

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO**

ERICK DE LIMA SEBADELHE VALERIO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ALTERAÇÕES NA PRECIPITAÇÃO DEVIDO A
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO REGIME HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO
PARAGUAÇU, BA**

Maceió
2014

ERICK DE LIMA SEBADELHE VALERIO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ALTERAÇÕES NA PRECIPITAÇÃO DEVIDO A
MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO REGIME HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO
PARAGUAÇU, BA**

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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto
Fragoso Junior

Maceió
2014

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Maria Auxiliadora G. da Cunha

- V164a Valerio, Erick de Lima Sebadelhe.
Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da Bacia do Rio Paraguaçu, BA / Erick de Lima Sebadelhe Valerio. – 2014.
62 f. : il. tabs., gráfs. e mapas.
- Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Junior.
Dissertação (Mestrado em Engenharia : Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.
- Bibliografia: f. 52-57.
Anexo: f. 58-62.
1. Modelos climáticos. 2. MAGICC/SCENGEN. 3. SWAT. I. Título.

CDU: 556.51:551.58(813.8)



**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO REGIME
HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO PARAGUAÇU – BA**

ERICK DE LIMA SEBADELHE VALÉRIO

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 06 de março do ano de 2014.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Carlos Roberto Fragoso Junior
(PPGRHS/UFAL)


Prof. Dr. Marllus Gustavo F. P. das Neves
(PPGRHS/UFAL)


Prof. Dr. Vladimir Carmona Borges de Souza
(PPGRHS/UFAL)


Prof. Dr. Andrea Sousa Fontes
(UFRB)

A meu pai e minha mãe por todo amor que me deram e esforço que fizeram durante todo esse tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que tenho em minha vida.

A meu pai, minha mãe e meu irmão que são o motivo de tudo.

A minha namorada Letícia, por todo seu amor e companheirismo durante todos esses anos de graduação e mestrado.

Agradeço em especial ao Prof. Carlos Ruberto Fragoso Júnior sempre me ajudando e orientando ao longo do trabalho.

Ao Prof. Marllus pela excelente contribuição que deu a minha vida acadêmica através do estágio docência.

A Professora Andrea Fontes pela ajuda durante a complicada fase de modelagem.

A meus colegas de mestrado Denis Duda, Benício, Carlos, Cledeílson, Almir e Tony que foram fundamentais para que conseguisse desenvolver esse trabalho.

RESUMO

As mudanças climáticas podem aumentar os conflitos por água em várias regiões do planeta. Previsões de longo prazo indicam que muitas áreas de semiárido, incluindo o nordeste brasileiro, irão sofrer uma diminuição dos recursos hídricos. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar os efeitos de alterações na precipitação, devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu-BA, bem como avaliar a aplicabilidade dos modelos climáticos e do modelo hidrológico na bacia em estudo. Projeções de anomalias na precipitação foram geradas através de um conjunto de modelos climáticos e as séries sintéticas de precipitação serviram como entrada para o modelo hidrológico SWAT. Os resultados foram analisados através de comparações entre os cenários. O modelo hidrológico apresentou desempenho satisfatório em representar as vazões da região estudada, considerando a maior dificuldade em representar a variabilidade em escala diária. Para todos os cenários avaliados, verificou-se uma tendência na diminuição das chuvas e das vazões a curto e a longo prazo. Porém, é importante destacar que as projeções obtidas através de modelos climáticos globais possuem grande incertezas associadas, principalmente para simulações de longo prazo.

Palavras-chaves: Modelos climáticos, MAGICC/SCENGEN, SWAT.

ABSTRACT

Climate changes can increase conflicts over water in several regions of the planet. Long term predictions indicate that many semi-arid areas, including the northeast of Brazil, will suffer a decrease of water resources. In this context, this study aimed to evaluate the effects of changes in precipitation due to climate changes on the hydrological response of the Paraguaçu river basin, as well as evaluating the applicability of climate models and hydrological modeling in the studied area. Projections of precipitation anomalies were generated through a assembly of climate models, where synthetic precipitation series were used as an input in the hydrological model SWAT. The results were analyzed by comparing scenarios. The hydrological model showed satisfactory performance in representing the flow rates of the studied region, reflecting the greater difficulty in representing river flow variability considering a daily scale. For all scenarios evaluated, there was a trend of reduction of the rainfall and flow rates in the short and long term scale. However, it is important to note that the projections obtained from global climate models have many uncertainties, especially for long-term simulations.

Keywords: Climate models, MAGICC/SCENGEN, SWAT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Paraguaçu	17
Figura 2 - Climas na bacia do rio Paraguaçu	18
Figura 3 - Modelo Digital de Elevação.....	22
Figura 4 - Mapa de uso e ocupação do solo	23
Figura 5 - Mapa de tipos de solos	24
Figura 6 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas	26
Figura 7 - Sub-bacias geradas pelo SWAT	28
Figura 8 - Localização das estações fluviométricas utilizadas na calibração	29
Figura 9 - Localização dos postos pluviométricos por célula.....	33
Figura 10 - Calibração diária para a estação Argoim (1963 a 1976).....	36
Figura 11 - Validação diária para estação Argoim (1977 a 1990)	37
Figura 12 - Calibração mensal para a estação Argoim (1963 a 1976)	38
Figura 13 - Validação mensal para estação Argoim (1977 a 1990).....	39
Figura 14 - Curva de permanência mensal para estação Argoim, no período calibrado (1963 a 1976).....	40
Figura 15 - Calibração diária no período de 1963 a 1976 para estação Ponte Rio Branco (destaque até a vazão 400 m ³ /s).....	41
Figura 16 - Validação no período de 1977 a 1990 para a estação Ponte Rio Branco (destaque até a vazão 400 m ³ /s).....	41
Figura 17 - Calibração mensal no período de 1963 a 1976 para estação Ponte Rio Branco	42
Figura 18 - Validação mensal no período de 1977 a 1990 para a estação Ponte Rio Branco	43
Figura 19 - Curva de permanência mensal para estação Ponte Rio Branco, no período calibrado (1963 a 1976)	44
Figura 20 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário A2, ano de 2030	46
Figura 21 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário A2, ano de 2070	46
Figura 22 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário B2, ano de 2030	47
Figura 23 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário B2, ano de 2070	47
Figura 24 - Variação na precipitação média mensal para todos os cenários e futuros	48
Figura 25 - Esquema dos caminhos disponíveis para o movimento da água no modelo SWAT	58
Figura 26 - Gráfico de Gantt para os postos pluviométricos.....	59
Figura 27 - Gráfico de Gantt para os postos fluviométricos.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Postos Fluviométricos Selecionados	26
Tabela 2 - Estatísticas calculadas pelo WGNmaker 4.1	27
Tabela 3 - Avaliação de desempenho geral para as estatísticas recomendadas em escala mensal	30
Tabela 4 - Faixa de valores dos parâmetros obtidos durante a calibração	34
Tabela 5 - Estatísticas dos ajustes obtidos na calibração diária para cada estação fluviométrica	35
Tabela 6 - Desempenho dos modelos em representar a precipitação anual da região analisada	45
Tabela 7 - Melhores e piores modelos climáticos para representar a região analisada	45
Tabela 8 - Precipitações anuais na bacia do rio Paraguaçu	49
Tabela 9 - Percentagem relativa entre as vazões calculadas para cada cenário e as vazões de referência para as estações Argoim e Ponte Rio Branco	50
Tabela 10 - Propriedades físico-químicas dos solos	61
Tabela 11 - Modelos utilizados pelo SCENGEN	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas
AR4 - Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do Planeta
CFSR - Climate Forecast System Reanalysis
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GCM - Global Climate Models
HRU - Hydrologic Response Unit
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
MAGICC - Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change
MCG - Modelos de Circulação Global
MDE - Modelo Digital de Elevação
NCEP - National Centers for Environmental Prediction
NSE - Nash-Sutcliffe Efficiency
OMM - Organização Meteorológica Mundial
PBIAS - Percentual de Tendência
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RMSE - Root Mean Square Error
RPGA - Região de Planejamento e Gestão das Águas
SCENGEN - Scenario Generator
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SRES - Special Report on Emissions Scenarios
SWAT - Soil and Water Assessment Tool
USDA-ARS - United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service
WGS-84 - World Geodetic System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo	16
2	METODOLOGIA	17
2.1	Área de Estudo	17
2.2	Descrição do Modelo Hidrológico	18
2.3	Obtenção e Preparação dos Dados de Entrada	21
2.3.1	Modelo Digital de Elevação (MDE)	21
2.3.2	Mapa de Uso e Ocupação do Solo	22
2.3.3	Tipos de Solos	23
2.3.4	Dados de Precipitação e Vazão	25
2.3.5	Dados Climáticos	27
2.4	Calibração e Validação do Modelo Hidrológico	27
2.5	Definição dos Cenários de Mudanças Climáticas	30
2.6	Definição dos Modelos Climáticos	31
2.7	Projeções de Anomalias na Precipitação	32
2.8	Simulação dos Cenários	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1	Modelagem Hidrológica	34
3.2	Definição dos Modelos Climáticos e Projeções de Anomalias	44
3.3	Simulação dos Cenários	48
3.3.1	Efeitos Sobre a Precipitação	48
3.3.2	Efeitos Sobre a Vazão	49
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO	58

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro tem como principal característica a alta variabilidade espacial e temporal do clima, que está associada ao elevado grau de vulnerabilidade a que este ambiente está submetido. O padrão de variação climática expõe a região a eventos extremos de seca e atribui grandes incertezas sobre os recursos hídricos, impondo uma utilização mais conservadora e uma relativa redução nos estoques de água disponíveis (TUCCI E BRAGA, 2003).

Somada a essas características está a ocorrência de mudanças climáticas que têm afetado o ciclo hidrológico e os eventos extremos, com impactos na disponibilidade dos recursos hídricos em âmbito global e regional. Essas mudanças podem ser entendidas como modificações no clima ao longo do tempo, que podem ser verificadas através de mudanças de médias e/ou variações de propriedades. Essas alterações podem ser provocadas pela variabilidade climática natural, condicionada a fatores naturais e suas interações, e/ou como resultado das atividades antrópicas (IPCC, 2007; MARENGO *et al.*, 2011; TUCCI E BRAGA, 2003).

Na década de 1990 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), objetivando avaliar, com bases científicas, as variações no clima e os possíveis cenários futuros de mudanças. Em fevereiro de 2007, o IPCC divulgou seu 4º relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do Planeta (AR4) que afirma que é bem provável (probabilidade de ocorrência maior que 90%) que a elevação na temperatura global média, verificada nos últimos 50 anos, seja resultado da ação antrópica. As projeções contidas no documento referem-se a um aumento na temperatura global entre 1,8 e 4,0° C até o ano de 2100. A estimativa mais confiável projeta um aumento de 3° C para um cenário onde os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da média atual (AVILA, 2007).

O 4º Relatório afirma que as mudanças climáticas irão aumentar os conflitos por água em várias regiões do planeta, projetando com alto grau de confiança (nível 8 numa escala de confiança que vai até 10) que muitas áreas de semiárido, incluindo o nordeste brasileiro, irão sofrer uma diminuição dos recursos hídricos

(IPCC, 2007). A consequência seria o aumento na quantidade de áreas afetadas pela seca, além de potenciais impactos negativos em diversos setores, como por exemplo, abastecimento humano, agricultura, geração de energia e saúde.

Em relação às chuvas, projeta-se, com média a alta confiança (níveis 5 a 8, numa escala de 10), que a região nordeste apresentará chuvas mais fracas nas estações chuvosas. Simulações de balanço hídrico para as regiões do Brasil, considerando estas projeções de temperatura e chuva, sugerem uma tendência de deficiência hídrica por praticamente todo o ano para o nordeste, o que denota uma tendência de transformação do semiárido em uma região árida até o fim do século XXI (MARENGO *et al.*, 2011).

Neste cenário os impactos seriam devastadores. Espera-se que cerca de 70% das cidades com mais de 5.000 habitantes, localizadas no semiárido nordestino, enfrentem uma séria crise de abastecimento de água para consumo humano até o fim de 2025, atingindo cerca de 41 milhões de habitantes da região do semiárido e entorno (ANA, 2006). De acordo com Marengo *et al.* (2011) o nordeste é a região mais vulnerável a mudanças climáticas. Num clima mais quente no futuro, a região pode se tornar árida, afetando a agricultura de subsistência, a disponibilidade de água e a saúde da população. Esses impactos poderiam gerar ondas de migração para as cidades da região ou de outras regiões, aumentando ainda mais os graves problemas sociais já existentes nos grandes centros urbanos.

Para obter essas projeções de cenários futuros e realizar os estudos acerca dos impactos de ordem ambiental e socioeconômica, tem sido utilizado cada vez mais os modelos climáticos. Essa ferramenta é a base dos resultados divulgados pelo IPCC e tantos outros estudos sobre o clima, tendo adquirido grande importância na busca por soluções para mitigar os possíveis danos das mudanças e para orientar a gestão. Assim, os modelos climáticos apontam como uma ferramenta de fundamental importância para conhecer os cenários projetados e seus efeitos em uma região tão vulnerável a mudanças como o semiárido brasileiro.

Segundo Marengo *et al.* (2011) os modelos climáticos são as principais ferramentas para tentar projetar o clima do futuro. Eles representam, de forma simples, o complexo sistema climático por meio de componentes e processos, utilizando métodos quantitativos para simular as interações da atmosfera, oceanos, superfícies continentais e gelo. Com o avanço computacional, os modelos climáticos

foram se tornando mais complexos, à medida em que foram sendo acrescentados mais componentes, como a dinâmica dos oceanos, as trocas na superfície da terra e os aerossóis. Apesar disso, a representação do sistema ainda é feita de forma simplificada, uma vez que não é possível representar todos os processos existentes na natureza.

Muitos modelos climáticos foram desenvolvidos por instituições de todo o mundo. O HADCM3, desenvolvido na Inglaterra pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, o modelo russo INMCM3.0, produzido pelo *Institute of Numerical Mathematics/Russian Academy of Science*, e o FGOALS1.0, desenvolvido na China pelo *Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Science*, são alguns exemplos desses modelos (WIGLEY, 2008).

Os modelos climáticos são avaliados quanto à sua capacidade de simular adequadamente o clima atual e o passado em relação às condições médias e suas variações. Dessa forma, se um modelo consegue representar bem o clima passado até o presente, admite-se que as projeções futuras serão aceitáveis. Porém, para simular o sistema climático global são necessárias grandes quantidades de recursos computacionais, o que limita o tempo total de simulação e o tamanho da grade utilizada. Atualmente, os Modelos Climáticos Globais (*Global Climate Models - GCM*) utilizam células bastante largas, com tamanho entre 100 e 300 km². Apesar dessa limitação, eles conseguem fornecer a ideia de como as mudanças ocorrem em grande escala (MARENGO *et al.*, 2011).

Para avaliar mais detalhadamente as mudanças em nível de regiões, estados ou cidades, um dos métodos utilizados é o "*Downscaling*", que consiste no aumento da resolução espacial do modelo climático, através da inserção de dados locais em modelo climático de maior escala. O uso dessa técnica possibilita uma melhor representação da região e dos processos ocorridos em menor escala. Dessa forma, foram desenvolvidos modelos regionais propostos para prever com maiores detalhes fenômenos climatológicos evidenciados em sistemas de mesoscala. A compreensão das mudanças climáticas em diferentes cenários de emissões, em escala regional de boa resolução, é fundamental quando se tem como objetivo mitigar possíveis danos e planejar ações adaptativas para as projeções climáticas do futuro (COONEY, 2012).

De acordo com Bravo *et al.* (2012), alguns trabalhos tem mostrado que as previsões de longo prazo obtidas por um conjunto de modelos globais apresentam melhores resultados quando comparadas àquelas obtidas através do uso exclusivo de modelos que foram desenvolvidos para melhor representar a climatologia do local.

Para prever os impactos que as mudanças climáticas provocarão sobre os recursos hídricos, busca-se associar os modelos climatológicos aos modelos hidrológicos (e.g. RIMMER *et al.*, 2011; CHIEN *et al.*, 2013; FARAMARZI *et al.*, 2013; VAGHEFI *et al.*, 2013; ZABALETA *et al.*, 2014). No nordeste brasileiro muitos trabalhos tem sido desenvolvidos associando modelos hidrológicos e modelos climáticos (e.g. MEDEIROS, 2003; ESCARIÃO *et al.*, 2012; GENZ *et al.*, 2012).

Nesse contexto, os modelos do clima oferecem as projeções futuras de, por exemplo, temperatura e precipitação, que servirão como dados de entrada do modelo hidrológico, obtendo como resultado o comportamento da bacia hidrográfica em um determinado cenário futuro, sendo possível avaliar os efeitos das mudanças sobre a qualidade e disponibilidade da água, e a forma como estas irão impactar o ecossistema.

No banhado do Taim, no Rio Grande do Sul, um conjunto de modelos climáticos globais foi utilizado para projetar cenários do clima futuro, aplicando o resultado como entrada em um modelo hidrodinâmico para estimar os níveis d'água. Como resultado, verificou-se que, quando considerado o conjunto de modelos que melhor representou a situação atual do clima da região, a tendência a aumento dos níveis do banhado foi mais evidente em todos os cenários e futuros analisados, ao mesmo tempo em que a faixa de incerteza dos resultados foi menor (BRAVO *et al.*, 2012).

Na bacia hidrográfica do Kejie, no Himalaia oriental, o modelo climático HadCM3 foi associado ao *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), modelo hidrológico de base física desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA-ARS, na sigla em inglês), para avaliar os impactos combinados da cobertura da terra e mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos. Os resultados demonstraram que as mudanças de uso do solo juntamente com os cenários de mudanças climáticas chegam a atingir

cerca de 50% da atual e futura faixa de variabilidade inter-anual das chuvas e vazões (MA *et al.*, 2010).

Um dos principais problemas na calibração e aplicação de modelos em geral é a existência de incertezas nas previsões. Segundo Abbaspour (2012), as principais fontes de incertezas estão relacionadas a: a) simplificação dos modelos; b) processos existentes na bacia, mas não incluídos na concepção do modelo; c) processos incluídos no modelo, mas cujas ocorrências na bacia são desconhecidas pelo modelador; d) e processos desconhecidos pelo modelador que também não estão incluídos no modelo.

As avaliações dos efeitos de mudanças climáticas, utilizando projeções obtidas através de modelos, sempre serão dotadas de incertezas (KATZ *et al.*, 2013). Isso se deve, principalmente, à forma simples como os modelos tentam representar um sistema tão complexo como o sistema climático. Em um estudo feito por Fyfe *et al.* (2013) foram comparados dados de aquecimento global observados e simulados através de modelos. Concluiu-se que o aquecimento global verificado nas últimas décadas é significativamente menor do que o aquecimento previsto em simulações utilizando modelos.

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando avaliar essas incertezas nas previsões (e.g. BAE *et al.*, 2011; JUNG *et al.*, 2012; BRIGODE *et al.*, 2013; FENG *et al.*, 2013; LUNG *et al.*, 2013). Quando se busca prever os impactos nos recursos hídricos em regiões secas essa incerteza é ainda maior, conforme atestado por Faramarzi *et al.* (2013). Dessa forma, identificar e quantificar as fontes de incertezas associadas às previsões dos modelos é uma das etapas mais importantes na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, sendo fundamental para tomar melhores decisões no que diz respeito a mitigação e adaptação (KATZ *et al.*, 2013).

1.1 Objetivo

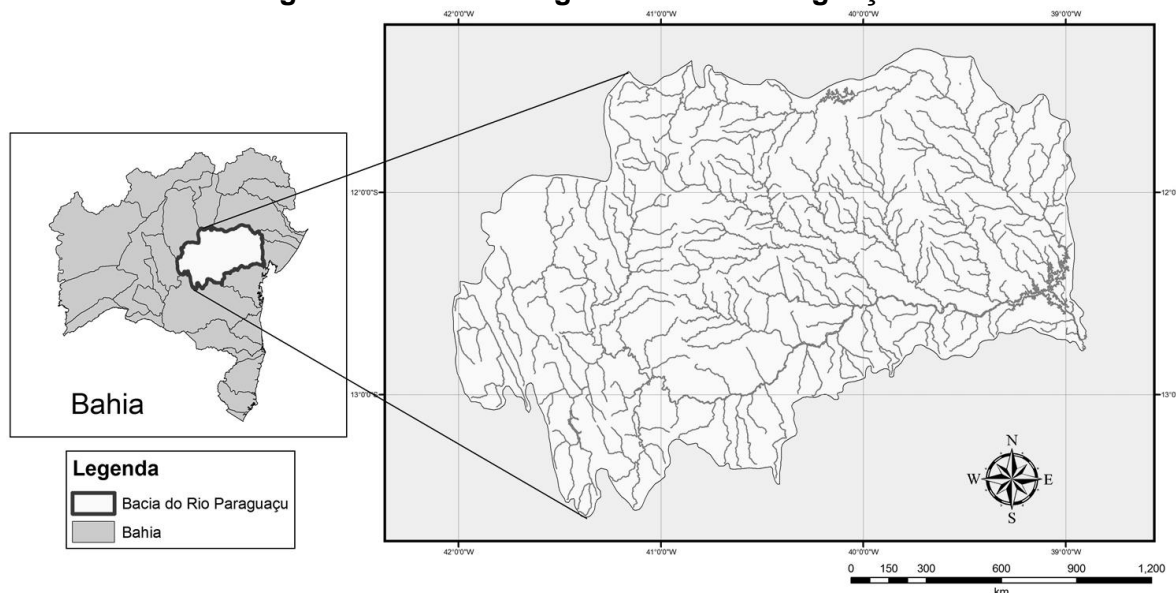
No presente trabalho, objetivou-se avaliar os efeitos das alterações na precipitação, devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu-BA, bem como avaliar a aplicabilidade de alguns modelos climáticos globais e do modelo hidrológico SWAT na bacia em estudo.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu está localizada na região centro-leste do estado da Bahia (Figura 1), compondo a Região de Planejamento e Gestão das Águas - RPGA de número 10 (INEMA, 2013). Apresenta uma área de 54.877 km², abrangendo 83 municípios, incluindo Feira de Santana, a segunda maior cidade do Estado. Em sua superfície residem, aproximadamente, 1,7 milhões de pessoas, que constituem cerca de 12,68% da população do estado (GENZ *et al.*, 2012; IBGE, 2010).

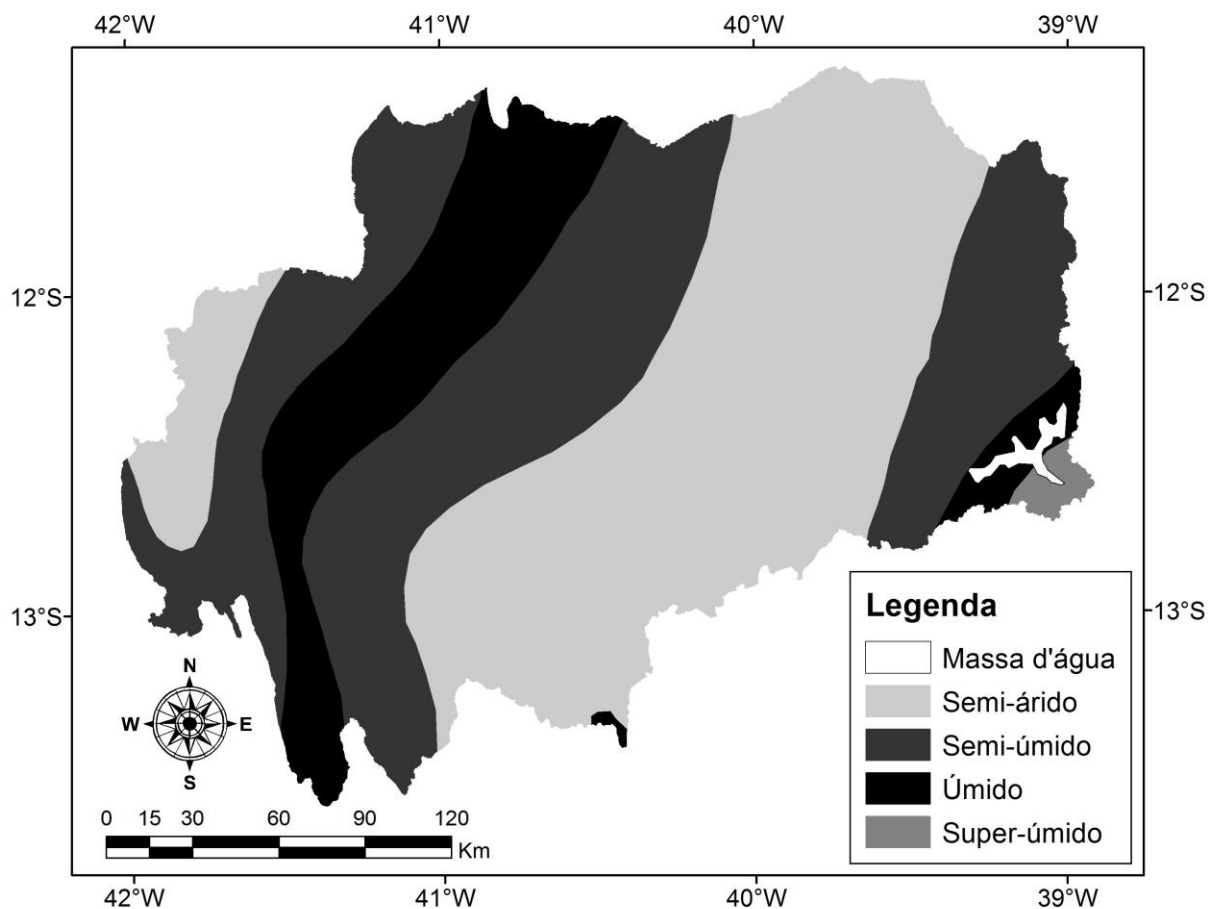
Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Paraguaçu



Fonte: Autor

A bacia apresenta três tipos de clima: o clima Semiárido, evidenciado em cerca de 67% da área, ocupando a parte central da bacia; o clima Subúmido a Seco, predominante na parte superior da bacia, na região da Chapada Diamantina; e o clima Úmido a Subúmido, que predomina no terço inferior da bacia do rio Paraguaçu e em algumas pequenas áreas em sua nascente (GENZ *et al.*, 2012). Na Figura 2 são apresentados os climas identificados na bacia do rio Paraguaçu.

Figura 2 - Climas na bacia do rio Paraguaçu



Fonte: Autor

Destaca-se na bacia a presença de grandes reservatórios, como Apertado, Bandeira de Melo, França, São José de Jacuípe e Pedra do Cavalo. O reservatório de Pedra do Cavalo, localizado no baixo curso do rio Paraguaçu, no Estado da Bahia, foi projetado para usos múltiplos, entre eles o controle de cheias, abastecimento humano, irrigação e geração de energia elétrica (ANDRADE, 2010). Este reservatório possui grande importância para a região, pois, além de abastecer municípios do entorno, contribui com cerca de 60% do abastecimento da Região Metropolitana de Salvador (GENZ *et al.*, 2012).

2.2 Descrição do Modelo Hidrológico

O *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT é um modelo hidrológico de base física, do tipo distribuído, que foi desenvolvido nos Estados Unidos com a finalidade de prever impactos do gerenciamento do solo sobre os recursos hídricos,

sedimentos e rendimento químico agrícola em grandes bacias hidrográficas (SANTHI *et al.*, 2001; SINGH *et al.*, 2005).

O modelo opera em intervalo diário, considerando uma escala de tempo contínua, e apresenta uma boa eficiência computacional, sendo capaz de simular longos períodos para avaliar os efeitos das possíveis mudanças verificadas na bacia. Os principais componentes do modelo incluem clima, hidrologia, temperatura, e propriedades e uso do solo. No SWAT, as bacias são divididas em sub-bacias, que, por sua vez, são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit* - HRU). As HRU consistem em unidades homogêneas de uso e tipo de solo, cobertura vegetal e topografia. A produção de água em cada HRU é calculada com base na precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e o escoamento de retorno do aquífero raso. Alternativamente a bacia pode ser dividida apenas em sub-bacias, que são caracterizadas pelo tipo dominante de uso, características do solo e topografia (GASSMAN *et al.*, 2007; NETO *et al.*, 2011).

A simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica é baseada na equação do balanço hídrico (ver Equação 1), sendo dividida em duas fases: a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água e aporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas no canal principal de cada sub-bacia; e a fase aquática, que corresponde ao movimento da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas através da rede hidrográfica até o exutório da bacia. Na **Figura 25** (ver Anexo) são apresentados os caminhos disponíveis para movimentação da água no modelo SWAT (NEITSCH *et al.*, 2011; PAGLIERO *et al.*, 2014).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde: SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm H₂O), SW_0 é o conteúdo inicial de água no solo no dia i (mm H₂O), t é o tempo (dias), R_{day} é o volume precipitado no dia i (mm H₂O), Q_{surf} é o volume de escoamento superficial no dia i (mm H₂O), E_a é o volume de evapotranspiração no dia i (mm H₂O), w_{seep} é o volume de água entrando na zona insaturada do perfil do solo no dia no dia i (mm H₂O), e Q_{gw} é o volume de fluxo de retorno no dia i (mm H₂O) (NEITSCH *et al.*, 2011).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, fator que tem grande influencia no balanço hídrico de regiões de semiárido, o modelo oferece três opções: o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965 apud NEITSCH *et al.*, 2011); o método de Priestley-Taylor (PRIESTLEY E TAYLOR, 1972 apud NEITSCH *et al.*, 2011); e o método de Hargreaves (HARGREAVES *et al.*, 1985).

A subdivisão da bacia em área com combinações únicas de tipo e uso do solo (HRU) permite ao modelo refletir diferenças em evapotranspiração para diversas culturas e solos. O escoamento é calculado separadamente para cada HRU e encaminhado para obter o escoamento total da bacia hidrográfica, aumentando a precisão e fornecendo assim uma descrição física muito melhor do balanço hídrico na bacia em estudo (NEITSCH *et al.*, 2011).

O grande número de parâmetros e interações entre os processos considerados em sua concepção, atribui ao SWAT uma grande complexidade, sendo necessário uma extensa base de dados para executá-lo. Porém, o modelo apresenta como muitas vantagens, dentre as quais destacam-se: (a) o fato de ser um modelo físico, possuindo sua formulação baseada na descrição dos processos naturais, permitindo uma representação mais próxima da realidade e também possibilitando ao usuário a inserção de dados de entrada baseados na realidade física da bacia em estudo; (b) o fato de ser um modelo distribuído, permitindo a representação da variabilidade espacial das grandezas de influência nos processos que se desejam investigar; e (c) a integração com Sistema de Informações Geográficas (SIG), através da interface ArcSWAT, que permite uma maior rapidez na organização e definição dos dados de entrada, visualização por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) das características físicas da bacia e também uma maior compreensão do modelo (NEITSCH *et al.*, 2011; NETO *et al.*, 2011).

Devido as suas vantagens o SWAT tem sido amplamente aplicado em todo mundo para avaliar qualidade e disponibilidade de água, mudanças climáticas, sequestro de carbono, produção de sedimentos e produção agrícola (e.g. PISINARAS *et al.*, 2009; JHA, 2011; OEURNG *et al.*, 2011; TIBEBE E BEWKET, 2011; NOTTER *et al.*, 2012).

Com a crescente preocupação mundial a respeito das mudanças climáticas e seus impactos, o modelo tem sido empregado em vários países como China, Estados Unidos e Índia, para tentar prever os possíveis efeitos que essas alterações

no clima ocasionarão (e.g. GUO *et al.*, 2008; LI *et al.*, 2009; DASGUPTA *et al.*, 2012; FICKLIN *et al.*, 2012; WU *et al.*, 2012).

No Brasil muitos trabalhos tem sido desenvolvidos utilizando o modelo SWAT para avaliar a aplicabilidade do modelo para as regiões do país, obtendo resultados satisfatórios que comprovam que o modelo, apesar de ter sido desenvolvido em outro país, pode ser aplicado com grande eficiência também em território brasileiro (e.g. DURÃES *et al.*, 2011; NETO *et al.*, 2011; ARAGÃO *et al.*, 2012; LELIS *et al.*, 2012; ARAGÃO *et al.*, 2013). Isso indica uma grande possibilidade de avanço nos estudos das alterações climáticas no país utilizando o SWAT como ferramenta para auxiliar no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros.

No presente trabalho, foi utilizado o ArcSWAT, que corresponde ao modelo hidrológico SWAT acoplado ao ArcGIS. Essa escolha se deve as vantagens apresentadas pelo modelo que tem sido desenvolvido há mais de 30 anos, sendo amplamente aplicado em todo o mundo para estudos em bacias hidrográficas e a nível nacional.

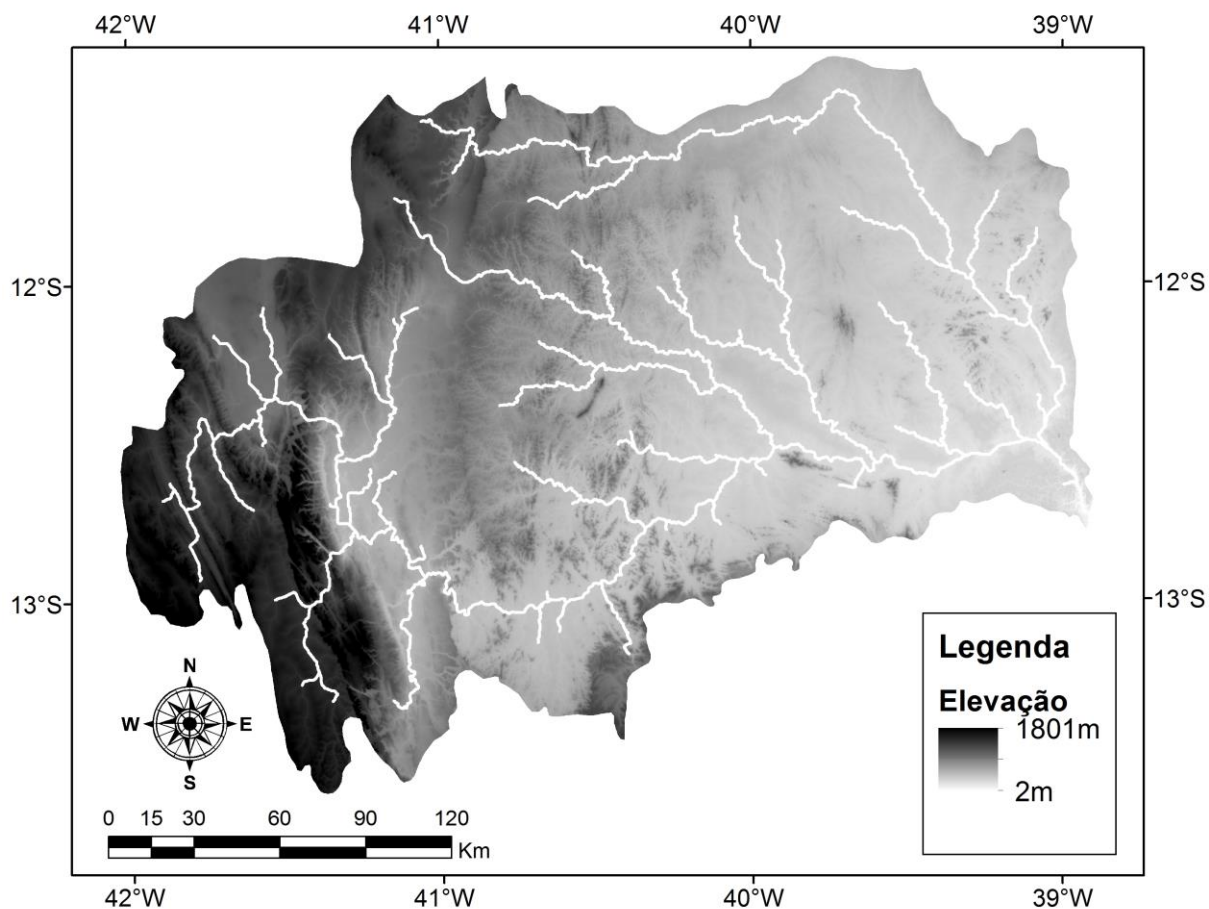
2.3 Obtenção e Preparação dos Dados de Entrada

Os principais dados de entrada do modelo são: Modelo Digital de Elevação (MDE); mapa de uso e ocupação do solo; mapa de tipos de solos; e dados hidrológicos (precipitação e vazão) e climáticos (temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar).

2.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é um dado espacial requerido pelo SWAT na fase de pré-processamento para delimitar a bacia e suas sub-bacias. O MDE utilizado foi de Miranda (2005), em formato GEOTIFF (16 bits), com resolução espacial de 90 metros, Sistemas de Coordenadas Geográficas e Datum WGS-84. Elaborou-se um mosaico com as cartas SC-24-Y-D, SC-24-Z-C, SD-24-V-A, SD-24-V-B, SD-24-V-C, SD-24-V-D e SD-24-X-A, recortando-se em seguida a área correspondente a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (**Figura 3**).

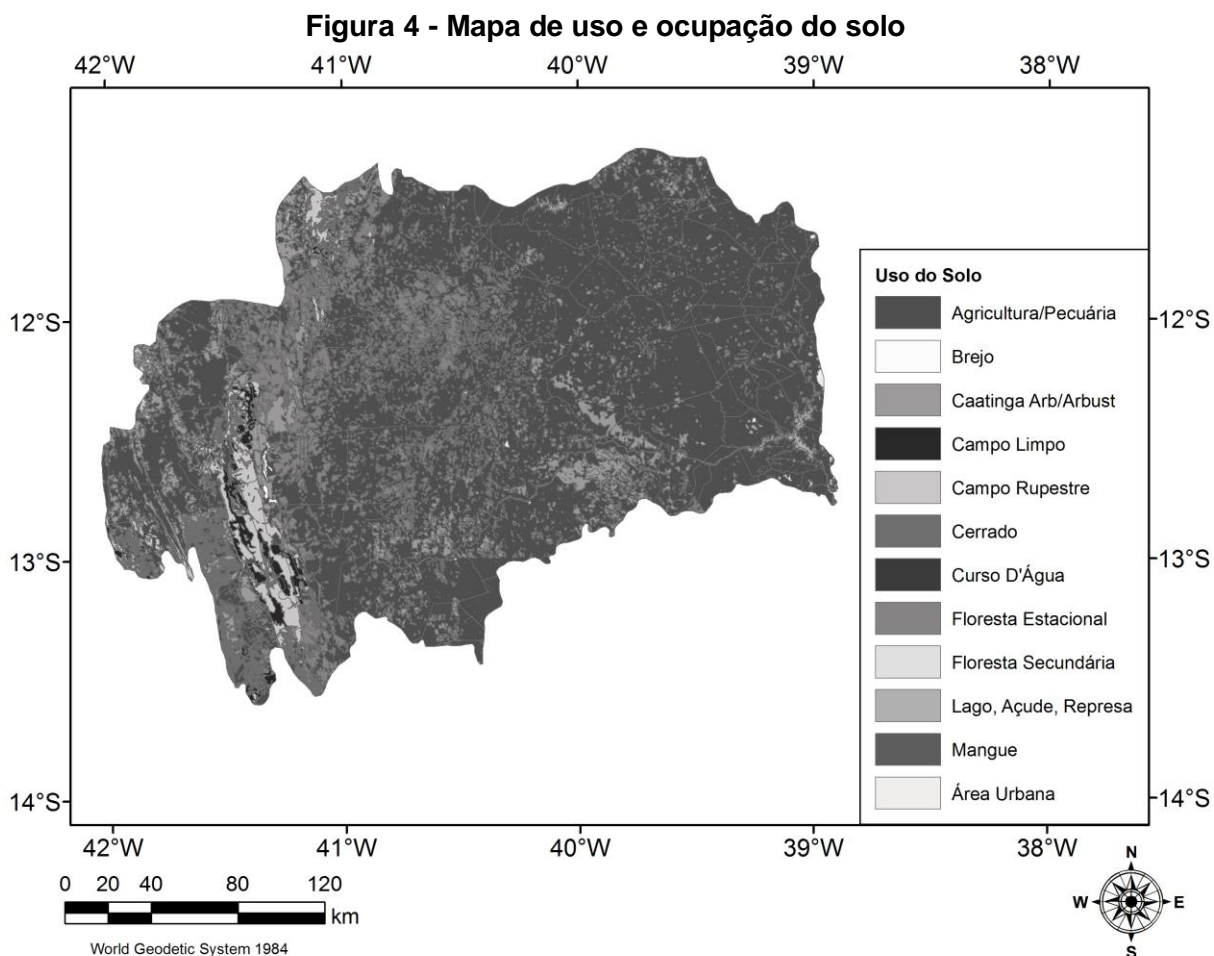
Figura 3 - Modelo Digital de Elevação



Fonte: Adaptado de Miranda, 2005

2.3.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi do ano de 2004, obtido através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (**Figura 4**). Através da análise do mapa verificou-se a existência de 11 classes de uso e ocupação, sendo elas: agricultura/pecuária (71,11%), uso predominante na bacia; área urbana (0,15%); brejo (0,19%); Caatinga (10,17%); campo limpo (1,39%); campo rupestre (2,66%); cerrado (2,70%); curso d'água (0,15%); floresta estacional (10,87%); floresta secundária (0,04%); lago/açude/reserva (0,56%); e mangue (0,01%).

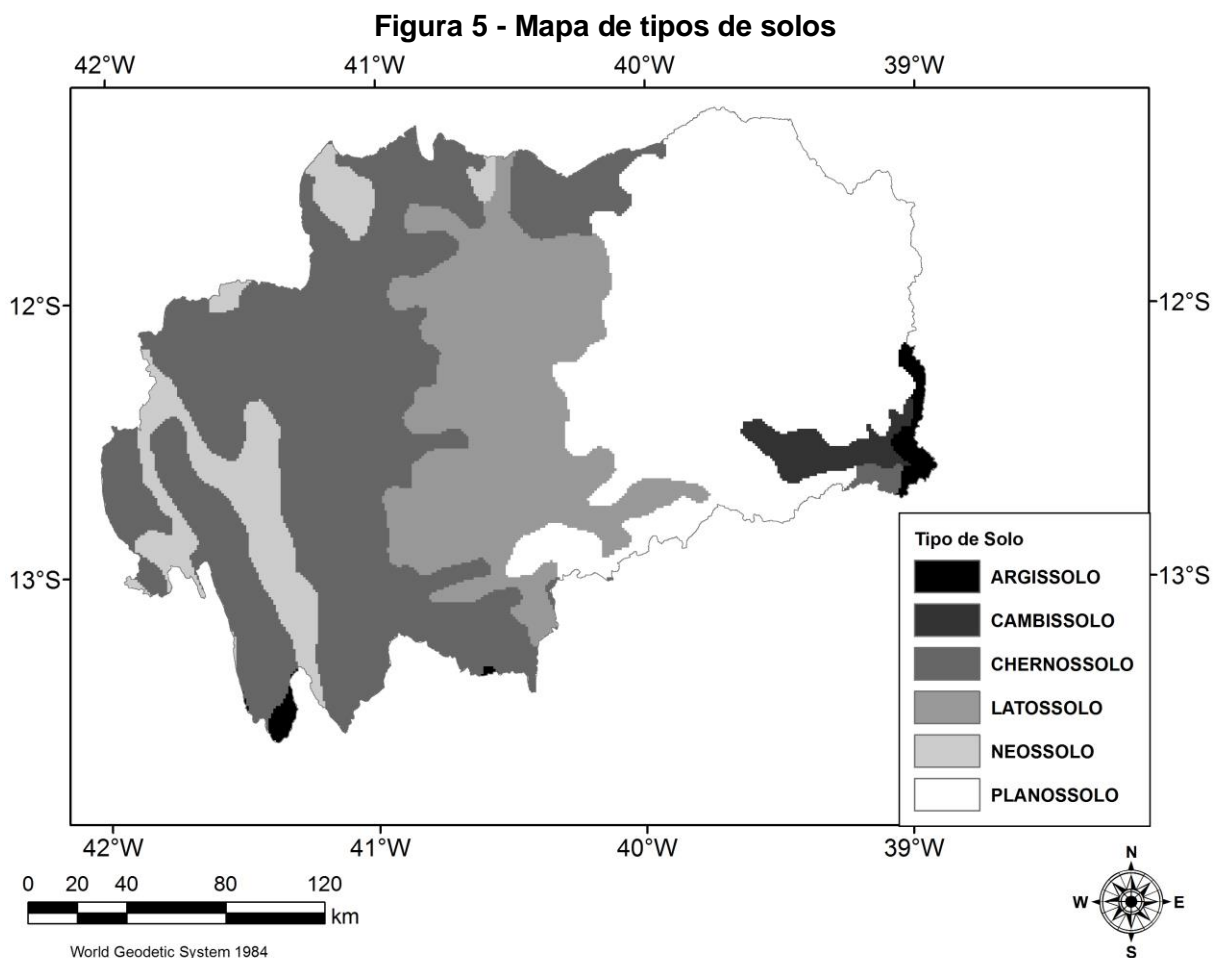


Fonte: Adaptado de IBGE, 2004

Apesar do SWAT possuir um extenso banco de dados com diversos tipos de uso e cobertura do solo, vegetações tipicamente brasileiras como caatinga e cerrado não estão incluídas no modelo, sendo necessário cadastrá-las inserindo um grande número de parâmetros. Devido a dificuldade em obter esses dados, utilizou-se o tipo de vegetação disponível no banco de dados do modelo que mais se aproxima da caatinga (*Southwestern US Arid Range*) e do cerrado (*Range-Brush*), em aspectos paisagísticos e morfológicos, conforme trabalho realizado por Santos (2013).

2.3.3 Tipos de Solos

De acordo com EMBRAPA (2011), existem 6 tipos de solo na bacia: Latossolos (37%); Planossolos (33%); Cambissolo (20%); Neossolo (8%); Argissolo (1%); e Chernossolo (1%). O mapa de tipos de solos é apresentado na **Figura 5**.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2011

As propriedades físico-químicas de cada solo foram obtidas através do *Harmonized World Soil Database* (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012) e inseridas no banco de dados do SWAT. Entretanto, a variável K_{USLE} , que representa o fator de erodibilidade para a Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation - USLE*), exigida pelo modelo, teve que ser calculada com base em equações empíricas. A Equação 2 foi utilizada para calcular a variável K_{USLE} (WILLIAMS, 1995, apud ARNOLD *et al.*, 2012).

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (2)$$

Onde: f_{csand} é um fator que atribui baixa erodibilidade para solos com alto teor de areia grossa e altos valores para solos com pouca areia; f_{cl-si} é um fator que atribui baixa erodibilidade para solos com altas proporções de argila e silte; f_{orgc} é um fator que reduz a erodibilidade para solos com alto teor de carbono orgânico; e

f_{hisand} é um fator que reduz a erodibilidade para solos com elevado teor de areia (ARNOLD *et al.*, 2012).

As variáveis f_{csand} , f_{cl-si} , f_{orgc} e f_{hisand} foram calculadas a partir das Equações 3 a 6.

$$f_{csand} = \left(0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[-0,256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (3)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (4)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,0256 \cdot orgc}{orgc + \exp[3,72 - 2,95 \cdot orgc]} \right) \quad (5)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right) \quad (6)$$

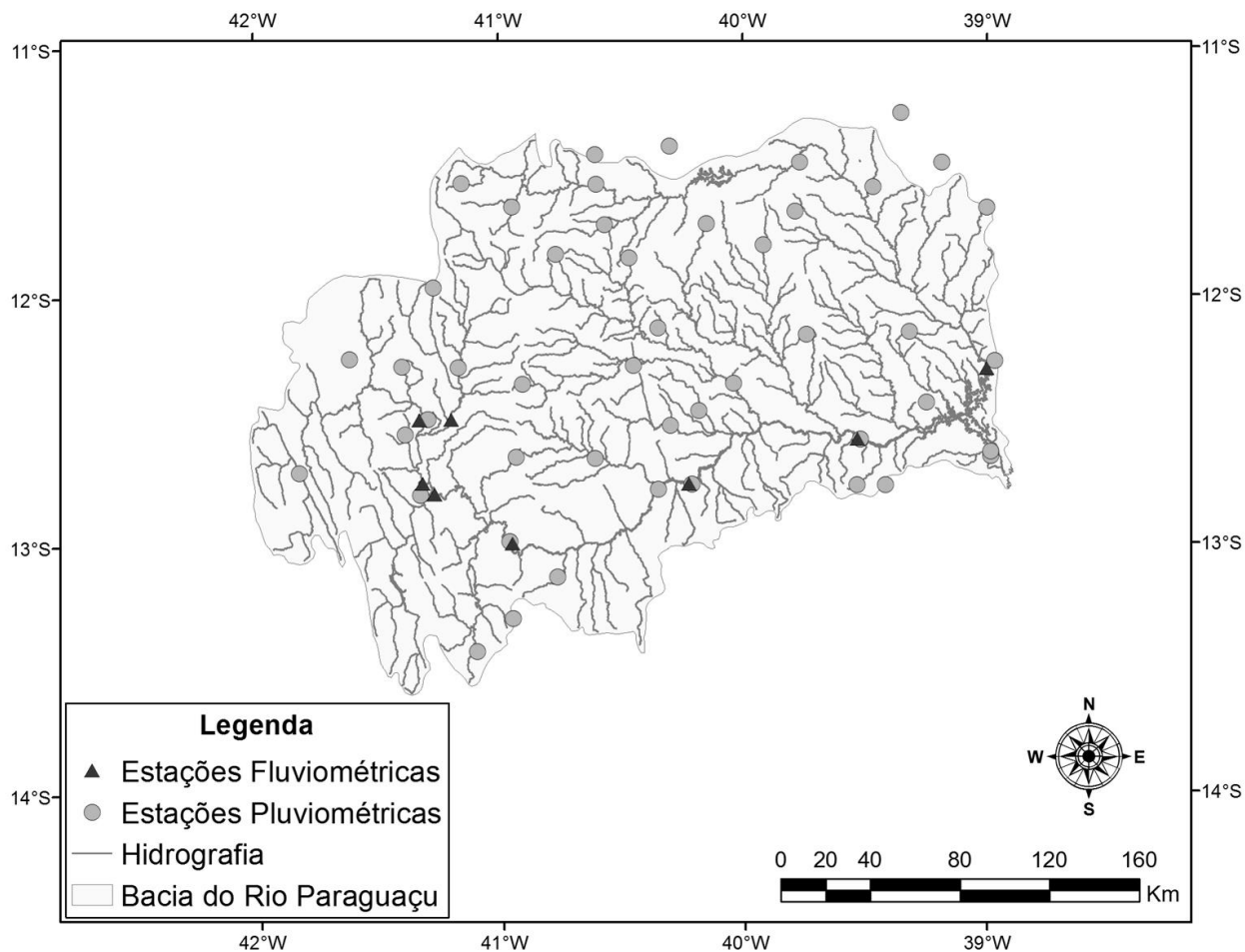
Onde: m_s é o percentual de areia (partículas com diâmetro entre 0,05 e 2,00 mm); m_{silt} é o percentual de silte (0,002 - 0,05 mm); m_c é o percentual de argila (diâmetro menor que 0,002 mm); e $orgc$ é o percentual de carbono orgânico na camada do solo (ARNOLD *et al.*, 2012).

Na **Tabela 10** (ver Anexo) são apresentados os valores das propriedades físico-químicas que foram inseridos no modelo, para a primeira e a segunda camada de cada solo.

2.3.4 Dados de Precipitação e Vazão

Os dados de precipitação e vazão para a área de estudo foram obtidos no banco de dados disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). As localizações das 47 estações pluviométricas e 8 estações fluviométricas são apresentadas na **Figura 6**. As séries históricas de precipitação foram aplicadas como dado de entrada no modelo hidrológico, já os dados de vazão foram utilizados apenas no processo de calibração. Na **Tabela 1** são apresentados as estações fluviométricas selecionadas. Foi realizada a análise da disponibilidade, através da análise de diagramas de Gantt (ver **Figura 26** e **Figura 27** em Anexo), e consistência das séries de dados de precipitação e vazão, verificando-se que o melhor período para o estudo é entre os anos de 1960 e 1990.

Figura 6 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas



Fonte: Autor

Tabela 1 - Postos Fluviométricos Selecionados

Código	Nome	Rio	Lat	Long	Responsável	Altitude (m)	Área (Km ²)
51140000	Porto	Santo Antônio	-12,49	-41,33	ANA	338	6180
51170000	Utinga	Utinga	-12,50	-41,21	ANA	357	2710
51190000	Fertém	Santo Antônio	-12,76	-41,33	ANA	320	9670
51120000	Andaraí	Paraguaçu	-12,84	-41,32	ANA	328	2350
51240000	Itaeté	Paraguaçu	-12,99	-41,96	ANA	286	16500
51280000	Iaçu	Paraguaçu	-12,76	-40,21	ANA	222	22800
51350000	Argoim	Paraguaçu	-12,59	-39,52	ANA	140	37900
51460000	Ponte Rio Branco	Jacuípe	-12,23	-39,05	ANA	119	11600

2.3.5 Dados Climáticos

Os dados de temperatura do ar (máximas e mínimas), velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram obtidos através do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) / National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* (<http://globalweather.tamu.edu/>), que consiste em um sistema acoplado atmosfera-oceano-solo e gelo da superfície do mar, em escala global e de alta resolução. Esse sistema foi concluído em um período de 31 anos (1979-2010), sendo desenvolvido para fornecer as melhores estimativas desses domínios acoplados ao longo desse período.

A resolução global da atmosfera é de, aproximadamente, 38km com 64 níveis que se estendem desde a superfície até uma pressão de 0,26 hPa. A resolução global do oceano é de 0,25° no Equador até 0,5° entre os trópicos, com 40 níveis até a profundidade de 4.737m. Para as superfícies do terreno e do gelo no mar o modelo possui 4 camadas e 3 camadas, respectivamente.

Foram obtidos os dados para a região compreendida entre as latitudes -13,75° e -11,25° e longitudes -42,25° e -38,75°, onde está inserida bacia do rio Paraguaçu, resultando num total de 96 estações climáticas. Os dados climáticos obtidos foram inseridos no SWAT com o auxílio da ferramenta WGNmaker 4.1, que consiste em uma macro do Excel, programada para calcular estatísticas das variáveis climáticas exigidas pelo modelo (ver **Tabela 2**).

Tabela 2 - Estatísticas calculadas pelo WGNmaker 4.1

RAIN_YRS	Números de anos utilizados para calcular a precipitação máxima de 30 minutos
TMPMX	Média das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPMN	Média das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
PCPMM	Média das Precipitação para cada mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão das Precipitação para cada mês (mm/dia)
PCPSKW	Coeficiente <i>Skew</i> para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias com chuva no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de 30 minutos (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ/m ² /dia)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNDVAV	Média diária de velocidade do vento para cada mês (m/s)

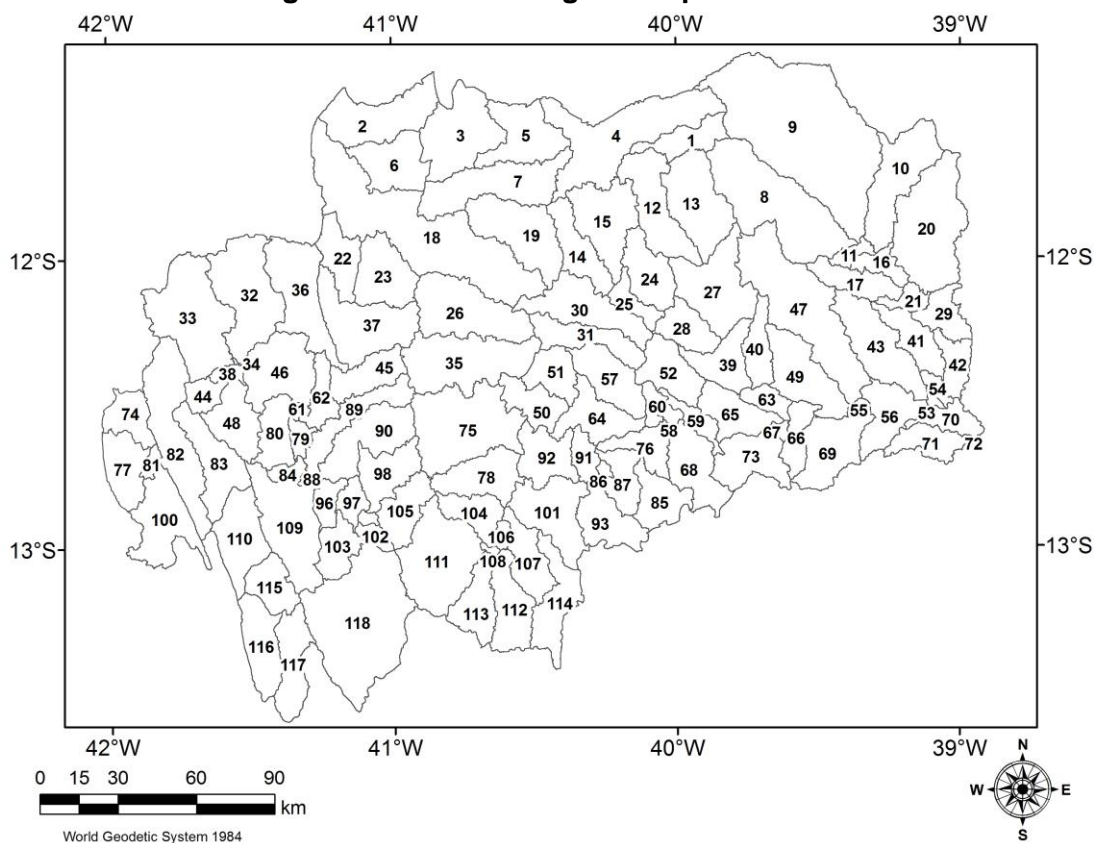
Fonte: Santos, 2013

2.4 Calibração e Validação do Modelo Hidrológico

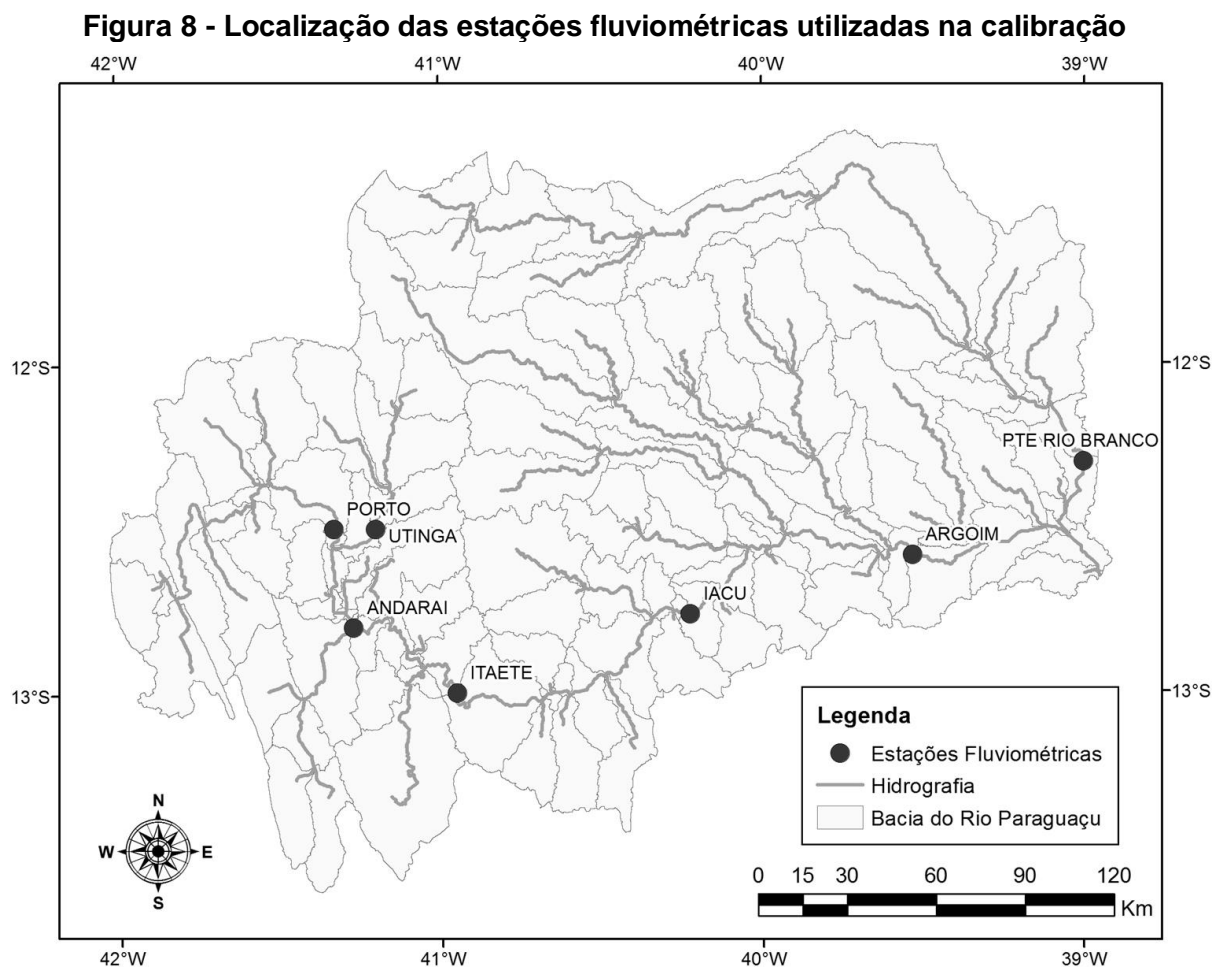
Após todos os dados necessários serem carregados no modelo, é necessário definir o período de simulação e se a saída será fornecida em intervalo de tempo diário, mensal ou anual. Os 31 anos de dados foram divididos da seguinte forma: 3 anos para aquecimento do modelo (1960 a 1962); 14 anos para calibração (1963 a 1976); e 14 anos para validação (1977 a 1990). A bacia foi dividida em 118 sub-bacias (ver **Figura 7**). Para subdividir as sub-bacias utilizou-se o método da HRU dominante, onde para cada uma das sub-bacias o modelo atribui apenas uma HRU, resultando em 118 unidades de resposta. O método aplicado para o cálculo da evapotranspiração potencial foi o *Penman-Monteith*.

Para a calibração, foram utilizados um total de 15 parâmetros, sendo 6 de águas subterrâneas, 3 de solos, 3 de HRU, 2 de canais e 1 de uso do solo. O ajuste dos parâmetros foi feito de montante para jusante, iniciando no posto mais a montante na bacia (Porto) e terminando no posto mais a jusante (Argoim) (ver **Figura 8**). Posteriormente realizou-se a calibração para o posto fluviométrico Ponte do Rio Branco, localizado no rio Jacuípe.

Figura 7 - Sub-bacias geradas pelo SWAT



Fonte: Autor



Fonte: Autor

A calibração foi realizada manualmente, utilizando o método de tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo e análise dos resultados. A cada tentativa buscou-se analisar o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência. Os métodos estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo aos dados observados foram o coeficiente de *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) e o Percentual de Tendência (PBIAS), conforme indicado por Moriasi *et al.* (2007). Nas Equações 6 e 7 são apresentadas as formulações para se calcular o NSE e o PBIAS, respectivamente.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{med})^2} \right] \quad (6)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \right] \quad (7)$$

Onde: Q_{obs} é a vazão observada; Q_{sim} é a vazão simulada; e Q_{med} é a média das vazões observadas.

De acordo com Moriasi *et al.* (2007), o NSE pode variar entre menos infinito e 1,0, sendo NSE igual a 1,0 o valor ótimo. Valores entre 0,0 e 1,0 geralmente são vistos como níveis de desempenho aceitáveis e valores menores ou iguais a 0,0 indicam que a média dos dados observados pode fornecer uma melhor previsão do que os valores simulados pelo modelo. Quanto ao PBIAS, seu valor ótimo é de 0,0, baixas magnitudes indicam boa precisão na simulação do modelo. Valores positivos indicam tendência percentual do modelo de subestimação e valores negativos indicam tendência percentual de superestimação (GUPTA *et al.*, 1999).

Na **Tabela 3** são apresentadas as faixas recomendadas para cada uma das estatísticas utilizadas e uma avaliação de desempenho do modelo com base nesses valores, em escala mensal.

Tabela 3 - Avaliação de desempenho geral para as estatísticas recomendadas em escala mensal

Avaliação de Desempenho	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.*, 2007

2.5 Definição dos Cenários de Mudanças Climáticas

Os cenários de emissão representam uma visão possível das emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis, sendo baseados numa combinação coerente e consistente de previsões sobre demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (TUCCI E BRAGA, 2003).

O IPCC baseou-se em quatro projeções diferentes de emissão de gases de efeito estufa para o futuro. Os cenários foram definidos no *Special Report on Emissions Scenarios* - SRES em, basicamente, quatro famílias:

- Cenário A1: representa um mundo futuro onde a globalização é dominante, apresentando crescimento econômico muito rápido, população atingindo o pico em meados do século e desenvolvimento rápido de tecnologias eficientes. Divide-se em A1, A1F (máximo uso de combustível fóssil) e A1T (mínimo uso de combustível fóssil).
- Cenário A2: descreve um mundo futuro heterogêneo onde a regionalização é dominante, com alto crescimento populacional, lento desenvolvimento econômico e mudanças tecnológicas lentas.
- Cenário B1: apresenta rápidas mudanças na estrutura econômica mundial, com ênfase em soluções globais à sustentabilidade social e ambiental e na inserção de tecnologias limpas.
- Cenário B2: descreve um mundo com uma população intermediária e ênfase nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental.

Neste trabalho foram selecionados os cenários A2 (altas emissões) e B2 (baixas emissões) descritos anteriormente para projetar as condições climáticas. Os produtos dos modelos climáticos foram utilizados como condição de contorno no SWAT para simular a resposta da bacia diante desses cenários de emissões.

2.6 Definição dos Modelos Climáticos

As projeções climáticas na região de estudo foram obtidas mediante aplicação do modelo MAGICC/SCENGEN, (*Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change/SCENario GENERator*) versão 5.3, que considera as principais diretrizes estabelecidas pelo AR4 do IPCC. Este modelo tem sido usado para gerar projeções futuras de temperatura média global e nível médio do mar (WIGLEY, 2008).

O MAGICC baseia-se nos cenários do IPCC e dos Modelos de Circulação Global (MCG) para projetar as futuras concentrações de gases de efeito estufa, temperatura média global e nível médio do mar. Os dados de modificação na temperatura média são utilizados pelo SCENGEN para gerar os cenários de mudanças climáticas a partir de um banco de dados de resultados dos MCGs e utilizando o método *pattern scaling* descrito em Santer *et al.* (1990). Os resultados das projeções para cada cenário são dados em termos de variação na precipitação (%) e temperatura (°C) para cada mês do ano, e são apresentados em uma grade

de 2,5 x 2,5° que cobre todo o planeta. Os modelos climáticos utilizados pelo SCENGEN são apresentados na **Tabela 11** (em Anexo).

Para definir os modelos que melhor representam o clima na região de estudo foi empregada a metodologia apresentada por Wigley (2008) e descrita por Bravo *et al.* (2012), que consiste em:

1. Calcular as medidas de desempenho para avaliar representação do clima atual;
2. Ordenar os modelos em função de cada uma dessas medidas de desempenho;
3. Analisar cada medida de desempenho da seguinte forma: os sete modelos que apresentaram os melhores valores recebem ranking igual a 1 e os sete piores recebem ranking igual a -1. Os restantes seis modelos recebem ranking igual a 0;
4. Para cada modelo, somar os rankings atribuídos em função de cada medida de desempenho obtendo um ranking final;
5. O conjunto de “melhores” modelos será integrado pelos sete modelos que apresentaram os maiores valores de ranking final, obtido no item 4;
6. O conjunto dos “piores” modelos é integrado pelos sete modelos que apresentaram os piores valores de ranking final, obtido no item 4.

A variável que será utilizada para caracterizar o clima atual será a precipitação Anual. As medidas de desempenho analisadas serão: (1) Correlação; (2) *Root Mean Square Error* - RMSE e (3) BIAS. Essas estatísticas são calculadas comparando as saídas de cada modelo com a base de dados observados contida no SCENGEN.

2.7 Projeções de Anomalias na Precipitação

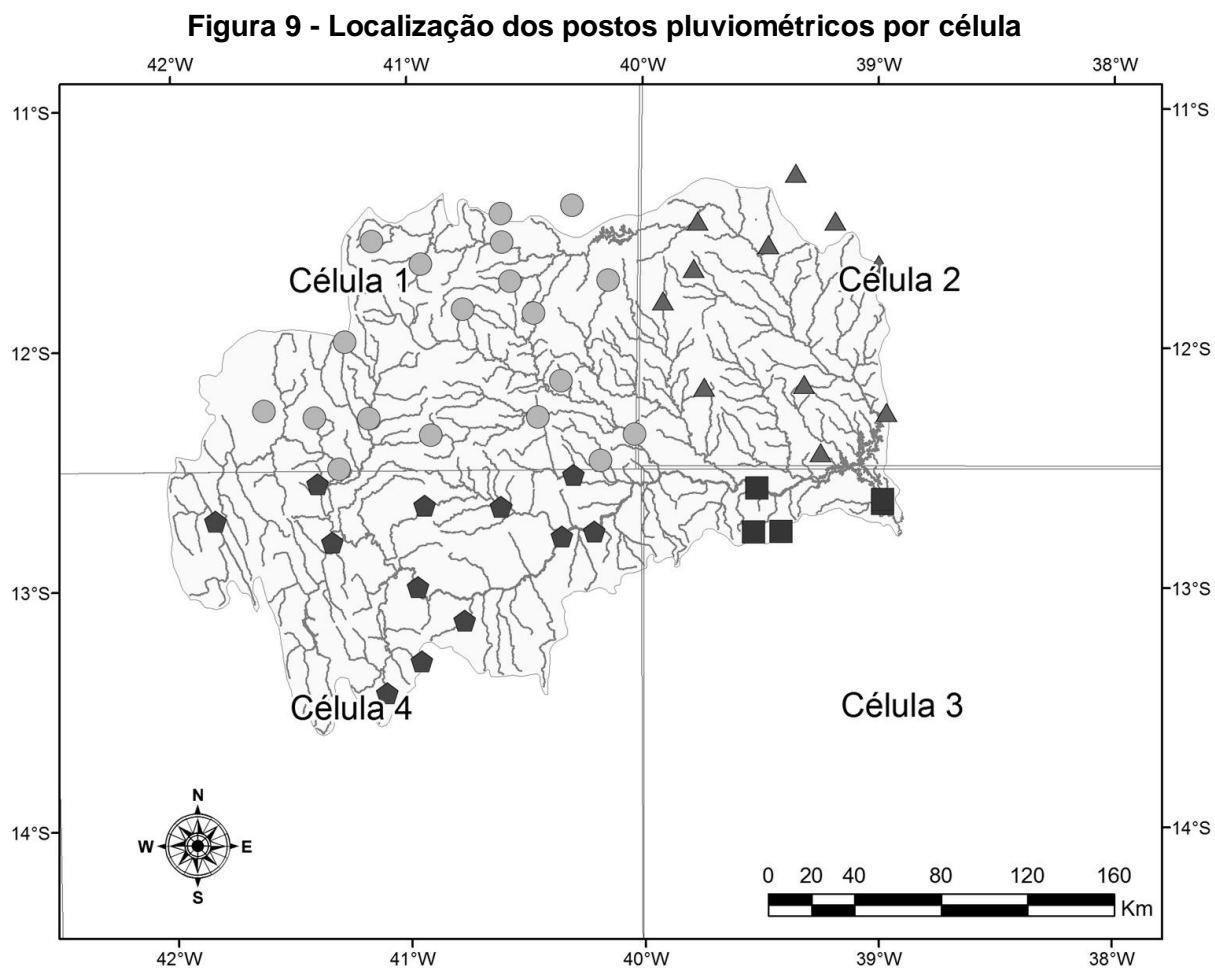
Para cada um dos cenários de emissão de gases previamente definidos foram simuladas as projeções de anomalias na precipitação média mensal com base na média dos 7 modelos climáticos selecionados. As simulações climáticas consideraram dois futuros: o futuro próximo, janela de 30 anos centrada no ano de 2030; e o futuro longo, janela de 30 anos centrada no ano de 2070, seguindo a metodologia descrita por Bravo *et al.* (2012). Foram realizadas um total de 48 simulações no sistema MAGICC/SCENGEN.

Devido a resolução do SCENGEN, a bacia do rio Paraguai compreendeu 4 células climáticas, resultando em diferentes valores de anomalia por célula. Dessa forma, as séries históricas de precipitação, no período de 1960 a 1990, obtidas nas

estações pluviométricas foram perturbadas em função dos valores das anomalias estimadas nos cenários de mudança climática, da seguinte forma:

1. Os postos pluviométricos foram agrupados de acordo com a célula climática na qual estão localizados (ver **Figura 9**);
2. Todos os dias de todos os janeiros da série histórica de precipitação de cada posto foram multiplicados por $1 + \Delta P_{jan}$, onde ΔP_{jan} corresponde a anomalia estimada na precipitação em suas respectivas células;
3. A etapa anterior foi repetida para todos os meses do ano e todos os 47 postos.

Todas as etapas descritas acima foram repetidas para as duas janelas (2030 e 2070) e para os dois cenários (A2 e B2), resultando em 188 séries sintéticas de precipitação diária.



Fonte: Autor

2.8 Simulação dos Cenários

Com o modelo calibrado e representando bem a resposta da bacia, foram feitas as simulações para os cenários anteriormente definidos. Para isso, foram inseridas séries sintéticas de precipitação, resultando em duas simulações para cada cenário de mudança climática (uma para cada futuro). Após as simulações, realizou-se as análises dos resultados obtidos e comparações entre os cenários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem Hidrológica

Na **Tabela 4** são apresentados os parâmetros e as faixas de valores obtidos para cada um deles na calibração do modelo.

Tabela 4 - Faixa de valores dos parâmetros obtidos durante a calibração

Tipo	Parâmetro	Descrição	Valores			
			Mín	Máx	Média	Desvio Padrão
Água subterrânea	ALPHA_BF	Fator de recessão do escoamento de base (dias)	0,01	0,048	0,031	0,019
	REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação (mm)	0,001	0,008	0,002	0,002
	GW_REVAP	Coeficiente de reevaporação da água subterrânea	0,05	0,98	0,27	0,28
	GW_DELAY	Tempo de retardo do escoamento subterrâneo (dias)	50	500	313,98	207,44
	GWQMIN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno (mm)	0	5000	3856,95	2107,43
	RCHG_DP	Fração de percolação para aquífero profundo	0,05	0,50	0,28	0,16
Solo	SOL_Z	Profundidade do solo (mm)	6,75	450	216,92	164,06
	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)	20,65	645,72	109,19	172,22
	SOL_AWC	Capacidade de água disponível na camada do solo (mm/mm)	0,07	0,23	0,15	0,05
HRU	ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo	0,10	0,95	0,57	0,43
	HRU_SLP	Declividade média da HRU (m/m)	0,025	1	0,15	0,17
	SLSUBBSN	Comprimento média da declividade (m)	9,15	182,93	59,40	47,05
Canal	CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal principal	0,056	0,056	0,056	0
	CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva para o canal principal (mm/hr)	0	2	0,9	1,0
Uso do solo	CN2	Valor da curva número (CN) do método do Soil Conservation Service (SCS)	39,5	56,5	48,87	5,21

Através de uma análise da **Tabela 4**, é possível perceber que existe uma grande variação nos valores dos parâmetros ao longo da bacia em estudo. Entretanto, como se trata de uma região que possui uma grande heterogeneidade física e climática, essa variação era esperada.

Devido a indisponibilidade de dados observados de profundidade do solo, o parâmetro *SOL_Z* foi ajustado para que o modelo pudesse representar melhor as características da bacia, como o solo raso na porção da bacia localizada na região do semiárido. Esse parâmetro se mostrou bastante sensível, ocasionando grandes mudanças no hidrograma calculado a medida em que o parâmetro aumentava ou diminuía.

Na **Tabela 5** são apresentados os valores das estatísticas obtidas na calibração diária para cada uma das estações fluviométricas utilizadas.

Tabela 5 - Estatísticas dos ajustes obtidos na calibração diária para cada estação fluviométrica

	Porto	Utinga	Andaraí	Itaeté	Iaçu	Argoim	Ponte Rio Branco
NSE	0,31	0,41	0,31	0,50	0,57	0,60	0,40
PBIAS	16,56	13,43	-13,94	37,86	15,76	1,11	-13,80

Analisando a **Tabela 5** e a **Figura 8** é possível perceber que a medida em que aumenta-se a área de drenagem, as estatísticas vão melhorando, sendo que os piores ajustes ocorreram na estação Porto e Andaraí (NSE=0,31), e o melhor ajuste ocorreu para a estação Argoim (NSE=0,60), mais próxima ao exutório da bacia.

Como o SWAT é um modelo bastante robusto, considerando vários processos e necessitando ser alimentado por um grande número de informações, a medida em que se diminui a área de drenagem são necessárias informações mais detalhadas para que o modelo consiga representar bem a realidade local. Isso ocorre porque em pequenas bacias os fenômenos hidrológicos se processam de maneira mais instantânea com uma dinâmica maior. Por outro lado, em áreas de drenagem maiores, com centenas de quilômetros quadrados, ocorre amortização dos processos hidrológicos relacionados à dinâmica da água no solo e são mais destacados os fenômenos de propagação do escoamento sobre a superfície e na

rede de drenagem. Essas características resultaram em um melhor ajuste do modelo para bacias maiores. Conclusão semelhante foi obtida por Neto *et al.* (2014).

Nas **Figura 10** e **Figura 11** são apresentados os hidrogramas e as estatísticas para calibração e validação diária para a estação Argoim.

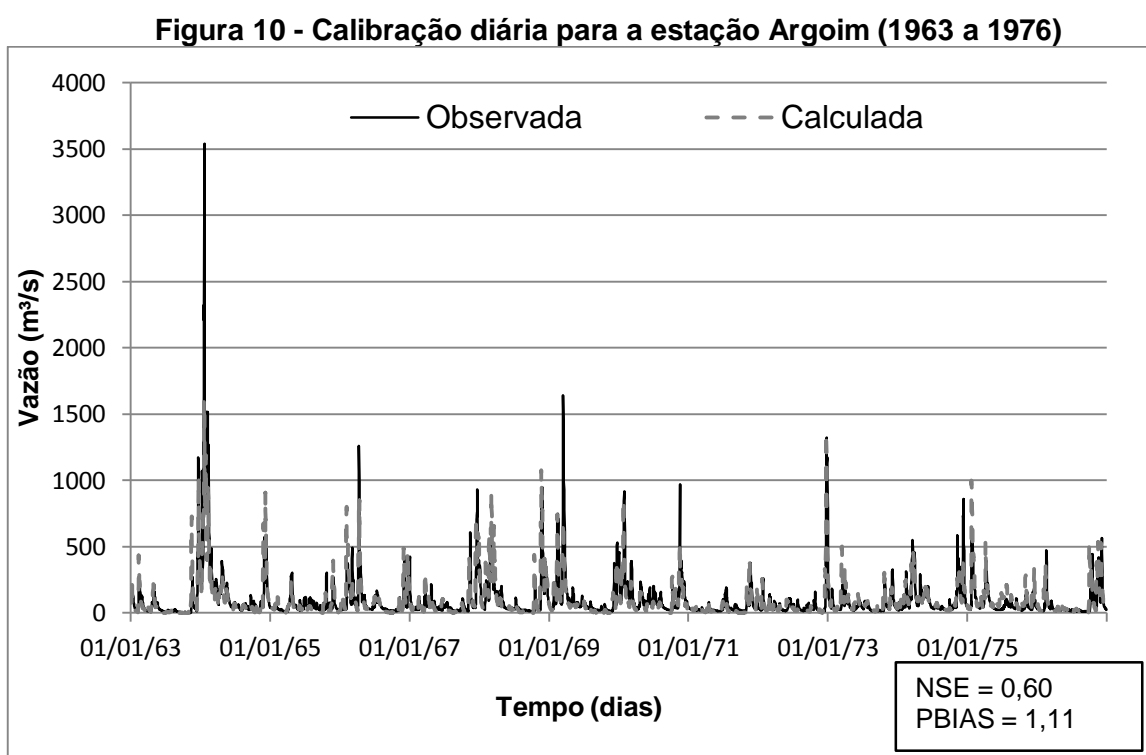
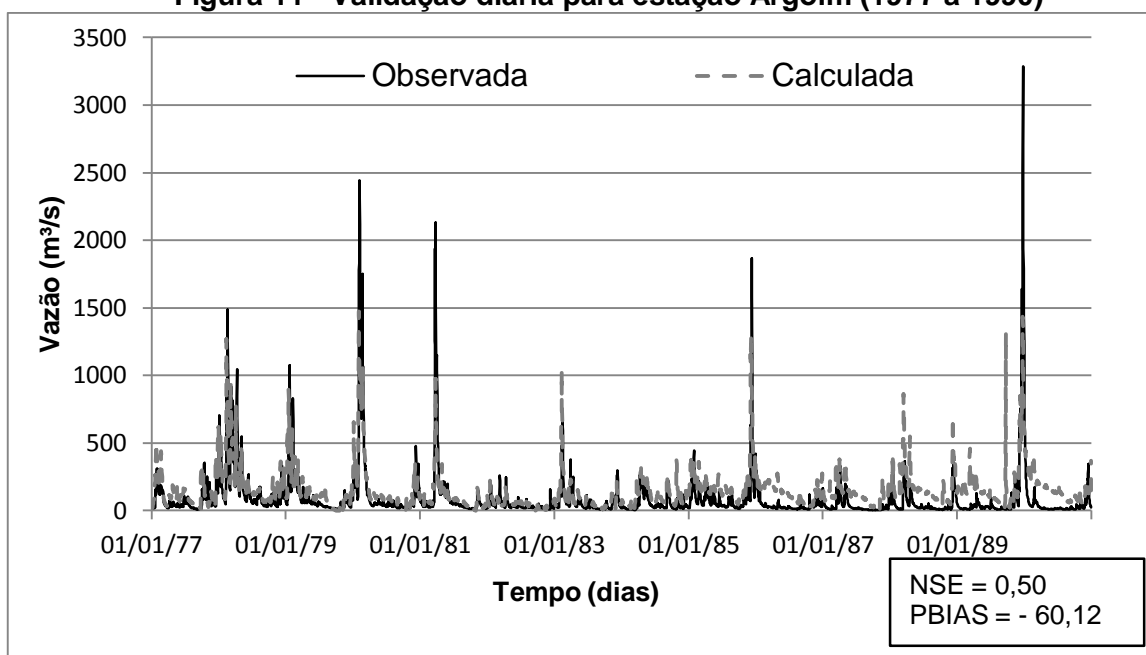


Figura 11 - Validação diária para estação Argoim (1977 a 1990)



Fonte: Autor

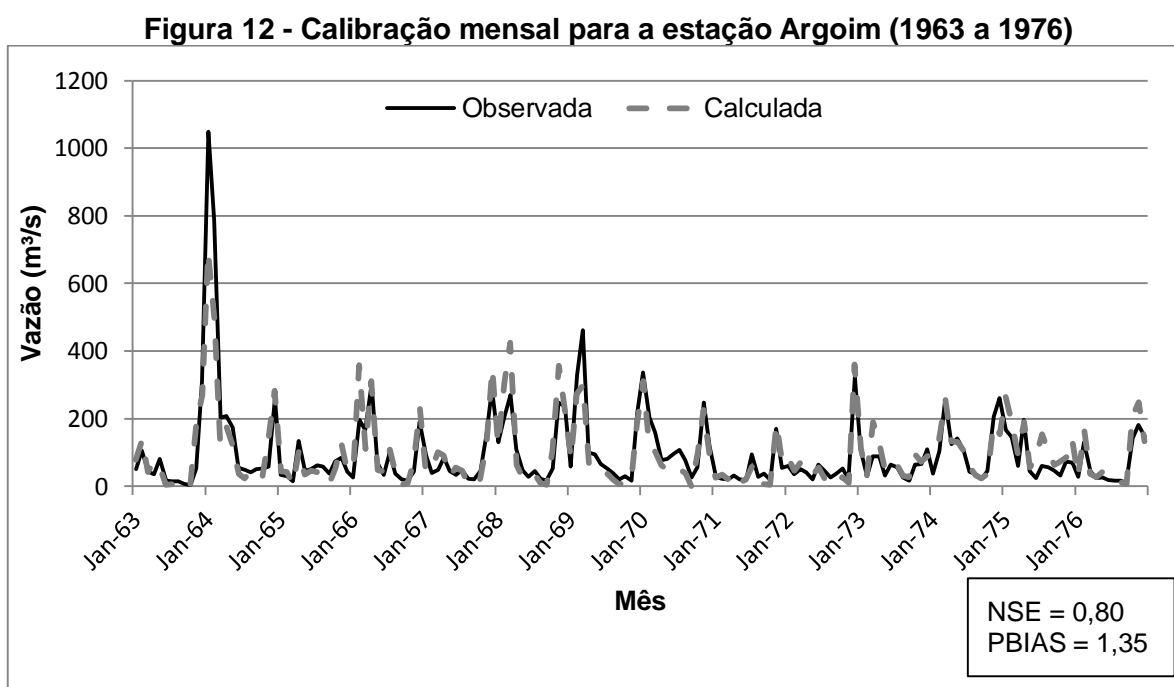
Analisando a **Figura 10** podemos perceber que alguns picos foram subestimados, o que também pode ser evidenciado pelo valor obtido pelo PBIAS. De acordo com as faixas recomendadas por Moriasi *et al.* (2007), o desempenho do modelo pode ser classificado como satisfatório (NSE=0,60) e muito bom (PBIAS=1,11).

Como os picos não ficaram bem ajustados, o NSE não ficou tão bom, uma vez que essa estatística é bastante sensível às vazões máximas. Porém, o valor obtido indica que o modelo teve uma performance aceitável em representar a bacia do rio Paraguaçu. Já o PBIAS nos mostra uma pequena tendência de subestimação das vazões calculadas pelo modelo. Entretanto, como o valor obtido foi próximo de zero, a performance do modelo pode ser avaliada como muito boa, de acordo com Moriasi *et al.* (2007).

Para o período utilizado para validação, as estatísticas calculadas atribuíram uma classificação satisfatória para o NSE (0,50) e insatisfatória para o PBIAS (-60,12). Se analisarmos a **Figura 11** podemos perceber que houve uma subestimação dos picos, resultando numa diminuição do NSE, e superestimação das vazões de

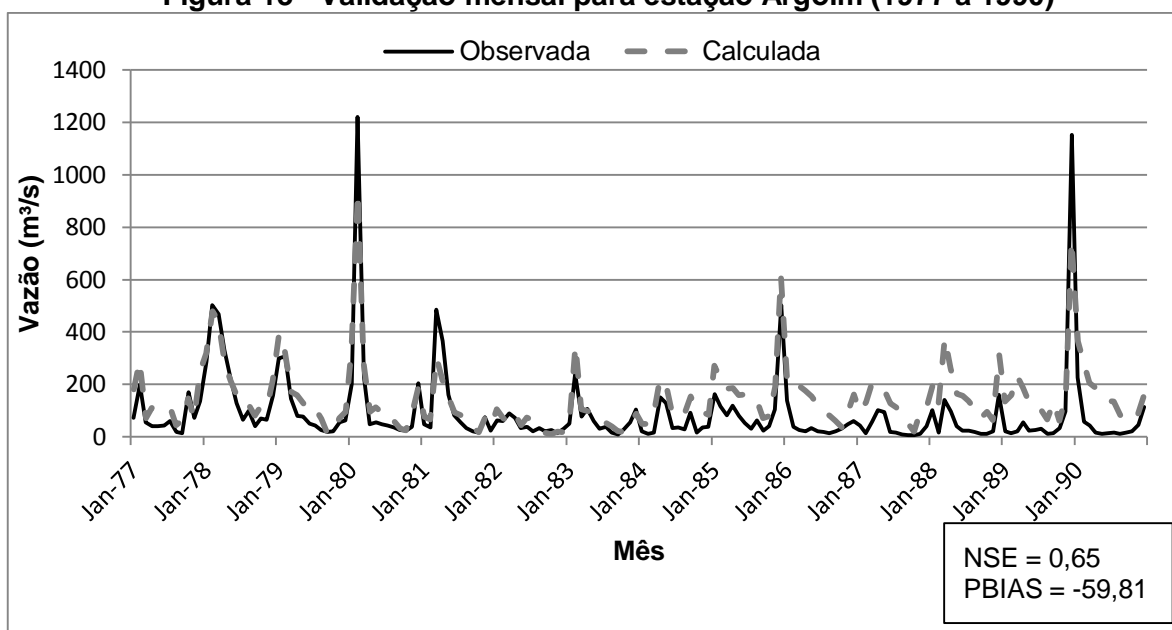
base da ordem de 60%, representada pelo valor negativo do PBIAS. Também é possível perceber uma modificação no padrão do hidrograma a partir do ano de 1984. Essa mudança pode ter sido ocasionada devido a alguma alteração no uso do solo ocorrida neste período, na região a montante da bacia. Wang *et al.* (2014) verificou que essas modificações no uso do solo provocam grandes alterações nos processos hidrológicos, resultando em impactos significativos na geração de vazão da bacia.

Nas **Figura 12** e **Figura 13** são apresentados os hidrogramas e as estatísticas para calibração e validação mensal.



Fonte: Autor

Figura 13 - Validação mensal para estação Argoim (1977 a 1990)



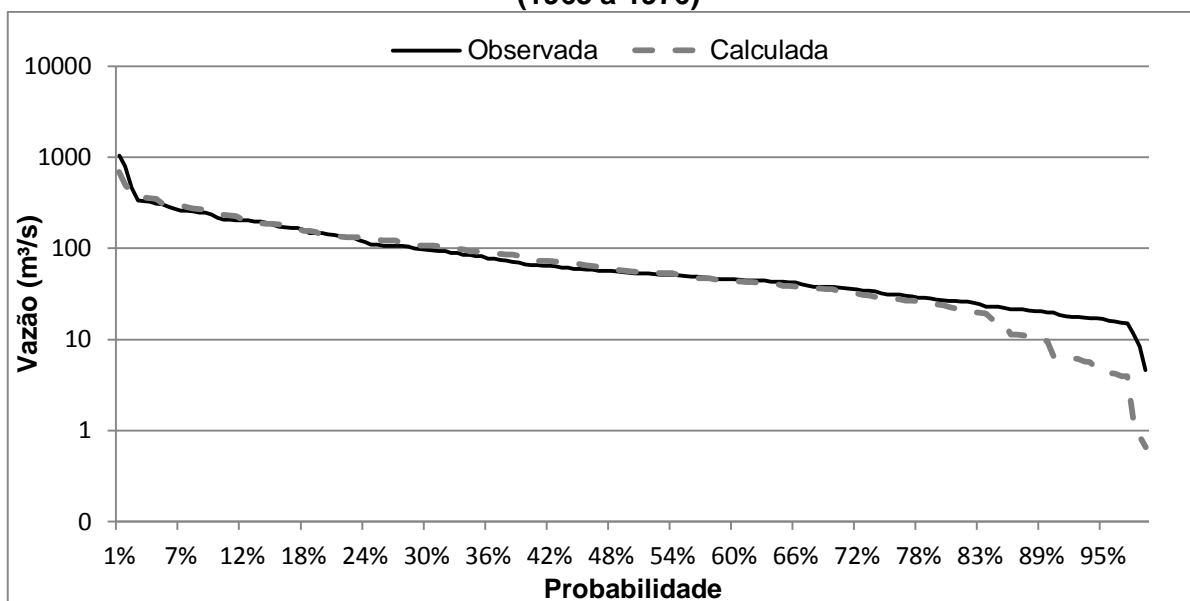
Fonte: Autor

Verifica-se que na calibração mensal, tanto o NSE quanto o PBIAS tiveram uma melhora significativa em relação a calibração realizada em escala diária, passando para 0,80 e 1,35, respectivamente. Na validação em escala mensal também houve melhora nas duas estatísticas. O NSE aumentou de 0,50 para 0,65, enquanto o PBIAS passou de -60,12 para -59,81, mantendo a tendência de superestimação das vazões geradas.

Os valores do NSE obtidos na calibração e validação diárias para a estação Argoim foram idênticos aos obtidos por Zhang *et al.* (2014). Esses valores mais baixos para NSE diário do que para o mensal já eram esperados, uma vez que diversos trabalhos (e.g. PETERSON E HAMLETT, 1998; VARANOU *et al.*, 2002; JAIN *et al.*, 2010; GASSMAN *et al.*, 2014) tem demonstrado que as previsões de vazões diárias do SWAT não são tão boas quanto as previsões mensais.

Na **Figura 14** são apresentadas as curvas de permanência mensais observadas e calculadas, em escala logarítmica.

Figura 14 - Curva de permanência mensal para estação Argoim, no período calibrado (1963 a 1976)

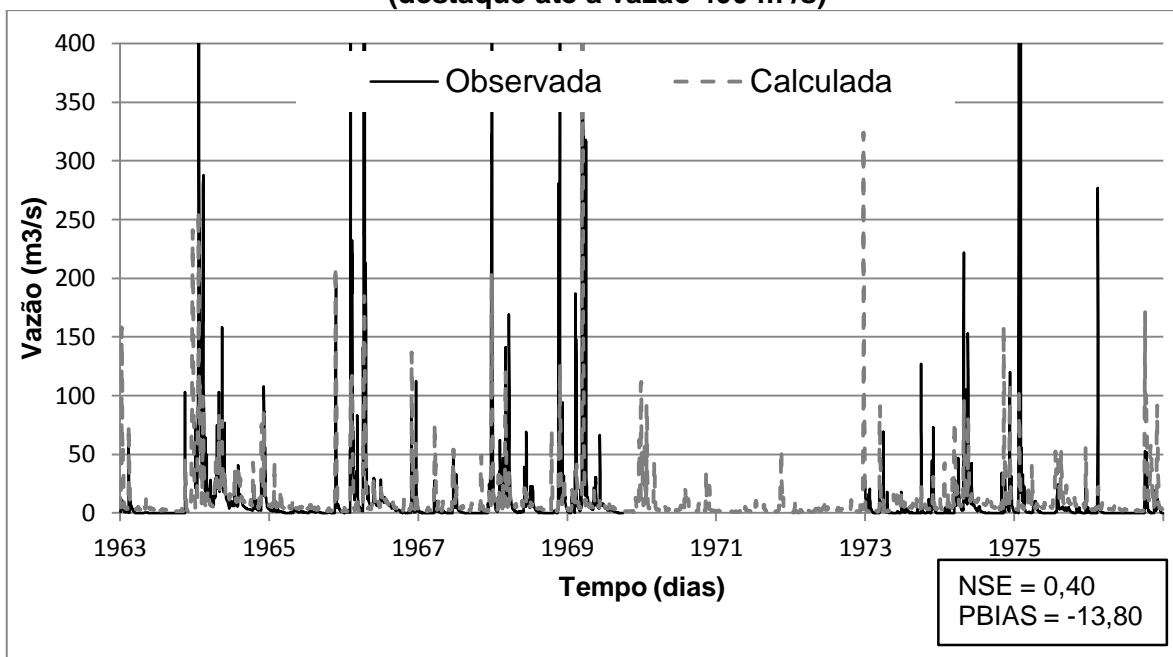


Fonte: Autor

Através de uma análise da **Figura 14** percebe-se que houve um bom ajuste das vazões máximas e médias. Já para vazões mínimas, com permanência maior que 80%, o ajuste não foi bom. Como consequência, a avaliação da vazão com 90% de permanência, tomada como referência para concessão da outorga de uso da água no Estado da Bahia, fica prejudicada.

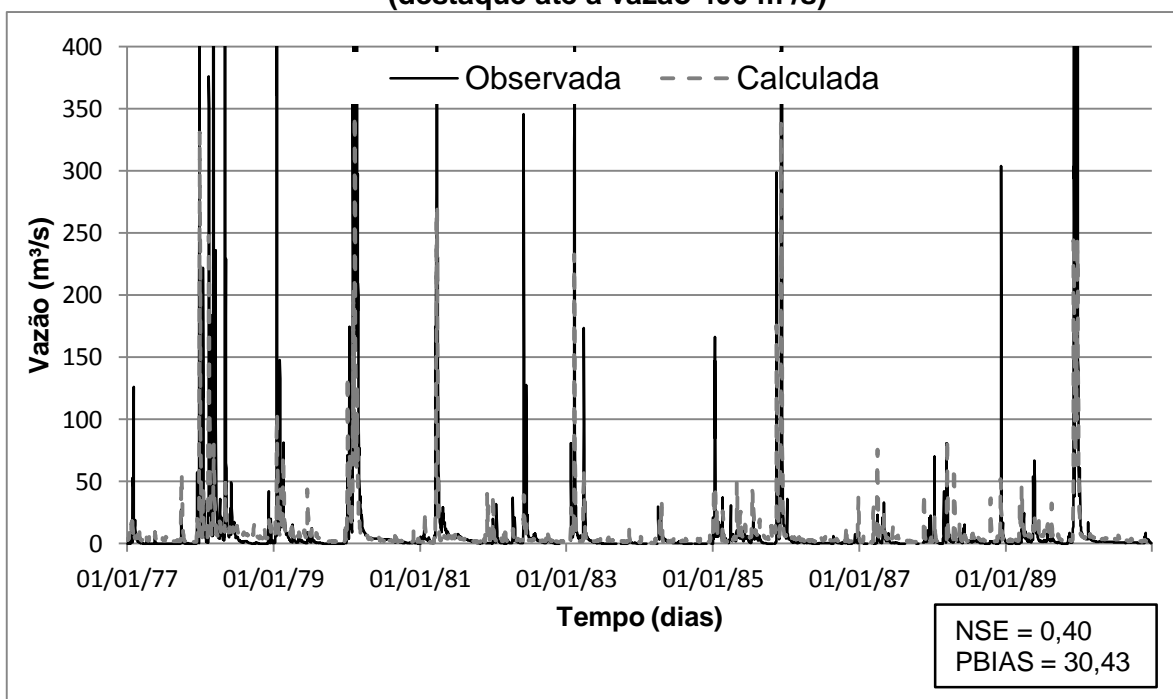
Na calibração diária para a estação Ponte Rio Branco, localizada na região cortada pelo rio Jacuípe, os ajustes não foram tão bons, resultando num NSE=0,40 (insatisfatório) e PBIAS=-13,80 (bom). Na validação, o NSE manteve o mesmo valor (0,40) e o PBIAS aumentou (PBIAS=30,43). As **Figura 15** e **Figura 16** apresentam os hidrogramas obtidos na calibração e validação, respectivamente, para a estação Ponte Rio Branco.

Figura 15 - Calibração diária no período de 1963 a 1976 para estação Ponte Rio Branco (destaque até a vazão 400 m³/s)



Fonte: Autor

Figura 16 - Validação no período de 1977 a 1990 para a estação Ponte Rio Branco (destaque até a vazão 400 m³/s)

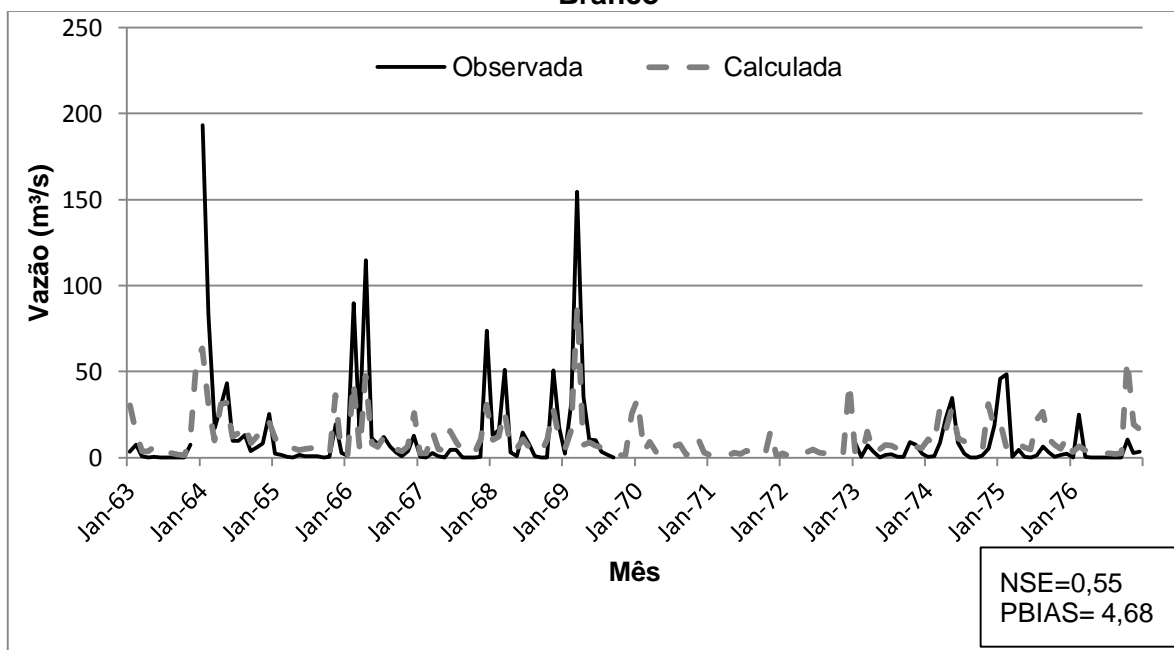


Fonte: Autor

Através de uma análise das **Figura 15** e **Figura 16**, pode-se perceber que os picos não foram bem ajustados, evidenciando um NSE baixo (0,40). Na calibração, mesmo com os picos subestimados, houve uma tendência de superestimação das vazões (representada pelo PBIAS negativo), uma vez que as vazões de base estão acima das observadas. Na validação, o índice PBIAS indicou uma tendência de subestimação das vazões calculadas da ordem de 30%.

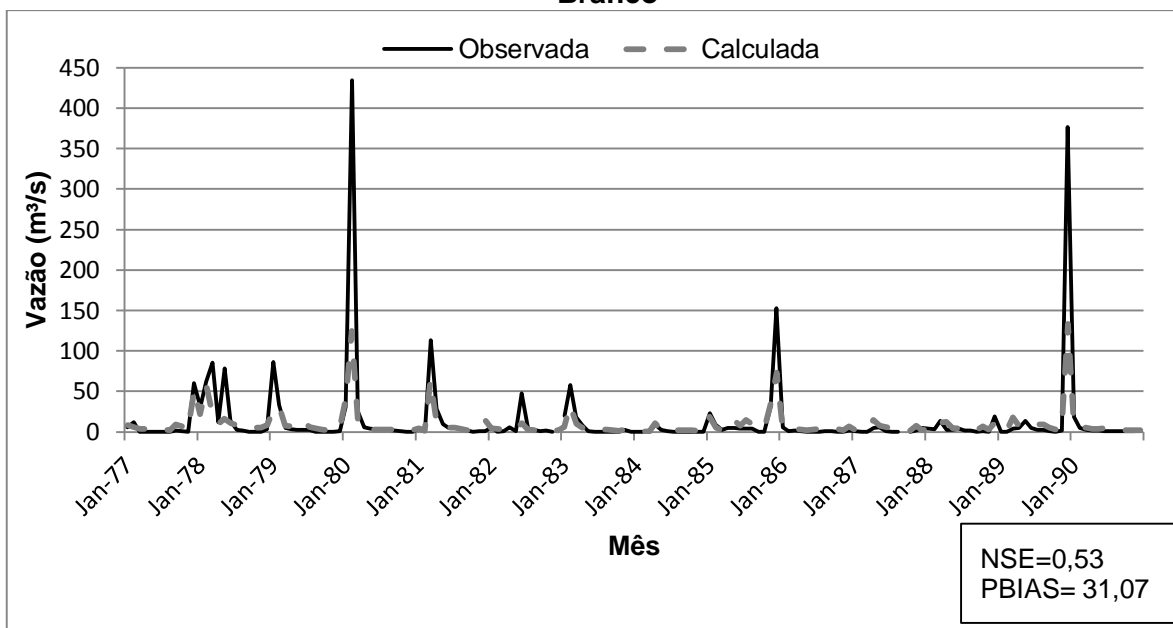
Nas **Figura 17** e **Figura 18** são apresentados os hidrogramas e as estatísticas obtidas na calibração e validação mensal para a estação Ponte Rio Branco.

Figura 17 - Calibração mensal no período de 1963 a 1976 para estação Ponte Rio Branco



Fonte: Autor

Figura 18 - Validação mensal no período de 1977 a 1990 para a estação Ponte Rio Branco



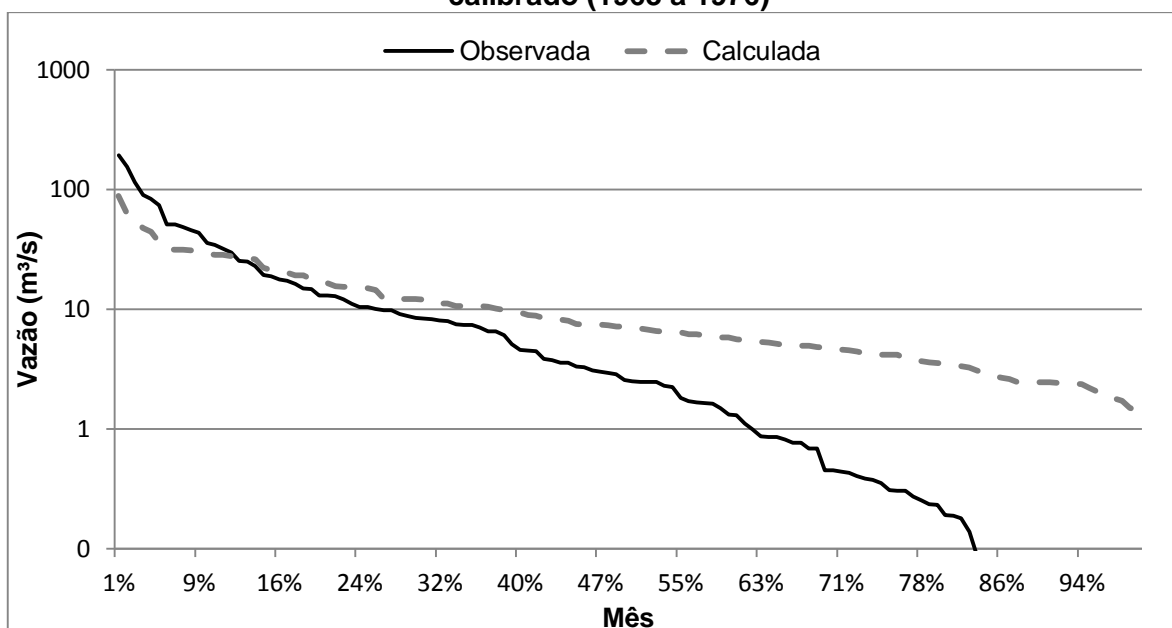
Fonte: Autor

Avaliando as **Figura 17** e **Figura 18** pode-se perceber que, assim como verificado na estação Argoim, as estatísticas melhoraram bastante quando o modelo passou a operar em escala mensal. Na calibração, o NSE aumentou para 0,55, indicando um desempenho satisfatório do modelo. O PBIAS diminuiu para 4,68, sendo avaliado como muito bom, conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

Para o período de validação também pode-se perceber uma melhora do modelo em relação ao NSE, que passou de 0,40 (escala diária) para 0,53. Já o PBIAS variou pouco, aumentando para 31,07, mantendo a tendência de subestimação das vazões. Destaca-se que no rio Jacuípe, a montante da estação Ponte do Rio Branco, está localizado o reservatório de São José do Jacuípe (construído na década de 1980), destinado ao atendimento das demandas de abastecimento e irrigação.

Na **Figura 19** são apresentadas as curvas de permanência mensais observadas e calculadas para a estação Ponte Rio Branco, em escala logarítmica.

Figura 19 - Curva de permanência mensal para estação Ponte Rio Branco, no período calibrado (1963 a 1976)



Fonte: Autor

Verifica-se através de uma análise da curva de permanência apresentada na **Figura 19** que os ajustes não foram bons para a Estação Ponte Rio Branco, principalmente em relação as vazões mínimas. Fontes *et al.* (2010) obtiveram resultados parecidos no que diz respeito a superestimação das vazões pelo SWAT, evidenciando que o modelo possui dificuldades em representar as interações entre o fluxo superficial e subterrâneo, com apresentação de retorno do escoamento de base com valores maiores que o observado na série histórica de vazão.

É importante ressaltar as limitações do modelo utilizado em representar as peculiaridades de rios de semiárido, como o rio Jacuípe, que são intermitentes, apresentando falha de conectividade em sua rede fluvial durante longos períodos do ano. Além disso, Fontes *et al.* (2010) e Genz *et al.* (2012) atestam que nessa região em especial os dados são escassos e de baixa qualidade.

3.2 Definição dos Modelos Climáticos e Projeções de Anomalias

A **Tabela 6** apresenta o desempenho de cada modelo em representar a precipitação anual para a região onde se localiza a bacia do rio Paraguaçu. Na **Tabela 7** são apresentados os conjuntos de melhores e piores modelos, de acordo com a metodologia que foi aplicada.

Tabela 6 - Desempenho dos modelos em representar a precipitação anual da região analisada

MODELO	CORREL	Ranking	MODELO	RMSE	Ranking	MODELO	BIAS	Ranking
CCCMA-31	0,866	1	MPIECH-5	0,162	1	GISS--EH	3,065	1
MPIECH-5	0,862	1	CCCMA-31	0,169	1	GISS--ER	1,345	1
NCARPCM1	0,858	1	MIROC-HI	0,417	1	CNRM-CM3	1,282	1
CNRM-CM3	0,650	1	FGOALS1G	0,510	1	NCARPCM1	1,178	1
CCSM--30	0,569	1	CCSM--30	0,576	1	BCCRBCM2	0,942	1
ECHO---G	0,549	1	MRI-232A	0,604	1	ECHO---G	0,938	1
INMCM-30	0,213	1	UKHADGEM	0,724	1	CCCMA-31	0,100	1
MIROC-HI	0,197	0	UKHADCM3	0,827	0	MPIECH-5	-0,115	0
UKHADCM3	0,051	0	MIROCMED	0,869	0	FGOALS1G	-0,230	0
CSIRO-30	-0,267	0	CSIRO-30	0,951	0	MIROC-HI	-0,352	0
GFDLCM20	-0,347	0	ECHO---G	0,954	0	UKHADGEM	-0,355	0
GISS--ER	-0,356	0	BCCRBCM2	1,022	0	CCSM--30	-0,460	0
MRI-232A	-0,405	0	NCARPCM1	1,22	0	MRI-232A	-0,478	0
GFDLCM21	-0,449	-1	GFDLCM20	1,276	-1	UKHADCM3	-0,710	-1
IPSL_CM4	-0,602	-1	CNRM-CM3	1,293	-1	MIROCMED	-0,770	-1
MIROCMED	-0,874	-1	GFDLCM21	1,497	-1	CSIRO-30	-0,913	-1
UKHADGEM	-0,893	-1	INMCM-30	1,626	-1	GFDLCM20	-1,222	-1
BCCRBCM2	-0,899	-1	GISS--ER	1,647	-1	GFDLCM21	-1,477	-1
GISS--EH	-0,903	-1	IPSL_CM4	1,823	-1	INMCM-30	-1,605	-1
FGOALS1G	-0,991	-1	GISS--EH	3,205	-1	IPSL_CM4	-1,800	-1

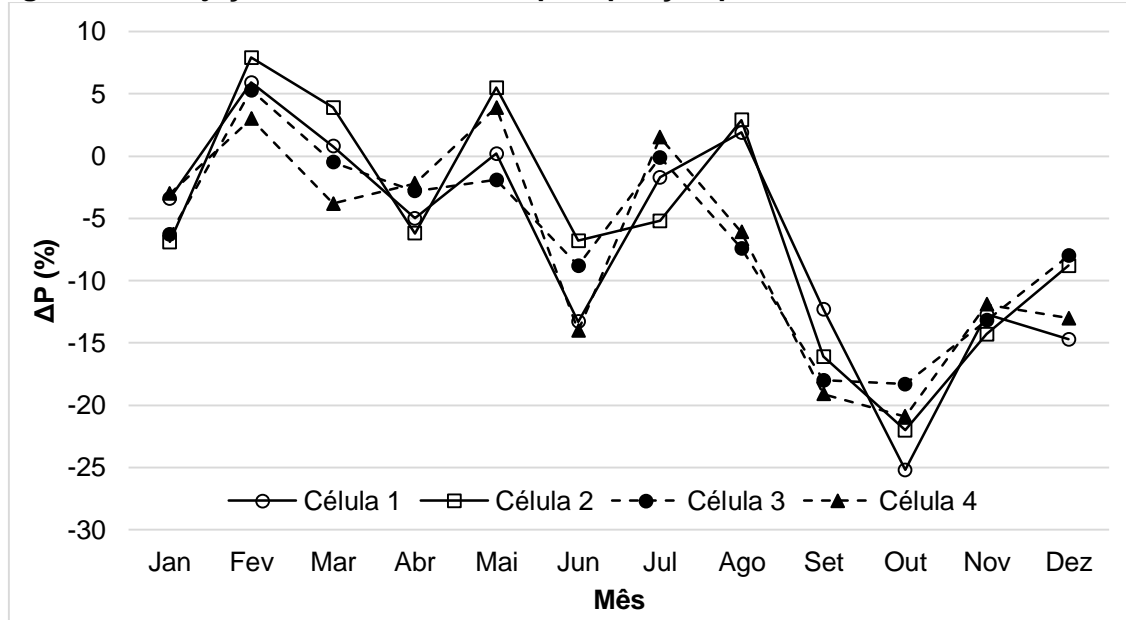
Tabela 7 - Melhores e piores modelos climáticos para representar a região analisada

Melhores modelos	Ranking Final	Piores modelos	Ranking Final
CCCMA-31	3	UKHADCM3	-1
MPIECH-5	2	CSIRO-30	-1
NCARPCM1	2	GISS--EH	-1
CCSM--30	2	GFDLCM20	-2
ECHO---G	2	MIROCMED	-2
CNRM-CM3	1	GFDLCM21	-3
MIROC-HI	1	IPSL_CM4	-3

Utilizando o conjunto dos 7 melhores modelos climáticos, foram obtidas as projeções de anomalias na precipitação para os dois cenários (A2 e B2) e os dois

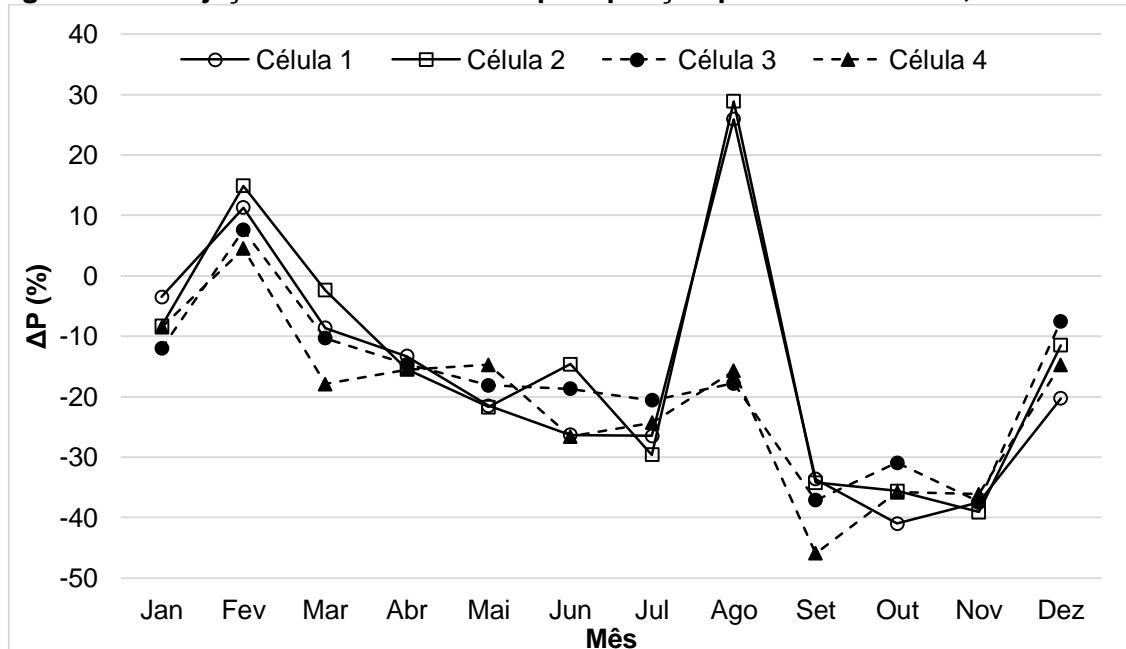
futuros (centrados em 2030 e 2070), para as quatro células climáticas na qual a bacia está inserida. Os resultados são apresentados nas **Figura 20** a **Figura 23**.

Figura 20 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário A2, ano de 2030



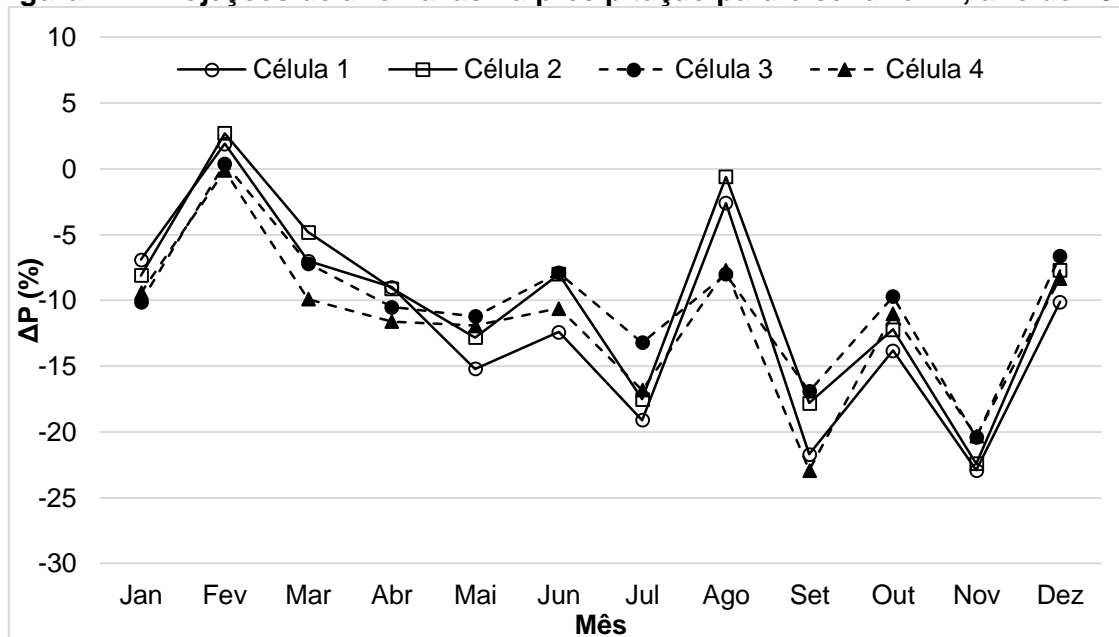
Fonte: Autor

Figura 21 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário A2, ano de 2070



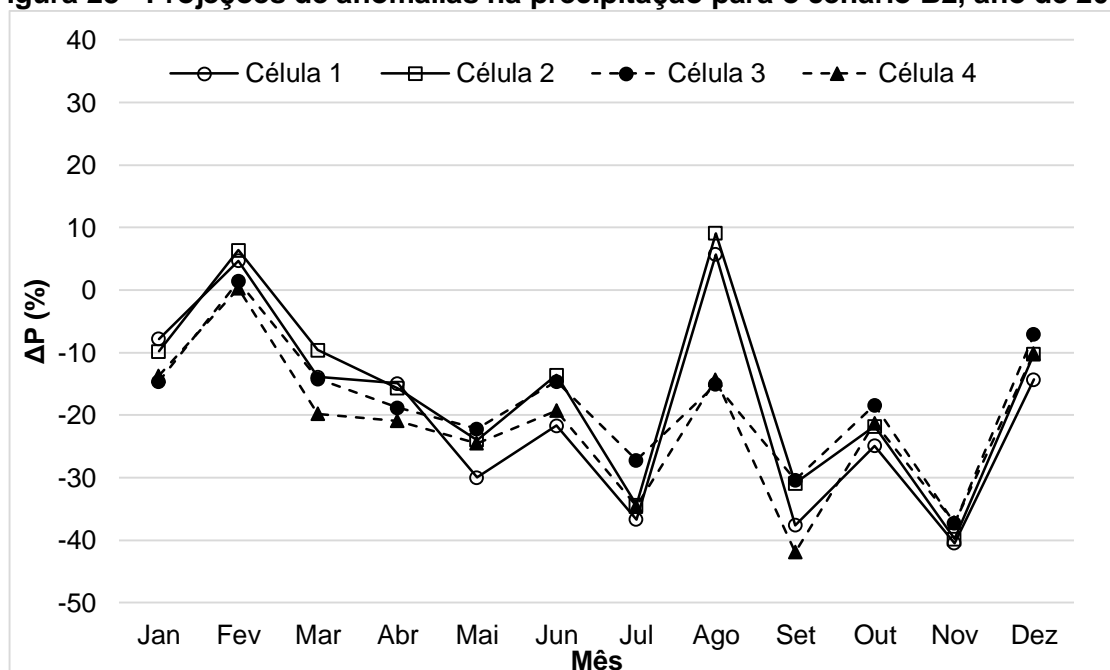
Fonte: Autor

Figura 22 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário B2, ano de 2030



Fonte: Autor

Figura 23 - Projeções de anomalias na precipitação para o cenário B2, ano de 2070



Fonte: Autor

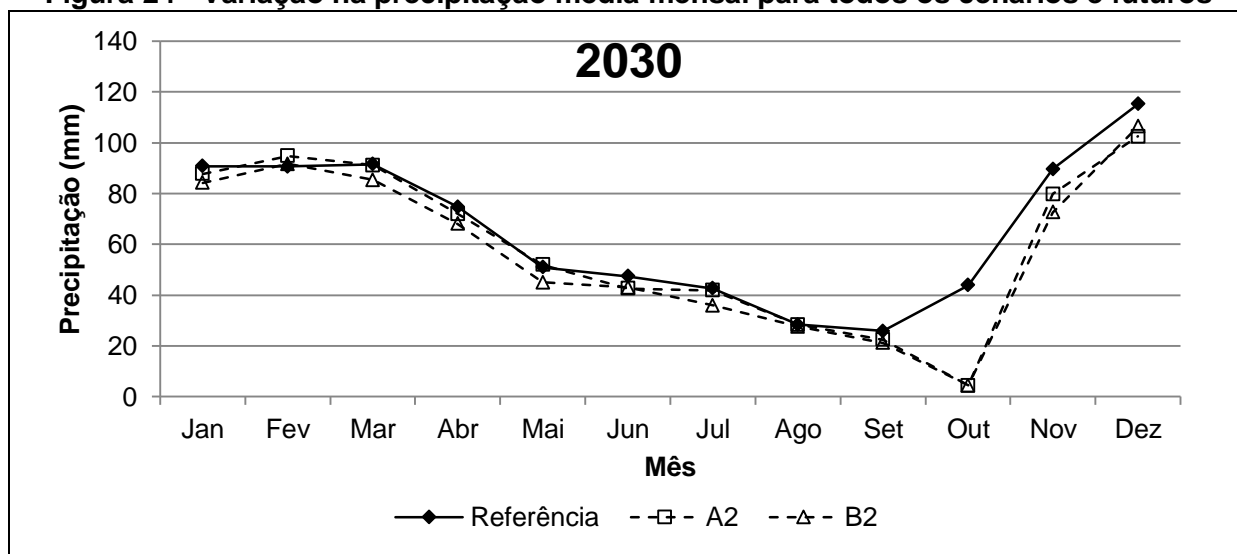
Avaliando as projeções de anomalias, percebe-se uma tendência da diminuição da precipitação ao longo do tempo, esperando-se uma maior diminuição para o futuro longo, centrado no ano de 2070. Observa-se também em quase todos os meses tendências semelhantes nas quatro células, com exceção do mês de agosto para o futuro longo dos dois cenários, onde as células 1 e 2 apresentaram uma tendência de aumento das precipitações.

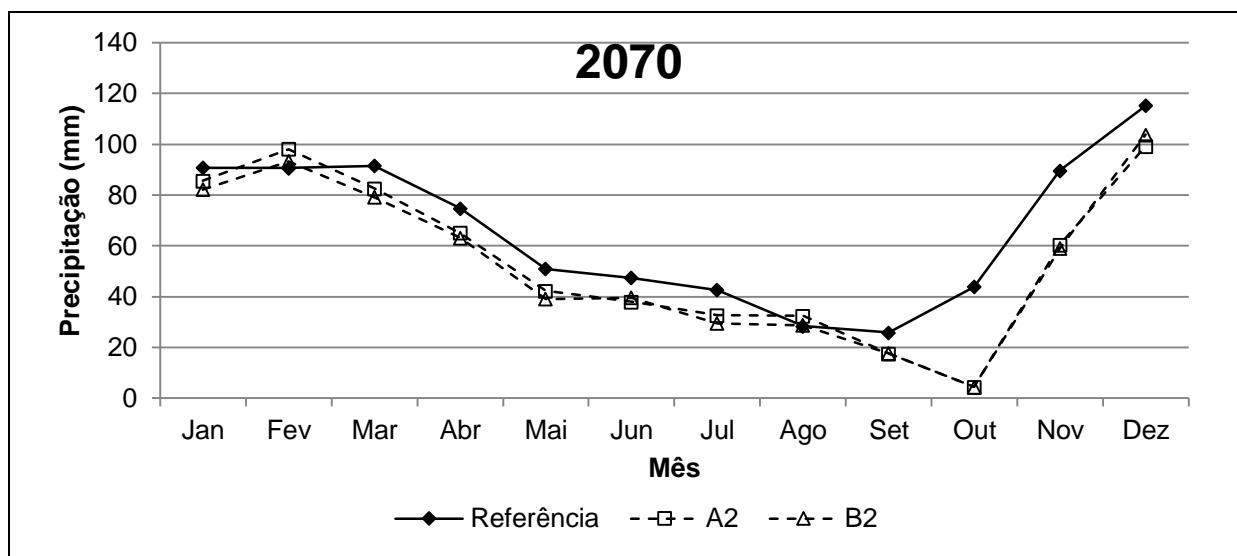
3.3 Simulação dos Cenários

3.3.1 Efeitos Sobre a Precipitação

Na **Figura 24** são exibidas as variações nas precipitações mensais, enquanto na **Tabela 8** são apresentadas as precipitações máximas, mínimas e médias anuais, e o desvio padrão para todos os cenários e futuros avaliados. Tomando como referência a precipitação média da bacia calculada pelo SWAT (com base nos dados observados das estações pluviométricas utilizadas), em todos os cenários e futuros analisados observou-se projeções de diminuição nas precipitações da bacia do rio Paraguai. Para o cenário A2, verificou-se uma diminuição de aproximadamente 9% da precipitação anual para o futuro próximo e 17% para o futuro longo. Para o cenário B2, as precipitações anuais diminuíram cerca de 13% no futuro próximo e 19% para o futuro longo. Esses resultados se mostraram bastante interessantes, uma vez que verificou-se uma maior diminuição na precipitação para o cenário de baixas emissões (B2).

Figura 24 - Variação na precipitação média mensal para todos os cenários e futuros





Fonte: Autor

Tabela 8 - Precipitações anuais na bacia do rio Paraguaçu

	Referência	2030		2070	
		A2	B2	A2	B2
Média	791,74	719,84	685,64	658,06	639,64
Máxima	1270,95	1179,22	1113,37	1078,24	1037,56
Mínima	460,45	424,41	403,91	388,45	377,66
Desvio Padrão	192,11	185,80	178,26	175,37	170,30

Analisando as precipitações médias mensais podemos verificar que, apesar da diminuição da chuva média em quase todos os meses, não houveram mudanças significativas no padrão de distribuição da precipitação ao longo do ano, indicando uma manutenção da sazonalidade mesmo para o futuro longo. Esse resultado é semelhante ao obtido por Genz *et al.* (2012).

As precipitações máximas, mínimas e médias anuais foram reduzidas em todos os cenários, sendo menores para o futuro longo. Quanto ao desvio padrão, houve reduções de aproximadamente 9% e 11% para o futuro longo dos cenários A2 e B2, respectivamente.

3.3.2 Efeitos Sobre a Vazão

Como os melhores resultados na calibração foram obtidos para a estação fluviométrica Argoim, optou-se por realizar as simulações mensais dos cenários climáticos para avaliar os efeitos nas vazões nesse posto, sendo este representativo do comportamento do rio Paraguaçu, uma vez que trata-se da estação mais próxima

ao exutório. Apesar do ajuste não ter sido satisfatório para a estação Ponte Rio Branco, as simulações dos cenários também foram realizadas para este posto a título de ilustração, uma vez que este está localizado em um importante afluente do rio Paraguaçu.

Como esperado, uma vez que as precipitações indicaram tendência de redução em todos os cenários, as vazões também foram reduzidas nas duas estações analisadas. Na **Tabela 9** são apresentadas as percentagens relativas de diminuição ou aumento das vazões médias e da vazão com 90% de permanência, que é referência para outorga de direito do uso da água no estado da Bahia, calculadas para as estações Argoim e Ponte Rio Branco em todos os cenários e futuros.

Tabela 9 - Percentagem relativa entre as vazões calculadas para cada cenário e as vazões de referência para as estações Argoim e Ponte Rio Branco

Vazão	ARGOIM				PONTE RIO BRANCO			
	2030		2070		2030		2070	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Qméd	-20,78 %	-29,52 %	-36,56 %	-40,15 %	-93,24 %	-94,09 %	-94,46 %	-94,95%
Q90	-66,41 %	-77,12 %	-81,51 %	-88,38 %	-25,35 %	-38,39 %	-49,11 %	-56,44 %

Verificou-se que houve uma redução significativa da Q90 para o futuro longo do cenário B2, diminuindo cerca de 88%. Para o rio Jacuípe, representado pela estação Ponte Rio Branco, o caso mais crítico também ocorre para o futuro longo do cenário B2, onde a Q90 sofre uma redução de aproximadamente 56%.

Os desdobramentos de uma redução dessa ordem nas vazões da bacia do rio Paraguaçu podem ser bastante preocupantes, uma vez que se trata de uma bacia de grande importância para o estado da Bahia. Essa diminuição pode conduzir a uma situação de insustentabilidade dos recursos hídricos da região, reduzindo suas disponibilidades e intensificando os conflitos pelo uso da água. Como consequência, seriam observados impactos negativos em diversos setores, como abastecimento humano, agricultura e geração de energia, que se beneficiam das águas do Paraguaçu.

Escarião *et al.* (2012) mostrou que a escolha do modelo hidrológico influencia diretamente os resultados das simulações de vazão quando a região é submetida a cenários de mudanças climáticas, devendo esse fato ser considerado como mais uma incerteza nos estudos hidrológicos dessa natureza.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar os efeitos das alterações na precipitação, devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu a curto e longo prazo, utilizando um conjunto de modelos climáticos contidos no MAGICC/SCENGEN e o modelo hidrológico SWAT.

O modelo hidrológico SWAT apresentou desempenho satisfatório em representar as vazões da região estudada, considerando a maior dificuldade em representar a variabilidade em escala diária. Para o rio Jacuípe, importante afluente do rio Paraguaçu, a dificuldade do modelo em representar as interações entre o escoamento subterrâneo e a rede fluvial foi um fator importante para que não fosse possível obter melhores ajustes.

A quantidade de informações exigidas e parâmetros existentes atribuem uma grande complexidade ao modelo, uma vez que são necessários muitos dados para que este consiga fornecer uma melhor resposta, principalmente quando se trabalha com pequenas bacias.

Para todos os cenários avaliados, verificou-se uma tendência na diminuição das chuvas e das vazões a curto e a longo prazo. As maiores reduções foram obtidas para o cenário de baixas emissões, projetando-se uma grande diminuição nas vazões com 90% de permanência para o futuro longo, centrado no ano de 2070. Esta situação pode impactar negativamente vários setores, intensificando conflitos pelo uso da água e agravando os problemas de escassez.

Salienta-se que existem muitas incertezas nas previsões geradas por modelos devido a forma simplificada como estes buscam representar os fenômenos que ocorrem na natureza. Para previsões climáticas a longo prazo e projeções de anomalias na precipitação, essas incertezas são ainda maiores, visto a dificuldade em que os modelos possuem em representar um sistema tão complexo como o sistema climático. Dessa forma, recomenda-se para estudos futuros a identificação e quantificação das fontes de incertezas existentes.

Como se trata de uma bacia de grande importância para o estado, os impactos negativos serão sentidos por milhões de pessoas, recomenda-se realizar avaliações de medidas mitigatórias e adaptativas que possam ser aplicadas para a região.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. 2012. **User Manual for SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs**. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 103 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. 2006. Atlas nordeste: abastecimento urbano de água: alternativas de oferta de água para sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais.

ANDRADE, P. R. G. S. 2010. A complexa conexão entre sustentabilidade, conflitos e gestão de recursos hídricos: evidências de um estudo de caso. In: **Anais**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 2012. Modelagem do escoamento na sub-bacia do rio Japarutuba-Mirim (SE) através do modelo SWAT. In: **Anais**. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa/PB.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 2013. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 37, p. 1091-1102.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. 2012. **Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation Version 2012**. Texas Water Resources Institute, TR-439.

AVILA, A. M. H. 2007. Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. **Multiciência**, v.8, p. 163-168.

BAE, D-H.; JUNG, II-W.; LETTENMAIER, D. P. 2011. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. **Journal of Hydrology**, 401 (1), p.90-105.

BRAVO, J. M.; MARQUES, D. M.; TASSI, R. CARDOSO, A. 2012. Avaliação Preliminar do Efeito de Projeções do Clima em Cenários Climáticos Futuros Sobre os Níveis d'água do Banhado do Taim, RS. In: **Anais**. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa, PB.

BRIGODE, P.; OUDIN, L. PERRIN, C. 2013. Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? **Journal of Hydrology**, 476, p.410-425.

CHIEN, H.; YEH, P. J. F.; KNOUFT, J. H. 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. **Journal of Hydrology**, 491, p.73–88.

COONEY, C. M. 2012. Downscaling climate models: sharpening the focus on local-level changes. **Environmental health perspectives**, v. 120 (1), p. a22-a28.

DASGUPTA, S.; GOSAIN, A. K.; RAO, S.; ROY, S.; SARRAF, M. 2012. A megacity in a changing climate: the case of Kolkata. **Climatic Change**, 28 june.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. 2011. Aplicabilidade do Modelo SWAT Para Simulação Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, MG. **Cerne**, Lavras, v.17, n.4, p. 481-488.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. 2011. Mapa de solos do Brasil. Disponível em:< http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det_mapa.aspx>

ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; NETO, A. R. 2012. Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.3, p. 81-91.

FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. 2012. **Harmonized World Soil Database (version 1.21)**. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. 2013. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, 480, p.85–101.

FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. 2013. Changes in rainfall seasonality in the tropics. **Nature Climate Change** 3, p.811–815, doi: 10.1038/nclimate1907.

FICKLIN, D. L.; STEWART, I. T.; MAURER, E. P. 2012. Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin, California. **Climatic Change**, 25 july.

FONTES, A. S.; OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. 2010. Calibração do modelo SWAT em bacia do semi-árido com auxílio da hidrologia isotópica. In: **Anais. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Fortaleza, CE.

FYFE, J. C.; GILLETT, N. P.; ZWIERS, F. W. 2013. Overestimated global warming over the past 20 years. **Nature Climate Change** 3, p.767–769, doi:10.1038/nclimate1972.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 1211-1250.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. 2014. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. **J. Environ. Qual.**, 43, p. 1-8. doi:10.2134/jeq2013.11.0466

GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. 2012. Impacto das mudanças climáticas nas vazões do rio Paraguaçu - cenário A1B de 2011 a 2040. In: **Anais. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. João Pessoa/PB.

GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN, AND P. O. YAPO. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrologic Eng.** 4(2): p. 135-143.

GUO, H.; HU, Q.; JIANG, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses do climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. **Journal of Hydrology**, 355, p. 106-122.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. **J. Irrig. and Drain. Engr.** 111(2), p. 113-124.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2004. Mapa de Vegetação do Brasil.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2010. Sinopse do censo demográfico 2010. Disponível em: <
<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse>> Acesso em: 05 Mar. 2013.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - INEMA. 2013. Mapa temático: Regiões de Planejamento e Gestão das Águas. Disponível em: <
<http://www.inema.ba.gov.br/download/458/>> Acesso em: 12 Mar. 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report.

JAIN, S. K.; TYAGI, J.; SINGH, V. 2010. Simulation of Runoff and Sediment Yield for a Himalayan Watershed Using SWAT Model. **J. Water Resource and Protection**, 2, p. 267-281.

JHA, M. K. 2011. Evaluating Hydrologic Response of an Agricultural Watershed for Watershed Analysis. **Journal Water**, p. 604-617.

JUNG, II-W.; MORADKHANI, H.; CHANG, H. 2012. Uncertainty assessment of climate change impacts for hydrologically distinct river basins. **Journal of Hydrology**, 466-467, p.73-87.

KATZ, R. W.; CRAIGMILE, P. F.; GUTTORP, P.; HARAN, M.; SANSÓ, B.; STEI, M. L. 2013. Uncertainty analysis in climate change assessments. **Nature Climate Change** 3, p.769–771, doi:10.1038/nclimate1980.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. 2012. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo SWAT Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, v.36, p. 623-634.

LI, Z.; LIU, W. Z.; ZHANG, X. C.; ZHENG, F. L. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess of China. **Journal of Hydrology**, 377, p. 35-42.

LUNG, T.; DOSIO, A.; BECKER, W.; LAVALLE, C.; BOUWER, L. M. 2013. Assessing the influence of climate model uncertainty on EU-wide climate change impact indicators. **Climatic Change**, 120 (1-2), p.211-227.

MA, X.; XU, J. NOORDWIJK, M. V. 2010. Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land cover and climate. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1379-1390.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. 2011. Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. (Relatório)

MEDEIROS, Y. D. P. 2003. Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semi-árida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.2, p. 127–136.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). 2005. Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em:
<<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 28 jan. 2014.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885- 900.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2011. Soil and water assessment tool - Theoretical documentation: Version 2009. **Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406**, Texas A&M University.

NETO, A. A. M.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. 2011. Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido. In: **Anais. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió/AL.

NETO, J. O. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; JUNIOR, A. V. M. 2014. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n.1, p. 177-188.

NOTTER, B.; HURNI, H.; WIESMANN, U.; NGANA, J. O. 2012. Evaluating watershed service availability under future management and climate change scenarios in the Pangani Basin. **J. Physics and Chemistry of the Earth**.

OEURNG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 401, p. 145-153.

PAGLIERO, L.; BOURAOU, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. 2014. Large-Scale Hydrological Simulations Using the Soil Water Assessment Tool, Protocol Development, and Application in the Danube Basin. **Journal of Environmental Quality**, n. 43, p. 145–154.

PETERSON, J. R.; HAMLETT, J. M. 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 2, p. 295–303.

PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G. D.; GEMITZI, A.; TSIHRINTZIS, V. A. 2009. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). **Journal Desalination**, p. 274-286.

RIMMER, A.; GIVATI, A.; SAMUELS, R.; ALPERT, P. 2011. Using ensemble of climate models to evaluate future water and solutes budgets in Lake Kinneret, Israel. **Journal of Hydrology**, v. 410, p. 248-259.

SANTER, B.D.; WIGLEY, T.M.L.; SCHLESINGER, M.E.; MITCHELL, J.F.B. 1990. Developing Climate Scenarios from Equilibrium GCM Results. **Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 47**, Hamburg, Germany, 29 p.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of The American Water Resources Association**, v. 37, n.5, p. 20.

SANTOS, C. P. 2013. "**Impactos eco-hidrológicos do uso e ocupação do solo em região semiárida: o caso da bacia do rio Acaraú, CE**". Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL.

SINGH, J.; KNAPP, H. V.; ARNOLD, J. G.; DEMISSIE, M. 2005. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, p. 343–360.

TIBEBE, D.; BEWKET, W. 2011. Surface Runoff And Soil Erosion Estimation Using The SWAT Model In The Keleta Watershed, Ethiopia. **Land & Degradation Development**, v. 22, p. 551–564.

TUCCI, C. E. M., BRAGA, B. (organizadores) 2003. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH. 348p.

VAGHEFI, S. A.; MOUSAVI, S. J.; ABBASPOUR, K. C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. 2013. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. **Hydrological Processes**, DOI: 10.1002/hyp.9747.

VARANOU, E.; GKOUVATSOU, E.; BALTAS, E.; MIMIKOU, M. 2002. Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of soil and water assessment tool model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 3, p. 228–244.

WANG, G.; YANG, H.; WANG, L.; XU, Z.; XUE, B. 2014. Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. **Hydrological Processes**, v. 28, p.1032–1042.

WIGLEY, T. M. L. 2008. **MAGICC/SCENGEN 5.3**: User Manual (version 2). Colorado: National Center for Atmospheric Research.

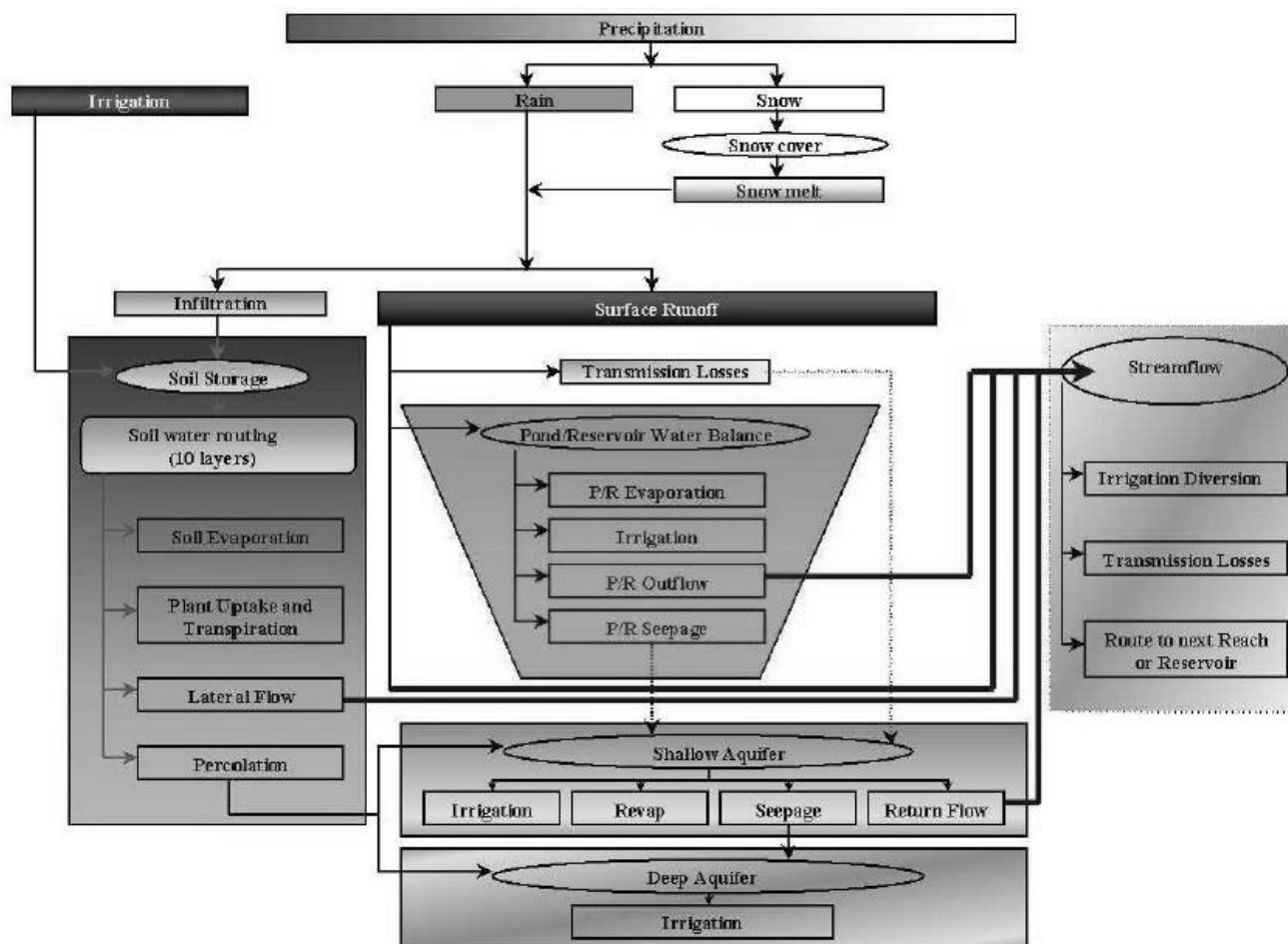
WU, Y.; LIU, S.; GALLANT, A. L. 2012. Predicting impacts of increased CO₂ and climate change on the water cycle and water quality in the semiarid James River Basin of the Midwestern USA. **Science of the Total Environment**, 430, p. 150-160.

ZABALETA, A.; MEAURIO, M.; RUIZ, E.; ANTIGUEDAD, I. 2014. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain. **J. Environ. Qual.**, 43, p. 235-245.
doi:10.2134/jeq2012.0209

ZHANG, S.; LIU, Y.; WANG, T. 2014. How land use change contributes to reducing soil erosion in the Jialing River Basin, China. **Agricultural Water Management**, 133 p. 65-73.

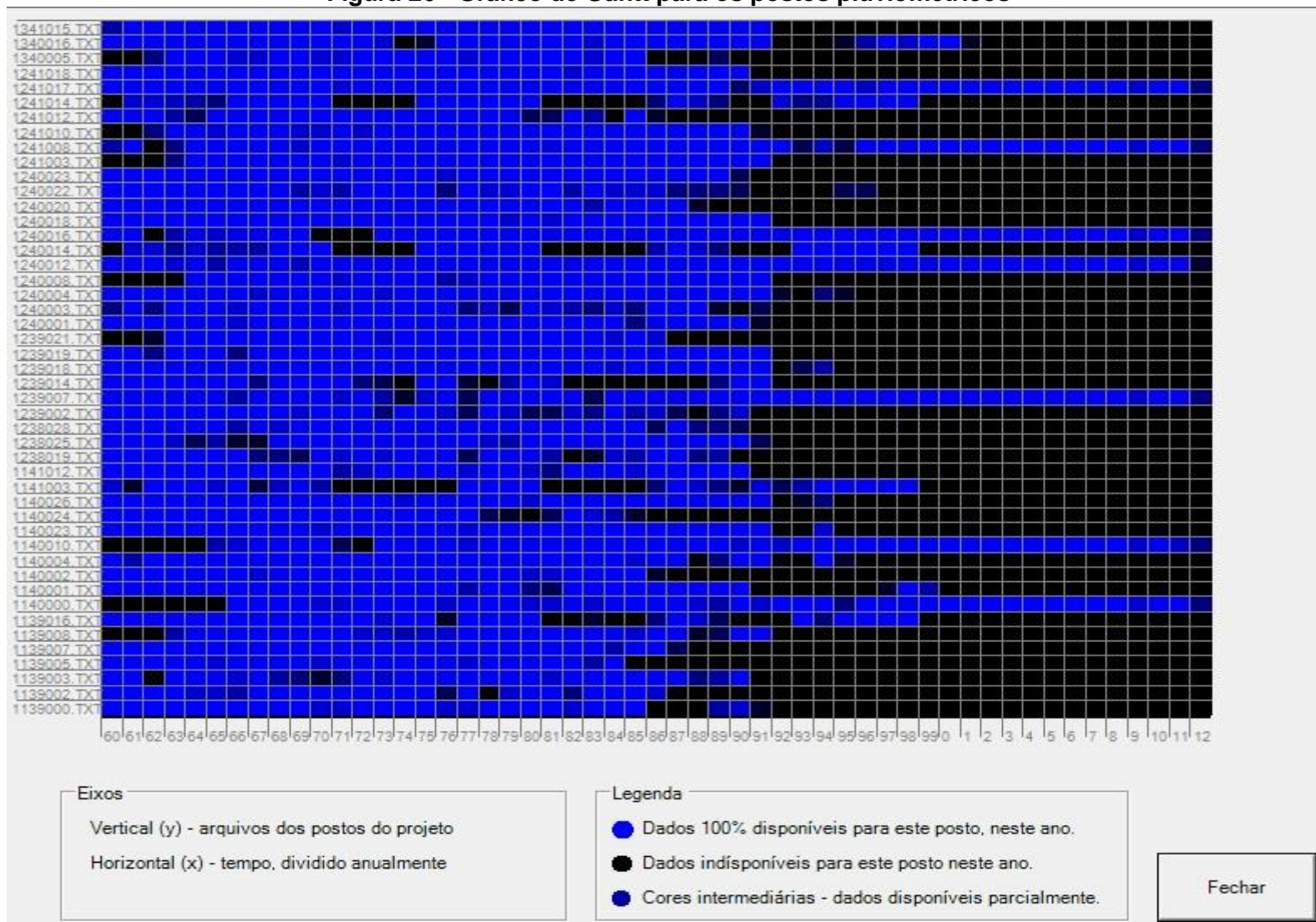
ANEXO

Figura 25 - Esquema dos caminhos disponíveis para o movimento da água no modelo SWAT



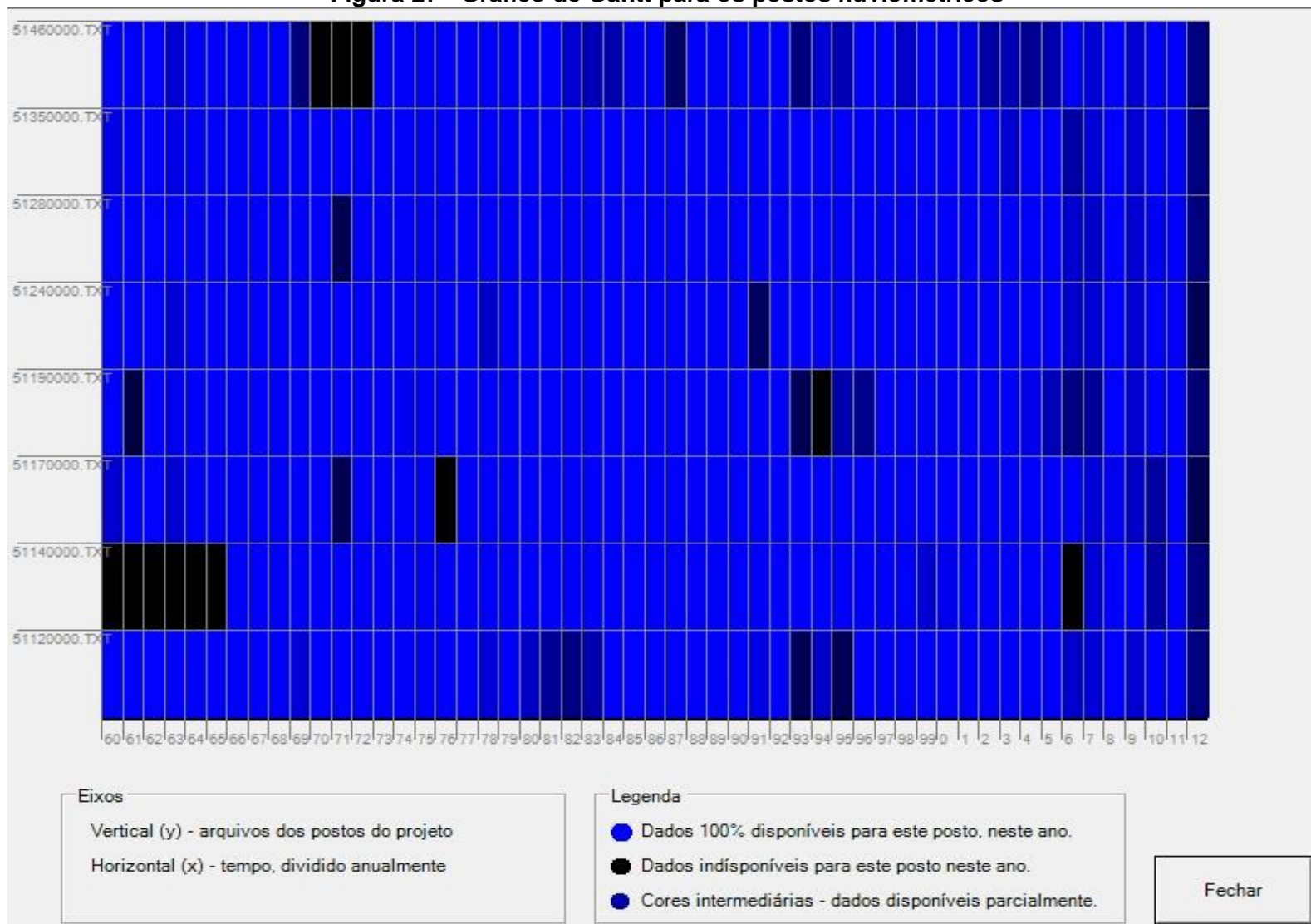
Fonte: Fonte: NEITSCH *et al.*, 2011

Figura 26 - Gráfico de Gantt para os postos pluviométricos



Fonte: Autor

Figura 27 - Gráfico de Gantt para os postos fluviométricos



Fonte: Autor

Tabela 10 - Propriedades físico-químicas dos solos

Parâmetro	Argissolo		Cambissolo		Chernossolo		Latossolo		Neossolo		Planossolo	
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
Capacidade de armazenamento (mm)	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,07	0,07	0,13	0,13
Areia (%)	84,60	75,80	46,65	43,55	52,75	43,75	52,25	41,25	65,35	54,00	57,00	64,40
Silte (%)	4,30	4,60	23,85	27,35	25,75	24,00	11,10	11,60	15,95	10,00	27,80	19,00
Argila (%)	11,10	19,60	29,50	29,10	21,50	32,25	36,65	47,15	18,70	36,00	15,20	16,60
Fragmento de rocha (%)	1,00	1,00	13,35	15,20	9,25	6,25	4,05	5,85	14,25	4,00	8,80	6,00
Carbono orgânico (%)	0,47	0,34	1,46	0,66	1,21	0,61	1,11	0,51	1,15	0,32	0,66	0,24
Condutividade hidráulica (mm/h)	835,76	748,83	461,07	430,48	521,35	432,43	516,26	407,60	645,72	533,54	563,35	636,36
Fator de erodibilidade do solo (K)	0,086	0,105	0,154	0,161	0,164	0,155	0,128	0,123	0,153	0,126	0,174	0,163
Condutividade elétrica (dS/m)	0,00	0,00	0,04	0,11	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	1,56
pH (H2O)	5,34	4,95	6,34	6,41	6,15	6,65	4,90	5,19	4,49	4,80	6,74	8,22

Tabela 11 - Modelos utilizados pelo SCENGEN

Nome	País	Nome no SCENGEN
Bergen Climate Model, version 2	Noruega	BCCRBCM2
Community Climate System Model, version 3.0	EUA	CCSM—30
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis's	Canadá	CCCMA-31
CNRM-CM3	França	CNRM-CM3
CSIRO Mark 3.0	Austrália	CSIRO-30
ECHAM5/MPI-OM	Alemanha	MPIECH-5
ECHO-G	Alemanha Coréia	ECHO---G
FGOALS-g1.0	China	FGOALS1G
CM2.0 - AOGCM	EUA	GFDLCM20
CM2.0 - AOGCM	EUA	GFDLCM21
GISS ModelE-H	EUA	GISS—EH
GISS ModelE-H	EUA	GISS—ER
INMCM3.0	Rússia	INMCM-30
IPSL-CM4	França	IPSL_CM4
MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	Japão	MIROC-HI
MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	Japão	MIROCMED
MRI-CGCM2.3.2	Japão	MRI-232A
Parallel Climate Model	EUA	NCARPCM1
HADCM3	Inglaterra	UKHADCM3
Hadley Centre Global Environmental Model, version 1	Inglaterra	UKHADGEM

Fonte: Bravo et al., 2012