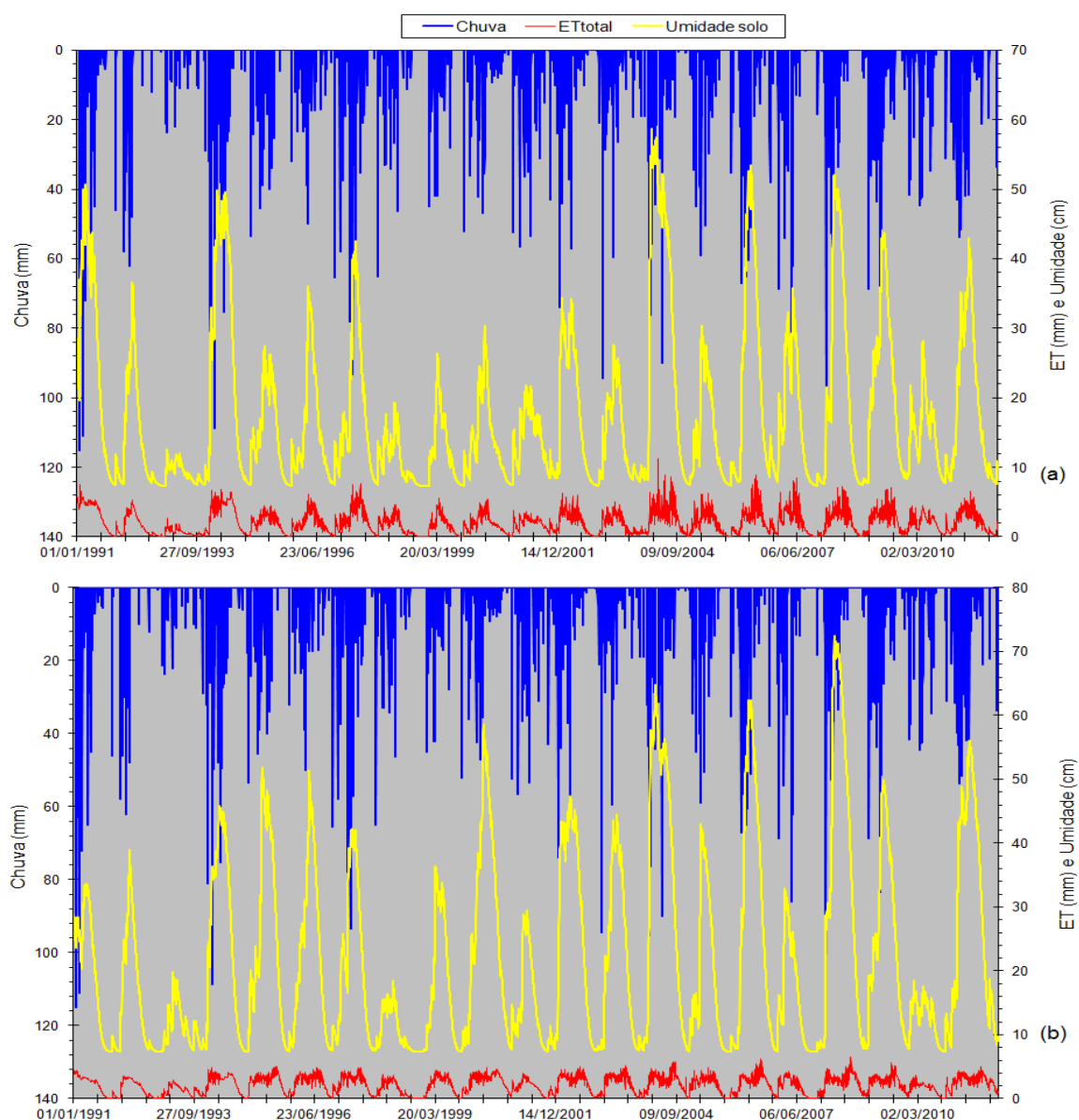


Figura 38: Evapotranspiração e umidade diárias calculadas pelo MGB-IPH paraHRU (a) HRU do tipo argissolos/caatinga e para (b) HRU do tipo Argissolos/atividade agrícola para a célula 90



A figura 39 mostra a evapotranspiração média mensal espacialmente sobre a bacia do rio Piancó. Observa-se que as maiores taxas de evapotranspiração ocorrem conforme o período chuvoso da bacia, que tem início em janeiro, e se estende até o mês de maio.

Março, abril e maio são os meses que apresentam maiores taxas de evapotranspiração real. Em resposta ao acúmulo da precipitação pluviométrica, o mês de junho e julho ainda apresentam uma taxa considerável de evapotranspiração. Os meses de setembro a novembro apresentam as menores taxas e no mês de dezembro ocorre um leve aumento, tal qual a variação da precipitação ao longo do ano, como comentado anteriormente.

Percebe-se que a região central da bacia, nos meses de março a junho obteve valores maiores de ET real. A região central da bacia apresenta solo litossolos e com vegetação caatinga. Tal HRU não é a que apresenta maior média e, também, maiores valores mínimos e máximos de evapotranspiração (Tabela 26). Portanto, pode-se afirmar que a profundidade do solo e altura da vegetação não são fatores que explicam a variabilidade da evapotranspiração para bacia do rio Piancó. E que tal comportamento só ocorre, de fato, devido à distribuição da precipitação pluviométrica ser maior na região central da bacia no período chuvoso.

Tabela 26: valores mínimo e máximo de evapotranspiração real nas HRUs

<i>HRU</i>	<i>Mínimo (mm)</i>	<i>Máximo (mm)</i>	<i>Média (mm.ano<sup>-1</sup>)</i>
Argissolos/caatinga	713,63	858,86	791,74
Litosossolos/caatinga	650,74	836,69	776,45
Cambissolos/caatinga	732,64	805,20	771,47
Argissolos/atividade agrícola	763,93	906,66	838,21
Luvisolos/atividade agrícola	760,56	858,86	787,27
Litolitossolo/atividade agrícola	648,94	1020,95	746,32
Água	746,46	1020,95	883,28

É possível notar que no período de estiagem (Iniciando em julho e terminando em dezembro) a região central apresenta valores baixos de evapotranspiração. No mês de julho as maiores taxas de evapotranspiração são encontradas na porção norte e sudeste da bacia, e de agosto a novembro, embora em menor proporção, apenas na região norte.

No período analisado (1970 a 2011) a bacia do rio Piancó recebeu uma contribuição média anual de 836,59mm de precipitação e evaporou 783,17mm, sendo evapotranspirado 6,4% da chuva total anual. Valores semelhantes foram encontrados por Fontes et al. (2002) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, localizada no semiárido da Bahia.

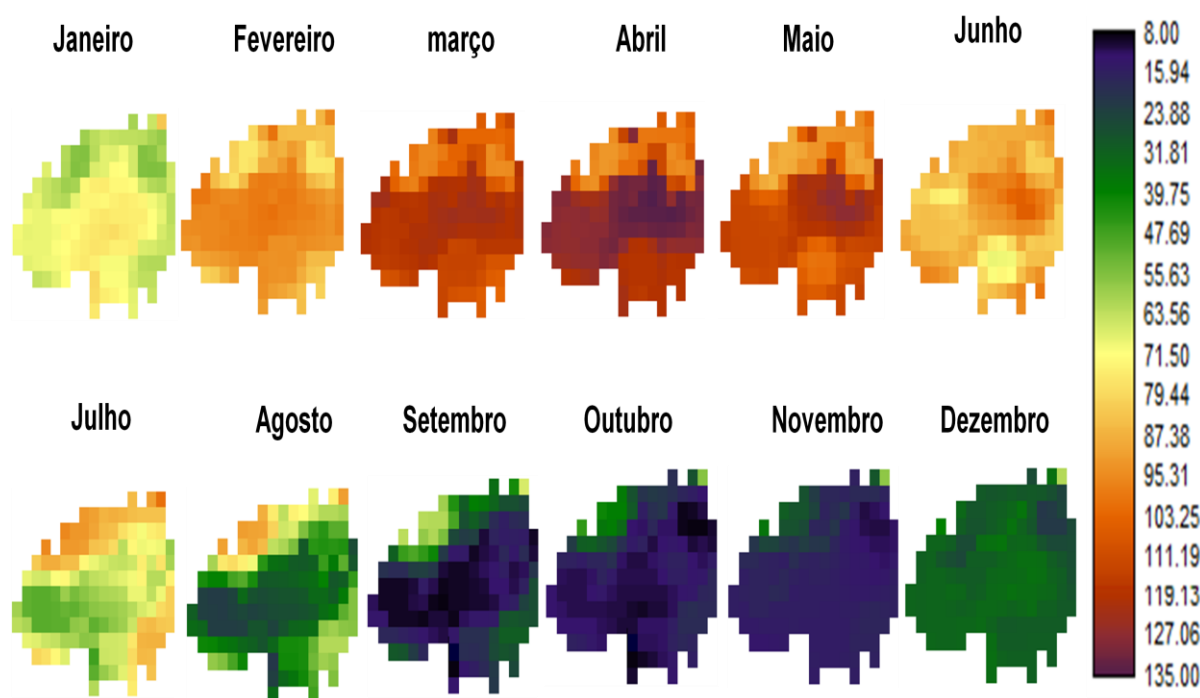


Figura 39: Evapotranspiração espaço-temporal média mensal (mm) na bacia do rio Piancó,

#### 4.2.2 Umidade do solo

A umidade do solo refere-se ao teor de água que o solo pode acumular, Sabe-se que solos de maiores profundidades e com vegetação densa tendem a apresentar maiores índices de umidade. A tabela 27 mostra a umidade do solo para cada HRU. Para a bacia do rio Piancó, o teor de umidade calculada pelo MGB-IPH para os diferentes tipos de unidades de resposta hidrológicas (HRU) variou de 111,18 a 222,55 mm. Assim como na evapotranspiração, o HRU com solo argissolos/caatinga apresentou teor menor de umidade do que o HRU argissolos/atividade agrícola. O HRU litossolos/atividade agrícola também apresentou maior teor de umidade que HRU litossolos/caatinga.

Assim como na evapotranspiração, percebe-se que os parâmetros fixos (albedo, IAF, altura das árvores, resistência superficial) estão atuando sobre cada HRU com mesmo tipo de solo e fazendo com que eles apresentem valores diferentes entre si. Por exemplo, a HRU Litossolos/caatinga e Litolitossolo/atividade agrícola apresentam a mesma capacidade de armazenamento de água no solo, ou mesmo  $W_m$ , no entanto o teor de umidade foi maior na HRU com uso agrícola. Dessa forma, comparando HRUs com mesmo tipo de solo e uso diferente, percebe-se que os parâmetros fixos do modelo MGB-IPH atuam de tal forma a

diferençar o comportamento da vegetação. Mas comparando HRUs com solos diferentes e mesmo vegetação, observa-se que a profundidade do solo influencia no teor de umidade, assim, solo com maior profundidade apresenta maior teor de umidade, o mesmo ocorrendo para HRUs com solos diferentes, mas com uso agrícola. Em termos de qual HRU apresentou mais para umidade, percebe-se que o HRU Argissolos/caatinga resultou em 32 % a mais que HRU Litossolos/caatinga e 8,7% que o HRU Cambissolos/caatinga, O HRU Cambissolos/caatinga obteve 34% a mais que o HRU Litossolos/caatinga.

Tabela 27: Umidade por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal

<i>ID</i>	<i>Uso/tipo de solo e vegetação</i>	<i>Umidade (mm.ano)</i>
1	Argissolos/caatinga	171,05
2	Litossolos/caatinga	116,18
3	Cambissolos/caatinga	156,17
4	Argissolos/atividade agrícola	222,54
5	Luvissolos/atividade agrícola	163,49
6	Litolitossolo/atividade agrícola	133,92
7	Água	0

Santos et al. (2011) para bacia do rio Ipanema, localizada no semiárido pernambucano, observaram que a presença de vegetação ou de impedimentos ao livre escoamento no solo influenciou na contenção do escoamento superficial e proporcionou o incremento ou aumento de umidade. O que corrobora para a ideia de que solos com presença de vegetação densa apresenta maior teor de umidade. De acordo com os resultados obtidos pelos referidos autores, os solos exposto apresenta menor teor de umidade. Os autores observaram, ainda, que solos expostos tendem a ganhar umidade mais lentamente. Solos com cobertura natural, após umidificado, apresentam perda de umidade mais lento que solos com cobertura vegetal morta e solos expostos.

A figura 40 apresenta a umidade média anual calculada pelo MGB-IPH para todo o período simulado. Percebe-se que o modelo apresentou comportamento esperado, pois os maiores teores de umidade estão de acordo à precipitação pluviométrica. O período em estudo apresentou variação do teor de umidade de 71 mm a 254 mm. A umidade média anual é de 141,61 mm, ou seja, representa cerca de 17% da precipitação média anual, que é de 836,59 mm.

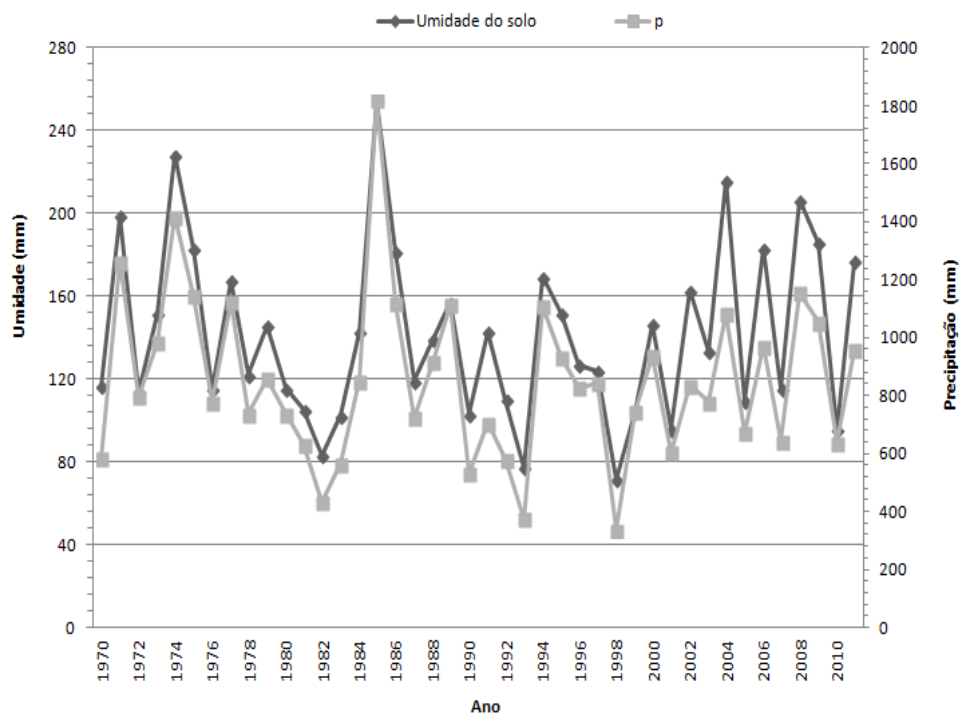


Figura 40: Umidade média anual na bacia do rio Piancó

A figura 41 mostra a umidade média mensal para bacia do rio piancó. Observa-se que a varia seguindo o padrão de precipitação. Os maiores teores de umidade ocorrem nos meses de março a julho. Apesar do período chuvoso da bacia ser de janeiro a maio, a geração da umidade pelo MGB-IPH ocorre em resposta à quantidade de precipitação, ou seja, chove no mês de fevereiro e após um dado tempo há um incremento do teor de umidade no solo.

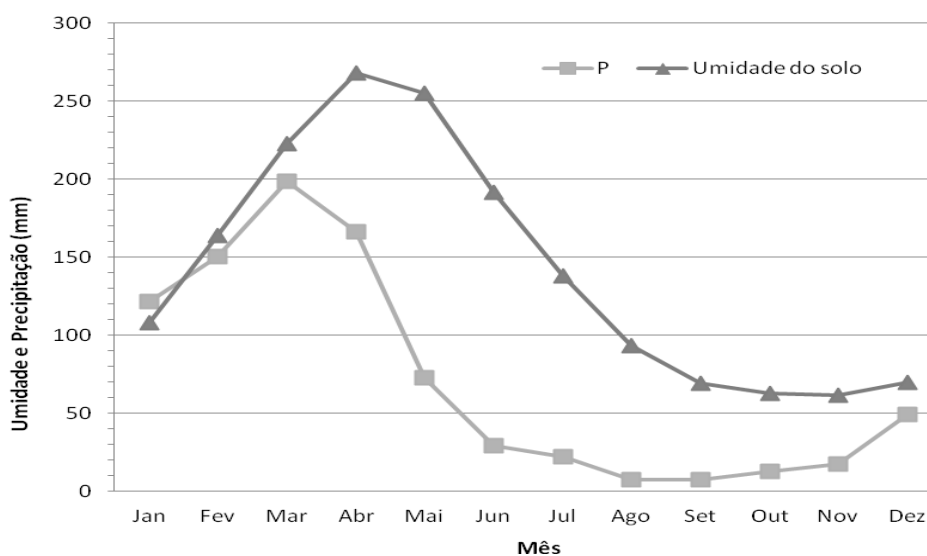


Figura 41: Umidade média mensal na bacia do rio Piancó

No mês de janeiro a precipitação pluviométrica média mensal foi de 121 mm e o teor de umidade médio para o mesmo mês foi de 107 mm, 88% do precipitado. Para o mês de agosto, período de estiagem, precipitou em média 7 mm e a umidade calculada pelo MGB-IPH foi em média de 93 mm, sendo o teor de umidade foi superior a quantidade de chuva para o referido mês, assim como nos demais meses que compreende o período de estiagem.

Santos et al. (2011) observaram, utilizando o método de reflectometria no domínio de tempo e monitoramento de campo, o mesmo comportamento em relação à perda de água do solo para bacia do rio Ipanema, localizado no semiárido pernambucano. Os autores constataram que o teor de umidade no solo também tende a diminuir à medida que a precipitação pluviométrica diminui.

A figura 42 mostra a variação da umidade média mensal espacialmente para a bacia do rio Piancó. Percebe-se que os maiores teores de umidade ocorrem conforme o período chuvoso da bacia. Os meses de março a junho são os que apresentam maiores teores de umidade. A partir do mês de junho, início do período de estiagem, os teores de umidade começam a diminuir, alcançados valores baixos de setembro a dezembro.

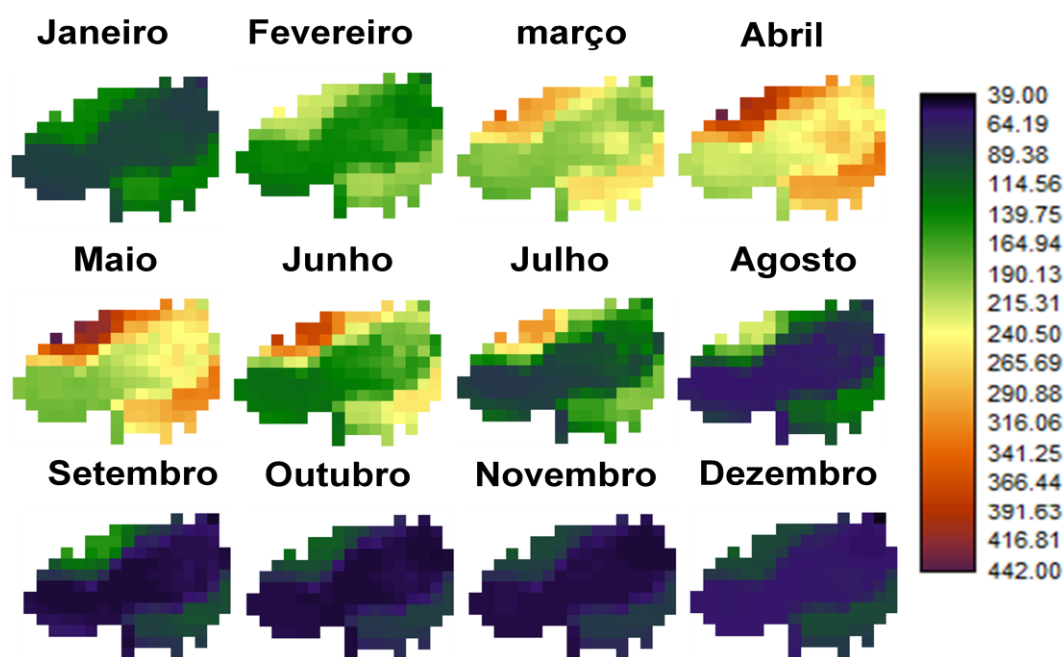


Figura 42: Variação espaço-temporal mensal de umidade na bacia hidrográfica do rio Piancó (mm)

Ao contrário da evapotranspiração, os maiores teores de umidade são encontrados na porção norte e sudeste noroeste da bacia. Tais regiões são formadas por HRUs que

apresentam solos de maiores profundidades e, conseqüentemente, maior capacidade de armazenamento de água. Dessa forma, diferentemente do processo de evapotranspiração, para a bacia do rio Piancó, a umidade calculada ocorre conforme a profundidade do solo,

### 4.2.3 Geração de escoamento

Pode-se observar que o modelo calculou de forma satisfatória o escoamento para a bacia do Piancó. Como esperado, o escoamento superficial (Esub) foi superior ao escoamento intermediário (Eint) e ao escoamento de base (Ebas), mostrando que o MGB-IPH consegue calcular o escoamento de forma satisfatória, independentemente dos aspectos físicos e climáticos da bacia hidrográfica.

Esse é o tipo de comportamento esperado para regiões semiáridas, onde há a ocorrência de solos de pouca profundidade, o que facilita a geração de escoamento superficial. Pode-se observar que o escoamento de base variou pouco ao longo do tempo e alcançou valores que variam de 0,03 a 0,16 mm (Figura 43).

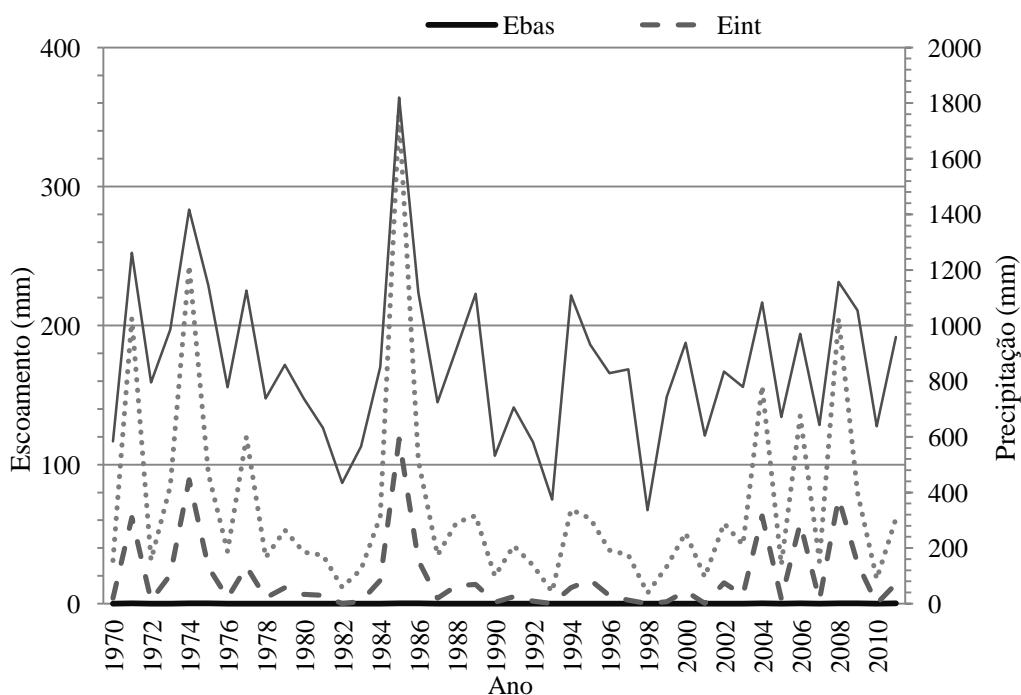


Figura 43: Escoamento médio anual (Esub = superficial; Eint = intermediário; Ebas = de base) calculado pelo MGB-IPH para bacia do rio Piancó, além da precipitação (P)

A tabela 28 mostra a quantidade de escoamento por HRU. Observa-se que a quantidade de água escoada foi maior em solos utilizados para manejo agrícola. Os solos do

tipo litossolo obtiveram maior geração de escoamento superficial, o que é esperado, já que, dentre os tipos de solo encontrados na bacia, é o que apresenta menor profundidade e, conseqüentemente, pouca capacidade de armazenamento de água, gerando, assim, maior quantidade de escoamento.

Tabela 28: Escoamento médio por HRU de tipo de solo e cobertura vegetal

<i>ID</i>	<i>Uso/tipo de solo e vegetação</i>	<i>Esup (mm)</i>	<i>Eint (mm)</i>	<i>Ebas (mm)</i>
1	Argissolos/caatinga	44,4	8,61	0,076
2	Litossolos/caatinga	69,5	17,92	0,082
3	Cambissolos/caatinga	45,1	8,06	0,075
4	Argissolos/atividade agrícola	65,7	23,27	0,100
5	Luvissolos/atividade agrícola	98,7	33,88	0,103
6	Litolitossolo/atividade agrícola	112,9	34,55	0,097
7	Água	197,1	-	-

Para HRUs com o mesmo tipo de vegetação ou uso agrícola, percebe-se que o tipo de solo influenciou na quantidade de escoamento, assim observa-se que solos de menor profundidade geraram mais escoamento superficial. Dessa forma, o caso do HRU Litossolos/caatinga que gerou 36% mais escoamento que o HRU Argissolos/caatinga e 35 % que o Cambissolos/caatinga. O HRU Cambissolos/caatinga gerou 1,6% mais escoamento que a HRU Argissolos/caatinga.

Já para HRUs com uso agrícola observa-se que o HRU Litolitossolo/atividade agrícola foi que apresentou maior escoamento superficial, gerando 12 % e 41% mais escoamento que o HRU Argissolos/atividade agrícola e Luvissolos/atividade agrícola, respectivamente.

O escoamento intermediário segue mais ou menos a mesma linha do escoamento superficial, mostrando que solos de menor profundidade apresentaram maior escoamento sub-superficial. Por exemplo, o HRU Litossolos/caatinga gerou 55% mais escoamento que o HRU Litossolos/caatinga e 51% a mais que HRU Argissolos/caatinga.

O mesmo ocorrendo para o escoamento de base, embora para este os valores tenha variado pouco de HRU para HRU, O HRU Litossolos/caatinga gerou por volta de 2% a mais escoamento que o HRU Argissolos/caatinga e Litossolos/caatinga. No entanto, os solos de menor profundidade deveriam gerar menos escoamento de base que solos mais profundos, pois a quantidade de água que um solo raso pode acumular é limitada.

De maneira geral, percebe-se que o modelo MGB-IPH, para HRUs com vegetação caatinga, considerou que o solo com menor capacidade de armazenamento de água (Wm)

proporcionou um maior valor escoamento, comportamento esperado para o escoamento superficial, mas não tanto para o escoamento sub-superficial e de base, pois para que haja tais tipos de escoamento torna-se necessário a ocorrência de solos profundos, devido a sua maior capacidade de armazenar água. Nesse sentido, o modelo não apresentou um comportamento satisfatório para o escoamento sub-superficial e de base.

Araujo Neto et al. (2013) encontraram comportamento diferente para duas bacias experimentais localizada no semiárido cearense. Um das bacias foi mantida com vegetação natural (caatinga) e a outra teve a vegetação realada (árvores com diâmetro inferior a 10 cm que foram eliminadas). O referido estudo constatou que a bacia com vegetação nativa gerou mais escoamento, e que em 198 eventos chuvosos, 75 foram os eventos que geraram escoamento. Na bacia com vegetação raleada a quantidade de eventos com o escoamento foi menor, de 198 eventos chuvosos, 62 geraram escoamento.

Outro dado importante constatado pelos referidos autores é que, em total de chuva precipitada de 1011,4 mm foram gerados 104,2 mm de escoamento na vegetação nativa, ou seja, 10,3% da chuva. Para a vegetação raleada, para o mesmo total de chuva precipitada foi gerado escoamento de 73,6 mm (7,3% da chuva). A explicação para isso, segundo os autores, é que o raleamento da vegetação fez com a luz solar penetrasse mais facilmente entre a vegetação raleada, fazendo com que o banco de semente da bacia pudesse desenvolver e captar mais água, assim, a água foi mais facilmente infiltrada no solo,

Santos et al. (2011) desenvolveram um estudo na bacia experimental de São João do Cariri – PB e observaram que o escoamento superficial na cobertura vegetal do tipo caatinga é menor do que em áreas com cobertura desmatada. Os autores ainda observaram que em solo desmatado a taxa de infiltração é menor que o escoamento superficial,

Para a bacia do rio Piancó, percebe-se que todo escoamento calculado pelo MGB-IPH ocorre em resposta à precipitação pluviométrica observada para o período em estudo (Figura 45). Pode-se observar que quando há uma precipitação média anual de 1800 mm gera-se um escoamento superficial de pouco mais de 350 mm (19 % do total precipitado) e que quando ocorre precipitação média anual por volta de 1000 a 1290 mm geram um escoamento superficial por volta de 200 mm (16,7 e 20 % do total precipitado).

A figura 44 mostra a variação temporal do escoamento superficial calculado pelo MBG-IPH para bacia do rio Piancó. Pode-se observar que o escoamento superficial segue o período chuvoso da bacia (janeiro a maio), sendo março e abril os meses com quantidade maior de geração de escoamento. A partir do mês de maio, a geração de escoamento começa a diminuir e atinge valores reduzidos entre junho a dezembro.



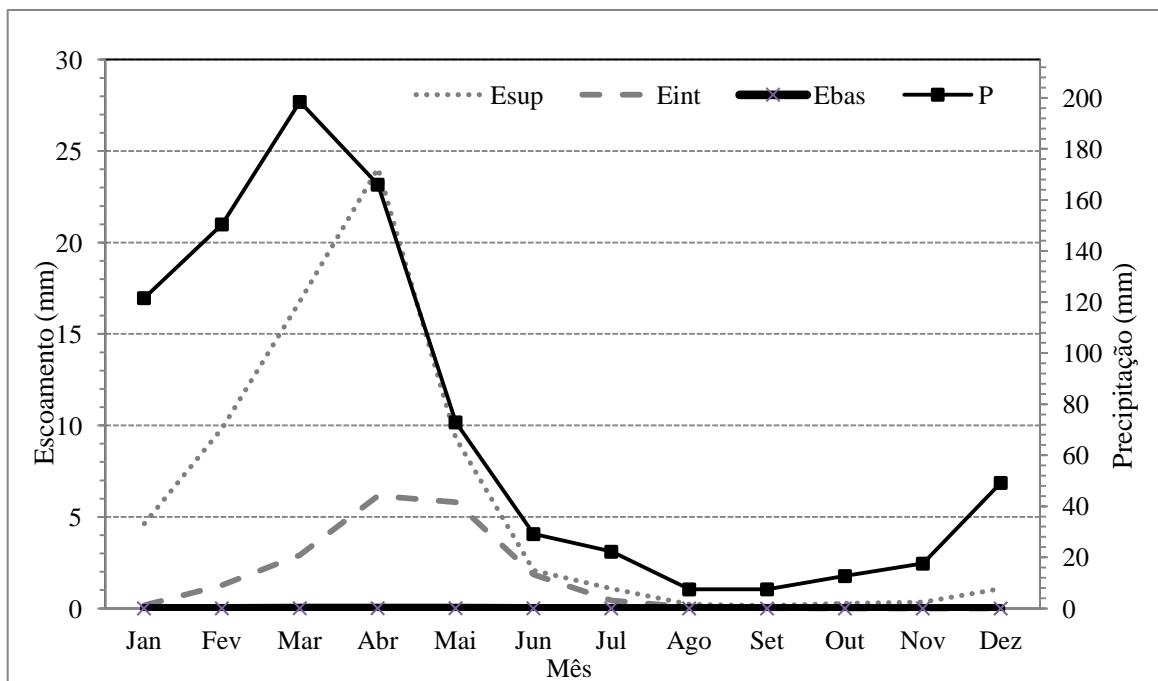


Figura 44: Escoamento médio mensal calculado pelo MGB-IPH e precipitação observada para bacia do rio Piancó

O escoamento superficial mensal variou de 0,1 mm a 24 mm. No mês de janeiro houve precipitação média de 121mm gerando um escoamento de 4,6 mm, o que equivale a 3,8% do precipitado. O mês de março foi o que apresentou maior precipitação média, 198 mm, e foi gerado um escoamento superficial de 16 mm, sendo 8% do precipitado. No entanto, para o mês de abril (166 mm) foi observado uma precipitação média inferior ao mês março, mas a quantidade de água escoada superficialmente foi superior, sendo gerados 24 mm de escoamento. O escoamento intermediário e de base apresentam valores reduzidos no mês de agosto e chega a zero de setembro a início de novembro, mesmo ocorrendo pequenos volumes de precipitação pluviométrica.

Observa-se que o maior pico de escoamento superficial ocorre com uma defasagem de um mês em relação à precipitação média, isso ocorre devido à umidificação ou saturação de água no solo, como o escoamento no modelo MGB-IPH é gerado por excesso de saturação de água no solo, leva-se um tempo até que todo solo esteja saturado, gerando, assim, escoamento.

## 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaços-temporais dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB.

De maneira geral, pode-se concluir que o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH representou satisfatoriamente o regime de vazão da bacia hidrográfica do rio Piancó, apresentando hidrograma de vazão com melhor ajuste para passo de tempo a nível mensal do que a nível diário. As funções objetivo apresentaram valores semelhantes às demais aplicações do modelo, com exceção do Nslog, não sendo possível melhorar tal estatística ajustando os parâmetros calibráveis.

Ainda sobre as funções objetivo, foi constatado que as estatísticas a nível mensal apresentam valores superiores que a nível diário, como esperado. Apesar do normalized benchmark efficiency (BE) e o coeficiente de eficiência volumétrica (VE) não terem sido utilizados para calibrar o modelo, apresentaram estatística satisfatória para o modelo. O BE apresentou valor semelhante a outra aplicação do MGB-IPH.

Pôde-se perceber que a parametrização do modelo foi capaz de representar satisfatoriamente os processos físicos e hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Piancó. Apesar dos parâmetros calibráveis terem sido generalizados nesta pesquisa, ou seja, HRUs com mesmo tipo de solo apresentam o mesmo valor de parâmetros calibráveis, foi possível observar que os parâmetros fixos influenciaram os processos hidrológicos, fazendo com que HRU com vegetação tipo caatinga apresentasse comportamento diferente de HRU com atividade agrícola, algo esperado.

Já em relação às HRUs que apresentam vegetação tipo caatinga mas tipos de solos diferentes, foi observado que o parâmetro calibrável  $W_m$  (capacidade de armazenamento de água no solo) faz com que o modelo represente de forma diferente cada HRU, o mesmo ocorrendo para HRUs com atividade agrícolas mas tipos de solos diferentes.

A bacia hidrográfica do rio Piancó apresenta bom monitoramento de dados, o que facilitou o estudo. As maiores dificuldades encontradas foram relacionadas as definições dos parâmetros fixos e calibráveis, já que o modelo foi pouco aplicado a bacias hidrográficas de regiões semiáridas.

A partir das análises espaço-temporais dos processos hidrológicos foi possível perceber que os processos de evapotranspiração calculado pelo modelo MGB-IPH ocorrem em resposta a precipitação pluviométrica.

Foi observado que a região central da bacia hidrográfica, nos meses de janeiro a junho (estação chuvosa da bacia vai de janeiro a março) apresenta valores maiores de ETr. No período de estiagem (iniciando em junho e terminando em dezembro), a região central da bacia apresenta valores baixos de evapotranspiração, com exceção do mês de junho. No mês de julho as maiores taxas de evapotranspiração são encontradas na porção norte e sudeste da bacia, e de agosto a novembro, embora em menor proporção, apenas na região norte. Nesse sentido, pode-se concluir que tal comportamento ocorre devido à distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica.

Já em relação à umidade do solo simulada pelo modelo MGB-IPH, foi observado que os maiores teores de umidade ocorrem conforme o período chuvoso da bacia. Os meses de março a junho são os que apresentam maiores teores de umidade. A partir do mês de junho, início do período de estiagem, os teores de umidade começam a diminuir, alcançando valores baixos de setembro a dezembro.

Ao contrário da evapotranspiração, os maiores teores de umidade são encontrados na porção norte e sudeste noroeste da bacia. Tais regiões são formadas por HRUs que apresentam solos de maiores profundidades e, conseqüentemente, maior capacidade de armazenamento de água. Dessa forma, para a bacia do rio Piancó, conclui-se que a umidade calculada ocorre conforme a profundidade do solo.

Em relação ao escoamento calculado, foi observado que a quantidade de água escoada foi maior em solos utilizados para manejo agrícola. As HRUs com solo tipo litossolos obtiveram maior geração de escoamento superficial. O modelo MGB-IPH considerou que os solos com menor capacidade de armazenamento de água ( $W_m$ ) também gerou mais escoamento sub-superficial e de base. Nesse sentido, conclui-se que o modelo não apresentou um comportamento satisfatório para o escoamento sub-superficial e de base.

De maneira geral, pode-se concluir que o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH mostra potencial para modelagem de bacias de características semiáridas.

## **5.2 Recomendações**

Para a bacia do rio Piancó, o coeficiente para o logaritmo das vazões (NSlog) apresentou valores bastantes inferiores as demais aplicações do modelo, variando de -0,34 a -

0,18 a nível diário (calibração e validação) e de -0,03 a 0,05 (calibração e validação), mostrando que NSlog penaliza bastante vazões abaixo de  $1\text{m}^3/\text{s}$ , não se constituindo, assim, em uma métrica adequada para regiões que apresente intermitência sazonalidade de vazão.

Dessa forma, seria interessante dar continuação à pesquisa tentando calibrar o modelo sem utilizar a função objetiva NSlog, pois desde o princípio da aplicação tal estatística apresentou valor negativo (valor inicial sem ajuste dos parâmetros foi por volta de -0,60) sendo necessário ajustar os parâmetros calibráveis repetidas vezes com o intuito de encontrar um valor mais semelhante às demais aplicações do modelo para tal métrica. Isso pode ter prejudicado um pouco a representação do regime da vazão e, ainda, reduzidos os valores de NS para a bacia do rio Piancó. Seria interessante, também, utilizar os coeficientes BE e VE para calibrar o modelo e analisar o nível de sensibilidade de cada métrica. Enfim, fica a recomendação de desenvolver pesquisas com o intuito de aprofundar o método de calibração multiobjetiva do modelo MGB-IPH para aplicação em bacias de rios intermitentes. Além disso, fazer com que a calibração automática possa encontrar o melhor ajuste possível para o modelo, mas dando atenção para processos físicos de cada HRU.

É necessário dar mais atenção a definição dos parâmetros fixos do modelo, pois existe uma carência de dados para a região semiárida. Nesse caso, torna-se oportuno desenvolver pesquisas de campo para levantar dados de resistência superficial e altura da vegetação, e/ou utilizar dados de sensoriamento remoto para definição dos dados de IAF e abelão, observando os seus comportamentos ao longo do ano. E, também, rodar o modelo de maneira que o comportamento dos parâmetros fixos possa variar de ano para ano.

Para a bacia do rio Piancó não foi adotado fazer modificações internas no modelo para que o mesmo fosse capaz de representar mais fielmente o regime de vazão da bacia do rio Piancó, assim como ocorreu em outra aplicação do MGB-IPH em uma bacia hidrográfica de clima semiárido, mas os resultados das pesquisas, em termos de estatísticas e hidrograma de vazão, foram semelhantes.

No entanto, seria importante que o modelo, como ressalta Ribeiro Neto et al. (2007), além de gerar escoamento por capacidade de armazenamento de água no solo, fosse capaz de gerar escoamento por excesso de infiltração, já que a capacidade de infiltração da água em solos de regiões semiáridas é característica marcante. Esta alteração pode aumentar os picos de vazões calculada pelo modelo, facilitando a representação de picos máximos de vazão, o que não foi possível entre o período de 1982 a 2011 para a bacia do rio Piancó, por exemplo. Além do mais, tal alteração pode melhorar a simulação do escoamento intermediário ou sub-superficial e de base.

O MGB-IPH considera, embora em maior proporção para o escoamento superficial, que todo escoamento é gerado a partir do momento em que o solo atinge sua capacidade máxima de armazenamento de água. No entanto, o modelo também considera que o escoamento sub-superficial é influenciado pela quantidade de água que solo pode acumular, pois a taxa de drenagem sub-superficial quando o solo está próximo da saturação é muito maior do que quando o solo está mais seco.

Nesse sentido, o solo que apresentar menor capacidade de armazenamento de água também tenderá a gerar mais escoamento sub-superficial que solos profundos, já que tem mais facilidade de atingir a capacidade limite de armazenamento.

Seria interessante, também, criar um parâmetro que possa limitar ou controlar a ocorrência do escoamento de base em solos rasos, pois foi observado que tipos de solos com menor capacidade de armazenamento de água gerou mais escoamento de base que solos profundos ou com maior  $W_m$ , quando na verdade deveria ser ao contrário ou talvez nem chegar a gerar tal tipo de escoamento. Talvez tal fato não tenha influência em relação a geração de vazões nulas, no entanto pode interferir na análise espaço-temporal dos processos hidrológicos. Por fim, seria oportuno desenvolver pesquisa de campo paralela a aplicação do modelo MGB-IPH para auxiliar nas análises dos comportamentos da evapotranspiração, umidade e escoamento, ou até mesmo utiliza-los como dados de entrada para o modelo, pois, assim como na presente pesquisa, muitas vezes torna-se necessário utilizar dados meteorológicos de estações localizada próximo a área de estudo. É certo que os dados meteorológicos não variam tanto ao longo do espaço, mas a simulação poderia apresentar melhor resultado utilizando dados de estações meteorológicas da própria bacia hidrográfica em estudo. Além disso, a pesquisa de campo poderia gerar dados para comparar com os resultados obtidos pelo modelo hidrológico.

Como o período de tempo analisado para a bacia hidrográfica do rio Piancó-PB é longo, o hidrograma de vazão não foi capaz de mostrar bem o regime de vazão de forma a comparar a vazão observada com a calculada. Nesse sentido, seria oportuno utilizar a curva de permanência de vazões pois permitire observar melhor o comportamento do regime de vazão da bacia hidrográfica. Além disso, pode-se utilizar alguma função objetivo com o intuito de calcular as diferenças entre as curvas de permanência de vazão observada e calculada.

Por fim, seria oportuno utilizar mapas de uso e ocupação do solo e vegetação mais atuais, ou, até mesmo, utilizar o modelo MGB-IPH para representar os processos espaço-temporais em relação a evolução do uso e ocupação do solo ao longo dos anos, para compreender o tamanho do impacto causado pela ocupação do solo sob o regime de vazão.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM. K. N.; COLLISCHONN. W. Análise dos impactos de mudança climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18. N. 3. 69-79. Jul/set 2013.

ALLASIA. D. G.; SILVA. B. C.; COLLISCHONN. W. TUCCI. C. E. M. Large basin simulation experience in South America. IAHS Publ. 303. 2006.

ANTONINO. A. C. D.; SAMPAIO. E. V. S. B.; DALL’OLIO. A.; SALCEDO. I. H. Balanço Hídrico em Solo com Cultivos de Subsistência no Semiárido do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.4. n.1. p.29-34. 2000.

ARAUJO. S. M. S. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos Rios Eletrônica- Revista Científica da FASETE. N. 5 dezembro de 2011.

ARAUJO NETO. J. R.. ANDRADE. E. M.; PALÁCIO. H. A. Q.; SANTOS. J. C. N.; LOBATO. F. A. O. Análise comparativa do escoamento superficial de microbacias experimentais em clima semiárido tropical. Water Resources and Irrigation Management. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas. BA. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande. PB. v.2. n.3. p.111-120. Sept.-Dec.. 2013.

BATISTA. A. L. F.. Modelos de séries temporais e redes neurais artificiais na previsão de vazão. Dissertação apresenta ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas. Universidade Federal de Lavras. Ano: 2009.

BAYER. D. M.; COLLISCHONN. W. Análise da sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças do uso da terra. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 18 n.3 – .165-179. Jul/Set 2013.

BAYER. D. M.; COLLISCHONN. W. Impacto do desmatamento e da precipitação na vazão do rio Ji-Parana. Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos. Bento Gonçalves. 2013.

BEZERRA. B. G.; SILVA. B. S.; FERREIRA. N. J. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DIÁRIA UTILIZANDO-SE IMAGENS DIGITAIS TM - LANDSAT 5. Revista Brasileira de Meteorologia. v.23. n.3. 305-317. 2008.

BEZERRA. H. N. Estimativa de Evapotranspiração Espacial em um Região Semiárida Utilizando Sensoriamento Remoto. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2013.

BRAVO. J. M. MGB-Auxi: Manual do usuário. Versão 1.0. Março/2008.

CHEN. J. M.; CHEN. X.; JU. W. GENG. X. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. Journal of Hydrology, 305, pág. 15–39 (2005).

COLLISCHONN. W. The MGB-IPH model for large-scale rainfall–runoff modelling. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques. 52(5) October 2007.

COLLISCHONN. W. Simulação hidrológica de grandes bacias. Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. Ano: 2001.

COLLISCHONN. W; TUCCI. C. M. Simulação Hidrológica de Grande Bacias. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 16 n1. 95 – 100. Jan/Mar 2001.

COLLISCHONN. B.; PAIVA. R. C. D.; COLLISCHONN. W.; MEIRELLES. F. S. C. SCHETTINI. E. B. C.; FAN. F. M. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-SP. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 16. N. 4. 119 – 133. Out/Des 2011.

CRISS. R. E.; WINSTON. W. E. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. HYDROLOGICAL PROCESSES. Hydrol. Process. 22. 2723–2725 (2008).

DEHOTION. J.; BRAUD. I. Which spatial discretization for which distributed hydrological model? Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.. 4. 777–829. 2007.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de Classificação de solos. 2º Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 2006.

ESCARIÃO. R. D.. MONTENEGRO. S. M. G. L.. AZEVEDO. J. R. G.. N. A. R.. Influência do modelo hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em Região Semiárida. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.3 -. 81-91. Jul/Set 2012.

FAN. F. M.; COLLISCHONN. W. MELLER. A.; BOTELHO. L. C. M. Ensemble streamflow forecasting experiments in tropical basin: The São Francisco river case study. Joirnal of Hidrology 519. 2906 – 2919. 2014.

FERNANDES. R. O. Avaliação de simulações de precipitação e vazão por um modelo atmosférico em bacias do semiárido brasileiro. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. 2009

FOLHES. M. T.; RENNÓ. C. D.; SOARES. J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. Agricultural Water Management 96 1398–1408. 2009.

FONTES. A. S.; OLIVEIRA. J. I. R.; MEDEIROS. Y. D. P. A Evaporação em Açudes no Semiárido nordestino do Brasil e a Gestão das Águas. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2003.

FREITAS. M. A. S.. Modelos diários de chuva-vazão em bacia do semiárido brasileiro. Revista Tecnológica/ Fortaleza/ N° 15/P. 31 – 38/ Dez. 1994.

GAMA. W. M. Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraíba do meio (AL/PE). Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas como



requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió 2011.

GETIRANA. N. V.; BONNET; M.; CALMANT. S.; ROUX. E.; ROTUNNO FILHO. O. C. MANSUR. W. J. Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall–runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology* 379 205–219. 2009.

GETIRANA, A, C, V.; ROUNNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico com Observações in Situ, Altimetria e Gravimetria Espaciais. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos – Volume 16 n.1 jan/mar, 29-45, 2011.*

HUGHES. D. A. Hydrological models: mathematics or science? *HYDROLOGICAL PROCESSES*. *Hydrol. Process.* 24. 2199–2201 (2010)

JIMÉNEZ. K. Q. Modelagem Hidrológica com Uso da Estimativa de Chuva por Sensoriamento Remoto. Dissertação Submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre. Maio 2011.

KAMPF. S. K.; BURGESS. S. J. VA framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models *WATER RESOURCES RESEARCH*. VOL. 43. W05423. doi:10.1029/2006WR005370. 2007.

LANNA, A.E. (1997). “MODHAC - Modelo Hidrológico Auto-Calibrável”. IPH/UFRGS.

LARENTS. D. G. Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-Antas –RS. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ano: 2004.

LATUF. M. O. Modelagem hidrológica aplicada a modelagem dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Acre. Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Geografia da FCT/UNESP. Presidente Prudente. Ano: 2011.

LIMA SOBRINHO M. A. Avaliação dos efeitos da disponibilidade espacial e temporal dos dados hidrológicos sobre a calibração de um modelo distribuído na bacia do rio Ipanema. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas. como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió. 2012.

MACEDO. M. J. H.. Aplicações de rede neurais artificiais e satélites TRMM na modelagem chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu – BA. Tese (doutorado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade de Campina Grande – UFCG. 2013.

MINE. M. R. M.. Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos hídricos e ambiental da Universidade Federal do Paraná. Ano: 2005.

MOLLE. F. Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento. Recife: SUDENE. 1994.

MONTE-MOR. R. C. A. Análise de processos hidrológicos em bacia de rios intermitentes no semiárido. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento. Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Ano: 2012.

MONTENEGRO. S.; RAGAB. R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. Journal of Hydrology 434–435 (2012) 55–68.

MELLER. A.; COLLISCHONN. W.; FAN. D.;BUARQUE. D. C.; PAIVA. R. C. D.; DIAS. P. L. S.; MOREIRA. D. S. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. RBRH – Revista brasileira de recursos hídricos. Volume 19. Nº 3. 33-49. Jul/set 2014.

PEREIRA. M.; KAYSER. R. B.; COLLISCHONN. W. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. REGA – Vol. 9. no. 2. p. 21-33. jul./dez. 2012.

PAZ. A. R.; Simulação Hidrológica de Rios com Grandes Planícies de Inundações. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre. RS. Janeiro de 2010.

PAZ. A. R.. BUARQUE. D. C.. COLLISCHONN. W.. VICTORIA. D. C.. ANDRADE. R. G.. Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011.

PAZ. A. R.. COLLISCHONN. W.. TUCCI. C. E. M. Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2005;

PAZ. A.R.; BUARQUE. D.C.; COLLISCHONN. W. (2008). “Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos” in Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos. ABRH. Rio de Janeiro (RJ).

Relatório Parcial: RP-03 – Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu. Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu. IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S. Abril/2013.

RIBEIRO NETO. A.; SILVA. R. C. V.; COLLISCHONN. W.; TUCCI. C. E.M. Simulação na Bacia Amazônica com Dados Limitados: Rio Madeira. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 13 n.3. 47-58. Jul/Set 2008.

RIBEIRO NETO. A.; BARBOSA. R. I.; FILHO. P. F. A.; CIRILO. J. A. Uso do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) em regiões Semiáridas. II Conferência Internacional sobre Água em Regiões Áridas e Semiáridas. 2007.

RODRIGUES. J. O.; ANDRADE. E. M.; MENDONÇA. L. A. R.; ARAÚJO. J. C.; PALÁCIO. H. A. Q.; ARAÚJO. E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região

semiárida em função do uso do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17. n.3. p.312–318. 2013.

SALDANHA. C. B.; TUCCI. C. E. M.; LI. E. F. W. Previsão de longo prazo da umidade do solo no rio Uruguai. RBRH –Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 17. N. 4. 39-47. 2012.

SANTOS. A. G.. SILVA. R. M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão dos recursos hídricos do rio Pirapama. Pernambuco. Brasil. Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science: V. 2. N. 2. 2007.

SANTOS. L. L.. Modelos hidráulico-hidrológicos: conceitos e aplicações. RBGF- Revista Brasileira de Geografia Física Recife-PE. Vol.2. n.03. set-dez. 2009. 01-19.

SANTOS. L. L.. SRINIVASAN. V. S. Modelagem Hidrossedimentológica no Semi-Árido Paraibano Utilizando o Modelo Wepp e o Efeito de Escala Sobre os seus Parâmetros. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.1 - Jan/Mar 2012. 53-63.

SANTOS. T. E. M.; MONTENEGRO. A. A. A.; SILVA. D. D. Umidade do Solo no Semiárido Pernambucano Usando-se Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)1. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.15. n.7. p.670–679. 2011.

SCHAEFLI. B.; GUPTA. H. V. Do Nash values have value? HYDROLOGICAL PROCESSES. Hydrol. Process. 21. 2075–2080 (2007)

SIABER. A.; UNLENBROOK. S. Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure. Journal of Hydrology. 310. 216–235. (2005).

SILANS. A. M. B. P.. ALMEIDA. C. N. ALBUQUERQUE. D. J. S.. PAIVA. A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia Hidrográfica do rio do peixe - estado da Paraíba. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 5 n.3 Jul/Set 2000. 5-19.

SILVA. B. B.; BRAGA. A. B.; BRAGA. C. C.; LEIDJANE. M. M. O.; GALVÍNCIO. J. D.; MONTENEGRO. S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesq. agropec. bras.*. Brasília. v.47. n.9. p.1218-1226. set. 2012.

SILVA. B. C.. Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2005.

SILVA. B. C.; COLLISCHONN. W.; TUCCI. C. E. M.; CLARK. R. T.; CORBO. M. D.; Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 12 n.3. 31-41. Jul/Set 2007.

SILVA. J. R. L; MONTENEGRO. A. A. A.; SANTOS. T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro. sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.16. n.1. p.27–36. 2012.

SORRIBAS. N. V.; COLLISCHONN. W.; MARQUES. D. M.; FRAGOSO JR. C. R.; CASTRO. N. M. R.; SOUZA. R. S. Modelagem Distribuída do Carbono em Bacias Hidrográficas. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 17 n.3 - 225-240. Jul/Set 2012.

SOUZA. W. S.. SOUZA. F. A. S.. Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da bacia hidrográfica do rio Piancó. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14. n.2. p.173–180. 2010.

TODINI. E. “The ARNO rainfall-runoff model”. *Journal of Hydrology*. v. 175.n. 1-4. p. 339-382. 1996.

TUCCI. C. E. M. Modelos hidrológicos. Editora Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre. 668p. 1998.

TUCCI. C. E. M. Modelos hidrológicos. 2º Ed. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2º Ed. Editora da UFRGS. 2005.

UFPB. Universidade Federal da Paraíba. 2001. Regionalização de vazões características de longo termo para os rios da sub-bacia 37. 40p. Convênio n. 0007/2000 entre a ANEEL e a Universidade Federal da Paraíba – Campus II.

WILDEMEERSCH S.; GODERNIAUX. P.; ORBAN. PH.; BROUYÈRE. S.; DASSARGUES. A. Assessing the effects of spatial discretization on large-scale flow model performance and prediction uncertainty. Journal of Hydrology 510 10–25 (2014).