



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

LUDIMILA DE OLIVEIRA DE AMORIM BRANDÃO

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT PARA ANÁLISE DE RESPOSTAS
HIDROLÓGICAS EM DIFERENTES CENÁRIOS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU - BAHIA**

**PORTO ALEGRE
2024**

LUDIMILA DE OLIVEIRA DE AMORIM BRANDÃO

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT PARA ANÁLISE DE RESPOSTAS
HIDROLÓGICAS EM DIFERENTES CENÁRIOS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU - BAHIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geografia, na linha de pesquisa de Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Doutor Luis Eduardo de Souza Robaina

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Brandão, Ludimila de Oliveira de Amorim
UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT PARA ANÁLISE DE RESPOSTAS
HIDROLÓGICAS EM DIFERENTES CENÁRIOS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU - BAHIA / Ludimila de
Oliveira de Amorim Brandão. -- 2024.
151 f.
Orientador: Luis Eduardo de Souza Robaina.

Coorientador: Thomas Vicent Gloaguen.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Bacias Hidrográficas. 2. Modelagem Hidrológica.
3. Semiárido. 4. Processos Hidrológicos. 5. Bioma
Caatinga. I. Robaina, Luis Eduardo de Souza, orient.
II. Gloaguen, Thomas Vicent, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LUDIMILA DE OLIVEIRA DE AMORIM BRANDÃO

**UTILIZAÇÃO DO MODELO SWAT PARA ANÁLISE DE RESPOSTAS
HIDROLÓGICAS EM DIFERENTES CENÁRIOS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU - BAHIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geografia, na linha de pesquisa de Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Doutor Luis Eduardo de Souza Robaina

Aprovada em: 15/01/2024

Banca Examinadora

Prof. Orientador: Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina (UFSM)

Prof. Corientador: Dr. Thomas Vicent Gloaguen (UFRB)

Prof. Dr. François Laurent (Le Mans Université)

Prof. Dr. Roberto Verdum (POSGEA/ UFRGS)

Prof. Dr. Sidnei Luís Bohn Gass (POSGEA/ UFRGS)

PORTO ALEGRE

2024

Dedico a meu amado e querido marido Gabriel, por todo incentivo, força, carinho e apoio de sempre. Sem você nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, ao Universo e todas as formas de energia que conspiraram para concretização de mais uma etapa em minha vida.

Agradeço à toda a minha família, em especial aos meus pais, Joselito Ferreira Amorim e Maria das Graças de Oliveira Amorim, e meu irmão, Lucas Amorim, por todo o apoio, confiança, atenção e ajuda, ao longo de toda minha trajetória acadêmica.

Agradeço ao meu marido Gabriel, por todo o amor, paciência e suporte que foram a minha base para conseguir seguir em frente nos momentos de desânimo e ansiedade.

Agradeço a minha prima e irmã querida Vanessa, por todo o amor e atenção de sempre.

Agradeço à todos os meus amigos queridos de Santo Antônio de Jesus e Muritiba, que sempre estiveram presentes, pelas conversas, mensagens de carinho e apoio durante todas as etapas da minha vida.

Agradeço ao meu querido orientador o Professor Dr. Luís Robaina por todo o apoio, compreensão e ensinamentos sem os quais a realização desse trabalho não seria possível. Sempre muito risonho e empático, um profissional com senso de coletividade raro e que é uma inspiração a se seguir.

Agradeço ao Professor Dr. Romário por todo o apoio, paciência, gentileza e conhecimento prestado em todas as etapas da pesquisa, que foram essenciais para concretização desse trabalho.

Agradeço ao Professor Dr. Thomas Gloaguen pelo incentivo, apoio e atenção ao longo da minha trajetória acadêmica, sempre muito solícito e disposto a ajudar.

Aos membros da banca os professores François Laurent, Roberto Verdum e Sidnei Luís pelas solenes contribuições para a melhoria desta Tese de Doutorado.

Ao PPG de Geografia da UFRGS.

Deixo meu agradecimento especial a ciência e a educação pública, que fazem toda a diferença no processo de formação e são a base para o desenvolvimento de qualquer sociedade e país. É claro que melhorias são necessárias, e por isso devemos lutar pelos nossos direitos, por investimentos e por oportunidades melhores para todos, dizendo não ao negacionismo, ao fascismo, ao autoritarismo, à regressão dos direitos já conquistados e todo tipo de discurso que seja contra a ciência, à educação e a democracia.

RESUMO

Os problemas relacionados ao uso e ocupação do solo sem o devido planejamento em bacias hidrográficas, acabam influenciando no comportamento hidrológico e afetando o balanço hídrico das bacias, sobretudo em regiões semiáridas, onde em condições normais as dificuldades associadas a escassez hídrica já existem. Nesse sentido, os modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados como ferramentas que auxiliam na representação, simulação e compreensão do comportamento das bacias hidrográficas, sendo dessa forma capaz de prever os impactos ocasionados pela atividade antrópica no seu regime hidrológico. Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos dos diferentes cenários de uso nos processos hidrológicos da bacia do rio Paraguaçu, Bahia, com a utilização do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Para modelagem inicial e criação das Unidades de Respostas Hidrológica (HRUs) foram utilizados o Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE), o mapa de solos e o mapa de cobertura e uso da terra. Além disso, foram inseridos os dados tabulares referentes as séries de vazão e as informações climáticas da área de estudo. O período de simulação estipulado foi de 2012 a 2019, sendo três anos para aquecimento do modelo (2012-2014), três anos para a calibração (2015-2017) e dois anos para validação (2018-2019). A análise de sensibilidade, calibração e validação foram realizadas através da interface *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures-SWAT CUP*. A análise de desempenho indicou valores de $R^2=0,83$ e $Nash=0,7$, considerados bons. Os parâmetros mais sensíveis foram CN2 e EPCO. Os resultados indicaram a influência da sazonalidade climática da bacia nos processos hidrológicos, principalmente na relação entre a precipitação e os componentes hidrológicos. Durante o período de 2015 a 2019 a evapotranspiração apresentou maior variabilidade em detrimento dos diferentes tipos de uso. Os resultados obtidos evidenciam a ampla gama de análises que podem ser realizadas através dos dados disponibilizados pelo modelo e que servem para análise dos processos físicos que ocorrem na bacia. Sendo dessa forma possível avaliar os impactos e promover a proteção e o gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Bacias hidrográficas, Semiárido, SWAT, Processos hidrológicos.

ABSTRACT

Problems related to land use and occupation without proper planning in river basins end up influencing hydrological behavior and affecting the water balance of the basin, especially in semi-arid regions, where under normal conditions the difficulties associated with water scarcity already exist. In this sense, hydrological models have been widely used as tools that help in the representation, simulation and understanding of the behavior of river basins, thus being able to predict the impacts caused by human activity on their hydrological regime. In view of the above, this work aimed to evaluate the effects of different use scenarios on the hydrological processes of the Paraguaçu river basin, Bahia, using the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). For initial modeling and creation of HRUs (Hydrological Response Units), the digital terrain elevation model (MDE), the soil map and the land cover and use map were used. In addition, tabular data relating to the flow series and climatic information of the study area were inserted. The stipulated simulation period was from 2012 to 2019, with three years for model warm-up (2012-2014), three years for calibration (2015-2017) and two years for validation (2018-2019). Calibration and validation sensitivity analysis were performed using the SWAT Calibration and Uncertainty Procedures-SWAT CUP interface. The performance analysis indicated values of $R^2=0.83$ and $Nash=0.7$, considered good. The most sensitive parameters were CN2 and EPCO. The results indicated the influence of the basin's climatic seasonality on hydrological processes, mainly in the relationship between precipitation and hydrological components. During the period from 2015 to 2019, evapotranspiration showed greater variability due to different types of use. The results obtained highlight the wide range of analyzes that can be carried out using the data provided by the model and which serve to analyze the physical processes that occur in the basin. This makes it possible to assess impacts and promote the protection and management of water resources.

Keywords: Watersheds, Semiarid, SWAT, Hydrological processes.

RESUMÉN

Los problemas relacionados con el uso y ocupación del suelo sin una adecuada planificación en las cuencas fluviales terminan influyendo en el comportamiento hidrológico y afectando el balance hídrico de la cuenca, especialmente en regiones semiáridas, donde en condiciones normales las dificultades asociadas a la escasez de agua ya existen. En este sentido, los modelos hidrológicos han sido ampliamente utilizados como herramientas que ayudan en la representación, simulación y comprensión del comportamiento de las cuencas fluviales, pudiendo así predecir los impactos provocados por la actividad humana sobre su régimen hidrológico. Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos de diferentes escenarios de uso en los procesos hidrológicos de la cuenca del río Paraguaçu, Bahía, utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Para el modelado inicial y creación de las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica) se utilizó el modelo digital de elevación del terreno (MDE), el mapa de suelos y el mapa de cobertura y uso del suelo. Además, se insertaron datos tabulares relativos a las series de caudales e información climática de la zona de estudio. El período de simulación estipulado fue de 2012 a 2019, con tres años de calentamiento del modelo (2012-2014), tres años de calibración (2015-2017) y dos años de validación (2018-2019). Los análisis de sensibilidad de calibración y validación se realizaron utilizando la interfaz SWAT Procedimientos de calibración e incertidumbre-SWAT CUP. El análisis de desempeño indicó valores de $R^2=0,83$ y $Nash=0,7$, considerados buenos. Los parámetros más sensibles fueron CN_2 y $EPCO$. Los resultados indicaron la influencia de la estacionalidad climática de la cuenca sobre los procesos hidrológicos, principalmente en la relación entre precipitación y componentes hidrológicos. Durante el periodo 2015 a 2019 la evapotranspiración mostró mayor variabilidad debido a los diferentes tipos de uso. Los resultados obtenidos ponen de relieve la amplia gama de análisis que se pueden realizar a partir de los datos que proporciona el modelo y que sirven para analizar los procesos físicos que se producen en la cuenca. Esto permite evaluar impactos y promover la protección y gestión de los recursos hídricos.

Palabras-clave: Cuencas hidrográficas, Semiárido, SWAT, Procesos hidrológicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia	18
Figura 2- Esquema do ciclo hidrológico no SWAT	25
Figura 3: Classificação climática da bacia do RPGA.....	46
Figura 4:Isoietas de médias das precipitações anuais de 1977 a 2006	47
Figura 5:Mapa de Províncias Geológicas da bacia do rio Paraguaçu	48
Figura 6:Unidades de relevo da bacia do Rio Paraguaçu	49
Figura 7:Mapa de solos da bacia do rio Paraguaçu	52
Figura 8:Área que os diferentes tipos de solos ocupam na bacia	53
Figura 9:Cobertura e Uso da Terra do RPGA	57
Figura 10:Área dos pivôs centrais do polo agrícola	58
Figura 11:Divisão de sub-bacias e pontos de exutórios	62
Figura 12:Mapa de classes de uso	63
Figura 13:Mapa de atividades agropecuárias bacia do Rio Paraguaçu	63
Figura 14:Mapa de uso e cobertura da Bacia do Rio Paraguaçu	65
Figura 15:Área de localização do levantamento exploratório	68
Figura 16:Mapas de declividade, solos e cobertura da Bacia do Rio Paraguaçu.....	72
Figura 17: Etapas de inserção da tabela e classificação no SWAT.....	73
Figura 18:Associação do uso com o SWAT e reclassificação	74
Figura 19:Etapas de inserção de dados climáticos e criação de tabelas.	76
Figura 20:Estações pluviométricas e fluviométricas da bacia do RPGA.	77
Figura 21: Etapas da importação de resultados	78
Figura 22:Etapas da calibração agronômica.....	79
Figura 23:Mapa das Unidades de Respostas Hidrológicas da Bacia do Rio Paraguaçu-Ba.....	87
Figura 24:Análise de sensibilidade.....	96
Figura 25:Localização das estações hidrometeorológicas da bacia do Rio Paraguaçu-Ba.....	97
Figura 26: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2015.....	98
Figura 27: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2016.....	99
Figura 28:Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2017.....	99
Figura 29:Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2018.....	100
Figura 30:Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2019.....	100

Figura 31: Média do comportamento hidrológico dos tipos de usos na bacia (2015 – 2019)	102
Figura 32: Média do comportamento hidrológico dos solos (2015- 2019)	104
Figura 33: Comportamento hidrológico uso associado a agricultura em diferentes tipos de solos	106
Figura 34: Gráfico do comportamento hidrológico dos solos associados ao cultivo de tomate	108
Figura 35: Comportamento hidrológico dos diferentes tipos de usos nos Latossolos e Neossolos	108
Figura 36: Comportamento hidrológico do café em diferentes tipos de solo	109
Figura 37: Comportamento hidrológico em áreas urbanas (2015-2019)	110
Figura 38: Comportamento hidrológico em áreas de florestas (2015- 2019)	111
Figura 39: Precipitação nos meses de março e agosto de 2019	112
Figura 40: Comportamento hidrológico das sub-bacias (1,2,3,4,5,6,7,8) no mês de março	113
Figura 41: Comportamento hidrológico das sub-bacias (1,2,3,4,5,6,7,8) no mês de março	113
Figura 42: Comportamento hidrológico das sub-bacias (9,10,11,12,13 e 14) no mês de março	114
Figura 43: Comportamento hidrológico das sub-bacias (9,10,11,12,13 e 14) no mês de março	114
Figura 44: Pivôs centrais do Agropolo Ibicoara Mucugê na sub-bacia 13	117
Figura 45: Gráficos do comportamento hidrológico no mês de agosto	120
Figura 46: Gráficos do comportamento hidrológico no mês de agosto	121
Figura 47: Gráficos dos componentes hidrológicos do solo no mês de agosto/2019	121
Figura 48: Gráficos dos componentes hidrológicos do solo no mês de agosto/2019	122
Figura 49: Pantanal de Marimbus, Chapada Diamantina –BA	124
Figura 50: Comportamento hidrológico da agricultura nos meses de março e agosto de 2019	126
Figura 51: Comportamento da área urbana nos meses de março e agosto de 2019	127
Figura 52: Comportamento do café nos meses de março e agosto de 2019	129
Figura 53: Comportamento das florestas nos meses de março e agosto de 2019	130
Figura 54: Comportamento dos pomares nos meses de março e agosto de 2019	131
Figura 55: Comportamento da pastagem nos meses de março e agosto de 2019	132
Figura 56: Comportamento da Caatinga nos meses de março e agosto de 2019	133
Figura 57: Comportamento do Cerrado nos meses de março e agosto de 2019	134

Figura 58:Comportamento do tomate nos meses de março e agosto de 2019.....	136
Figura 59:Comportamento do brejo nos meses de março e agosto de 2019	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Associação de classes de uso com banco de dados do SWAT.....	65
Quadro 2-Parametros de solo do modelo SWAT.....	67
Quadro 3-Grupos hidrológicos dos solos.	69
Quadro 4- Parâmetros mais sensíveis da bacia do Rio Paraguaçu.	81
Quadro 5- Parâmetros otimizados no SWAT-CUP.....	83

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ARS	<i>Agricultural Research Service</i>
CBHP	Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraguau
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HRUs	Unidades de Resposta Hidrológicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEMA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PAM	Produtividade Agrícola Municipal
PERH-BA	Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SEIA	Sistema Estadual de Informações Ambientais e de Recursos Hídricos
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UEPGRH	Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
UHE	Unidades Hidrográficas Estaduais
UPH	Unidades de Planejamento Hídrico
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	20
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	21
2.1.1	O modelo SWAT	23
2.2	BACIAS HIDROGRÁFICAS E PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	26
2.2.1	Processos hidrossedimentalógicos e efeitos dos tipos de uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas	28
2.3	Utilização do modelo SWAT no mundo	31
2.3.1	Utilização do modelo SWAT no Brasil	39
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
3.1	ASPECTOS GERAIS.....	45
3.2	ASPECTOS DO CLIMA.....	45
3.3	CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS.....	47
3.3.1	Substrato geológico	48
3.3.2	Características do Relevo	49
3.3.3	Principais Solos da Bacia do Rio Paraguçu	52
3.3.4	Cobertura e Uso da Terra	56
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	60
4.1	DADOS DE ENTRADA E GERAÇÃO DAS HRUS.....	60
4.1.2	Modelo digital de elevação	61
4.1.3	Dados de cobertura e uso da terra	62
4.1.4	Dados pedológicos	67
4.1.5	Geração das unidades de respostas hidrológicas	71
4.2	ENTRADA DOS DADOS CLIMÁTICOS.....	75
4.3	SIMULAÇÃO	77
4.4	CALIBRAÇÃO AGRONÔMICA	78
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	79
4.6	CALIBRAÇÃO SWAT-CUP	81
4.7	VALIDAÇÃO DO MODELO	85
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1	DEFINIÇÃO DAS UNIDADES HIDROLÓGICAS.....	86
5.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO.....	95
5.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO PARAGUAÇU- SÉRIE HISTÓRICA (2015-2019)	101
5.3.1	Comportamento hidrológico em diferentes tipos de uso e solos	101
5.3.2	Relação uso x solo	105
5.3.3	Relação uso x 5 anos	110
5.4	COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO NO ANO DE 2019: MESES DE MARÇO E AGOSTO.....	111
5.4.1	Comportamento hidrológico no mês março (2019)	112
5.4.2	Comportamento hidrológico no mês de agosto (2019)	119
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS MESMOS TIPOS DE USO E COBERTURA NAS DIFERENTES SUB-BACIAS: MESES DE MARÇO E AGOSTO DE 2019.....	126

6.	CONCLUSÃO	138
	REFERÊNCIAS	141

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade o planejamento e a gestão das bacias hidrográficas, têm tido grande importância diante dos efeitos negativos consequentes das intervenções antrópicas ocorridas em todo o mundo, baseadas em uma concepção de domínio e controle da natureza, associadas a um modelo econômico de exploração desordenada dos recursos naturais (Rodriguez et al. 2011). Diante disso, sendo a bacia hidrográfica palco das relações espaciais entre a distribuição da água, clima, relevo, geologia, vegetação, solos e a transformação exercida pelas atividades humanas, ela acaba sendo considerada como uma unidade mais apropriada para realização de estudos qualitativos e quantitativos, sobretudo no que tange ao entendimento dos processos hidrológicos que nela ocorrem e os impactos que as mudanças no uso do solo possuem nesses processos e nos cursos d'água.

Os problemas relacionados ao uso e ocupação do solo sem o devido planejamento em bacias hidrográficas, tais como a expansão de atividades agropecuárias, pastagem, desmatamento, remoção de mata ciliares e construção de barramentos, acabam influenciando no comportamento hidrológico da bacia e afetando o seu balanço hídrico, além de intensificar os processos erosivos e a produção de sedimentos, ocasionando perda do solo, contaminação e assoreamento dos corpos d'água. Segundo Arroio Jr (2013) quando o aporte de sedimentos ocorre em reservatórios de acumulação, pode ocorrer a redução do volume de água e vida útil do lago, além dos riscos de enchentes.

Nesse sentido, os modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados como ferramentas que auxiliam no gerenciamento de bacias hidrográficas, uma vez que são capazes de representar e entender o seu comportamento, além de prever e simular condições distintas das observadas, dessa forma, antecipando a ocorrência de eventos, eles permitem a tomada de medidas preventivas (Tucci et al. 2005). Através do seu uso é possível fazer avaliações mais complexas, avançadas e organizadas, que além de prever o comportamento dos processos hidrológicos, viabiliza o estudo dos fenômenos de maneira mais dinâmica, motivo este que corrobora para escolha do modelo pelos pesquisadores, frente as dificuldades técnicas e os custos das medições diretas no campo, como no caso dos estudos sobre erosão (Viana, 2019; Cui et al., 2015).

Desse modo, a aplicação dessa ferramenta pode prever os impactos que a agricultura, pecuária e as alterações no uso e ocupação do solo podem causar na qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas. Através da inserção de dados básicos da bacia hidrográfica, os modelos podem fornecer uma série de informações e estimativas sobre as variáveis

hidrológicas do local, tais como a vazão dos rios, a evapotranspiração, dados diversos sobre qualidade da água e água subterrânea, além da produção, transporte e deposição de sedimentos (Carvalho, 2014).

Dentre os modelos hidrológicos, o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pela *Agricultural Research Service* e pela *United States Department of Agriculture* (ARS/USDA), criado em 1990, vem sendo muito utilizado no Brasil. Ele é um modelo computacional, semi-distribuído, que possui o balanço hídrico como força motora por trás de todos os processos. O modelo SWAT permite representar os vários processos físicos da bacia, através dos quais é possível prever os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias grandes e complexas durante longos períodos (Neitsch *et al.*, 2011).

A interface ArcSWAT permite a inserção de dados de entrada no *software* ArcGIS, ela é razoavelmente amigável e essa interação com o SIG enriquece a análise das pesquisas, uma vez que permite a integração de bases espaciais e criação de mapas (Silva e Medeiros, 2014).

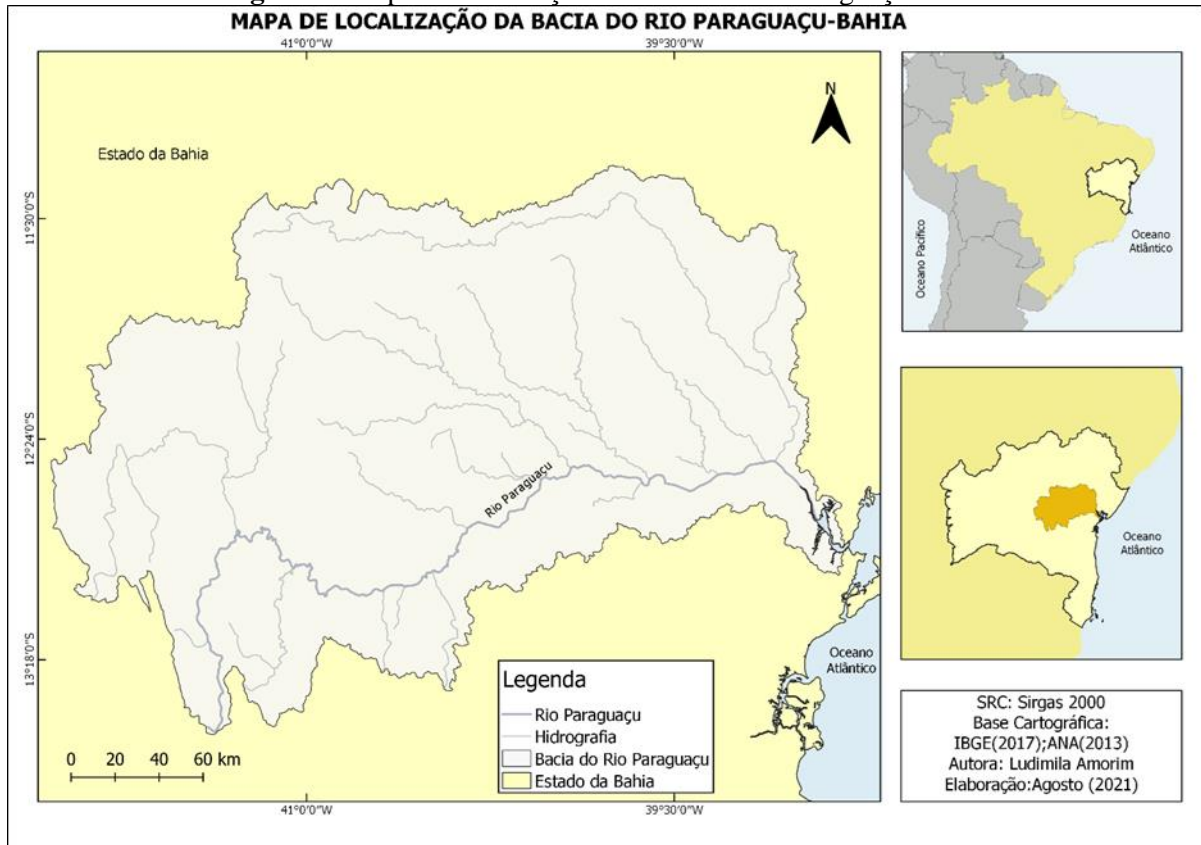
Conforme disposto, muitos trabalhos vêm sendo realizados no Brasil com o uso do SWAT no estudo de bacia hidrográficas, relacionados com a sua aplicabilidade, efeitos das alterações no uso do solo sobre os processos hidrológicos, análises de sensibilidade e calibração, balanço hídrico, mudanças climáticas, simulação de cenários hidrossedimentalógicos, previsão de vazão, estimativa de produção de sedimentos, ferramenta de uso no gerenciamento de bacias, dentre outros aspectos, alguns deles são realizados em bacias localizadas nos biomas mata atlântica, cerrado, caatinga e em regiões do semiárido (Veiga, 2019; Lelis *et al.*, 2012; Valério, 2014; Dantas *et al.*, 2015; Kuwajima, 2012; Miranda, 2017; Santos *et al.*, 2018; Marcon, 2013; Carvalho, 2011).

É válido destacar a complexidade da simulação dos processos hidrológicos nas regiões semiáridas, que ocorre principalmente devido a carência de dados e a heterogeneidade dos processos hidrológicos (Kan *et al.*, 2017; Mengistu *et al.*, 2019), o que salienta a importância do desenvolvimento de mais estudos com o uso de modelos hidrológicos nessas áreas, para que possam auxiliar na compreensão dos procedimentos metodológicos utilizados, a dinâmica hidrológica de funcionamento das bacias nesses ecossistemas e principalmente o impacto das mudanças no uso da terra nos recursos hídricos dessas regiões. Uma vez que aproximadamente 46,2% da superfície terrestre corresponde às áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, conhecidas coletivamente como terras áridas, e um terço da população mundial vive nessas áreas onde a escassez dos recursos hídricos é a principal causa dos conflitos da relação ser humano-natureza (Prývylie R, 2016; IPCC 2019). Outro aspecto importante é que nessas

regiões semiáridas existem muitas bacias agrícolas que sofrem eventos hidrológicos extremos (por exemplo, secas e inundações repentinas) e impactos humanos, o que ressalta a importância da disponibilidade e qualidade dos dados (Samemia, et al. 2020).

Nesse contexto, o estudo é realizado na bacia do rio Paraguaçu que se localiza na região centro-leste do estado da Bahia, sua área total é de 54.877 km² e ela ocupa 10% do território baiano, possuindo 60% da sua área incluída no semiárido brasileiro e no Bioma Caatinga (Figura 1). É considerada o mais importante sistema fluvial totalmente dentro do estado, possuindo grande importância econômica e estratégica, apresentando 94 barragens de portes e funcionalidades variadas (hidrelétricas, pequenas barragens, açudes) sendo seu principal reservatório a barragem Pedra do Cavalo, localizada no baixo curso próximo a foz (INEMA,2014).

Figura 1: Mapa de localização da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia



Fonte: A autora

O relevo da bacia é mais abrupto à oeste em seu alto curso, onde apresenta maiores altitudes representadas pela região da Chapada Diamantina, enquanto a leste as superfícies apresentam maiores suavizações, sendo representado por pediplanos e depressões. Tais características influenciam muito nas condições de microclima que é um fator a ser considerado

na região, a bacia varia do clima úmido/subúmido a seco na região semiárida, as precipitações apresentam valores anuais que variam de 600 mm a 1250 mm.

A bacia encontra-se bastante antropizada devido à redução da cobertura vegetal nativa com predomínio das atividades agrícolas (sequeiro ou irrigada) e pecuárias (extensiva ou não) com consequente formação de pastagens em grandes áreas. Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia (PERH –BA), a ecorregião da Caatinga encontra-se bastante alterada devido ao desmatamento, as áreas ciliares e úmidas são as que sofrem os maiores impactos com a interferência antrópica por sua aptidão agrícola.

Existem pesquisas realizadas com o SWAT na bacia do rio Paraguaçu, sobre os efeitos das mudanças climáticas nas respostas hidrológicas (Valério, 2014) e modelagem da chuva-vazão (Macedo, 2013). No entanto, não existem estudos sobre os efeitos dos diferentes cenários de uso e ocupação do solo nos processos hidrológicos da bacia, principalmente no que tange ao entendimento do comportamento dos componentes hidrológicos no período chuvoso e no período seco.

Nesse contexto, a aplicação do modelo SWAT na bacia torna-se fundamental para compreensão desses processos, principalmente por se tratar de uma bacia do semiárido que apresenta variação de clima úmido/subúmido à seco. Além disso, o fato de gerar dados qualificados e prever efeitos relacionados ao uso desordenado da bacia, pode contribuir de maneira significativa para alertar sobre a necessidade de melhor gerenciamento e, consequentemente, auxiliar na prevenção ou minimização de impactos na bacia.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos dos diferentes cenários de uso nos processos hidrológicos da bacia do rio Paraguaçu - Ba com a utilização do SWAT.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características fisiográficas da bacia;
- Determinar os usos na bacia;
- Caracterizar as unidades hidrológicas da bacia;
- Calibrar o modelo para as condições locais;
- Analisar o comportamento hidrológico nos diferentes cenários de uso no período de 2015 a 2019;
- Comparar o comportamento hidrológico da bacia no período seco e chuvoso;

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está constituída por seis capítulos que discutem os temas propostos no trabalho. O primeiro capítulo apresenta o trabalho indicando sua localização, importância e seus objetivos. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre os principais temas abordados para o desenvolvimento da pesquisa, como: modelos hidrológicos, modelo SWAT, bacias hidrográficas e processos hidrológicos, processos hidrossedimentalógicos e efeitos dos tipos de uso da terra nas bacias hidrográficas. O terceiro capítulo apresenta a caracterização fisiográfica da bacia, com informações importantes sobre o uso, substrato geológico, geomorfologia e solos. O quarto capítulo apresenta a descrição da metodologia utilizada para construção do trabalho, etapas de aquisição e inserção de dados no modelo, e a geração das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs). O quinto capítulo apresenta a definição e caracterização das Unidades de Respostas Hidrológicas em cada sub-bacia, os resultados da calibração e validação do modelo e a análise do comportamento hidrológico da bacia no período de 2015 a 2019, sob a perspectiva dos diferentes tipos de cobertura, uso e solos, no período seco e chuvoso. Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e sugestões da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a base bibliográfica que serviu de apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

Tornam-se cada vez mais preocupantes na atualidade as questões ambientais, sobretudo relacionadas à dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas. A compreensão sobre os processos hidrológicos, é de fundamental importância para os estudos ambientais, em virtude do crescimento acelerado, ocupação desordenada do solo e modernização agrícola, que dentre outros fatores, corroboraram para transformação da paisagem e consequente degradação dos recursos naturais. Tais problemas podem ocorrer principalmente em decorrência da falta de planejamento de uso e manejo do solo, o que acentua os processos de perda do solo por erosão hídrica, sedimentação, depósito e consequentemente o assoreamento dos corpos d'água.

Inferindo-se a bacia hidrográfica como um sistema aberto, torna-se complexo compreender a dinâmica dos processos hidrológicos, devido à variabilidade de fatores ambientais e a influência de diferentes componentes presentes na bacia, sejam esses de ordem natural, como aspectos associados à geomorfologia, geologia, vegetação e pedologia ou de ordem antrópica, dificultando assim a realização de análises qualitativas e quantitativas da mesma. Segundo Rennó (2003), a bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados, que consideram as propriedades médias para toda a bacia, ou então, pode ser subdividida segundo diversas abordagens a fim de considerar suas características espacialmente distribuídas. Nesse contexto, os modelos hidrológicos têm sido bastante utilizados como ferramenta de auxílio nos estudos e gestão dos recursos hídricos, visto que podem subsidiar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas, sendo uma alternativa de prevenção/minimização de futuros impactos.

O modelo hidrológico é caracterizado como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre a superfície e subsuperfície terrestre. O seu entendimento requer maior aprofundamento do conhecimento acerca do ciclo hidrológico e todos os processos físicos intrínsecos a precipitação, tais como a interceptação, evapotranspiração, infiltração e o escoamento superficial (Santos, 2009). É uma ferramenta que integra as relações dos fenômenos que caracterizam um sistema e busca auxiliar na representação do seu comportamento. Dessa forma, abrange um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros

que estão sendo utilizados principalmente na compreensão dos impactos das mudanças no uso da terra, e para prever alterações futuras nos ecossistemas (Ferrigo, 2014; Silva, 2007).

A concepção do processo de modelagem advém da representação de um sistema físico por meio de equações, ou seja, a representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (Tucci, 1986).

A heterogeneidade dos processos envolvidos nas bacias hidrográficas, tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos, que apresentam diferenciações em relação aos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998). Segundo o autor, os modelos podem ser classificados de acordo com o método de análise em diversos tipos, que devem ser escolhidos de acordo com o objetivo, escala e os fatores específicos envolvidos na pesquisa. Os modelos podem ser classificados como: Conceituais, Empíricos, Distribuídos, Concentrados, Contínuos, Discretos e Determinísticos.

- **Modelos Conceituais:** simulam fenômenos de uma área levando em consideração seus processos físicos, descrevendo seus subprocessos através de funções empíricas. De forma simplificada, representa todos os processos físicos conhecidos no ciclo hidrológico.
- **Modelos Empíricos:** Utilizam funções baseadas em análises estatísticas, sem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. Ajustam os dados calculados, observados através de funções empíricas, mas que estão relacionados com a física do sistema.
- **Modelos Concentrados:** representam a área da bacia de forma homogênea, considerando os dados de entrada e estatísticas como valores médios para toda a área.
- **Modelos Distribuídos:** possibilitam que a área da bacia seja representada através de divisões, malhas, sub-bacias com características hidrológicas semelhantes.
- **Modelos Contínuos:** modela fenômenos e processos da superfície terrestre ao longo de um determinado período.
- **Modelos Discretos:** quando as modificações de determinada área, ocorrem em intervalos determinados.
- **Modelos Determinísticos:** quando para uma mesma entrada, o modelo sob condições iniciais iguais, produz uma mesma saída. Ou seja, o modelo produz respostas iguais para o mesmo conjunto de entrada, não ocorrendo variáveis.

Para utilização e escolha do modelo de maneira adequada, é preciso compreender sua estrutura, todas as suas etapas, parâmetros e limitações. Limites que decorrem da quantidade e qualidade dos dados adquiridos, problemas na formulação matemática de alguns processos e também na simplificação do comportamento espacial de fenômenos e variáveis. E parâmetros que variam em função do método matemático utilizado e representam os processos físicos da bacia, sendo necessária muitas vezes a calibração do modelo, para que possa representar mais fielmente o fenômeno a ser estudado (Viana, 2019; Santos, 2009).

2.1.1 O Modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico em escala de bacia, executado em passos de tempos diários, desenvolvido pela *Agricultural Research Service e pela Texas A&M University*. Com o modelo é possível prever os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias grandes e complexas durante longos períodos (Neitsch *et al.*, 2011).

O SWAT é um modelo computacional, de tempo contínuo, que permite que os usuários possam estudar impactos de longo prazo nos componentes do meio natural, como aumento gradual dos poluentes no solo e o impacto nos corpos d'água (Neitsch *et al.*, 2011).

Desde sua criação em 1990, a ferramenta vem passando por atualizações e aprimoramentos que resultaram em melhorias significativas e novas versões do simulador. Nesse contexto, foi desenvolvida a interface ArcSWAT que permite a inserção de dados de entrada no software ArcGIS, integração que facilita a manipulação pelo usuário e auxilia na aquisição de dados geoespaciais, cuja demanda é grande nesses modelos semi-distribuídos (Arroio Jr., 2016).

Independentemente do tipo de estudo a ser realizado pelo SWAT, é importante destacar que o balanço hídrico é a força motora por trás de todos os processos físicos realizados na bacia hidrográfica. Para que os estudos realizados com o modelo tenham um diagnóstico preciso sobre a movimentação dos pesticidas, sedimentos e nutrientes, dentre outros processos físicos, é necessário que o ciclo hidrológico simulado pelo modelo esteja em conformidade com os acontecimentos reais da bacia hidrográfica (Neitsch *et al.*, 2011).

Durante o processo de modelagem a bacia hidrográfica é delimitada e dividida em sub-bacias, tendo como base o modelo digital do terreno. A divisão da bacia em sub-bacias é um processo benéfico, que auxilia na compreensão das características e processos que ocorrem em cada parte da bacia, onde por vezes é grande a heterogeneidade dos sistemas envolvidos

(Neitsch *et al.*, 2011). Fica a critério do usuário definir a quantidade de sub-bacias que vai utilizar, a delimitação normalmente é feita com base nos pontos de coleta de dados ou pontos de intersecção de cursos de água.

Dentro de cada sub-bacia as informações serão agrupadas em Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs), através da inserção dos dados geoespaciais de solo, uso e cobertura da terra e declividade. As unidades hidrológicas são como polígonos homogêneos, com uma única combinação de tipos de solos, uso e declividade. Que possuem comportamentos hidrológicos similares em termos de balanço hídrico, tais como infiltração, escoamento superficial e recarga para os lençóis freáticos, além de trocas de energia, água e vapores com a atmosfera a partir da dependência dos processos hidrológicos em relação as feições básicas da paisagem (Grehs, 2003).

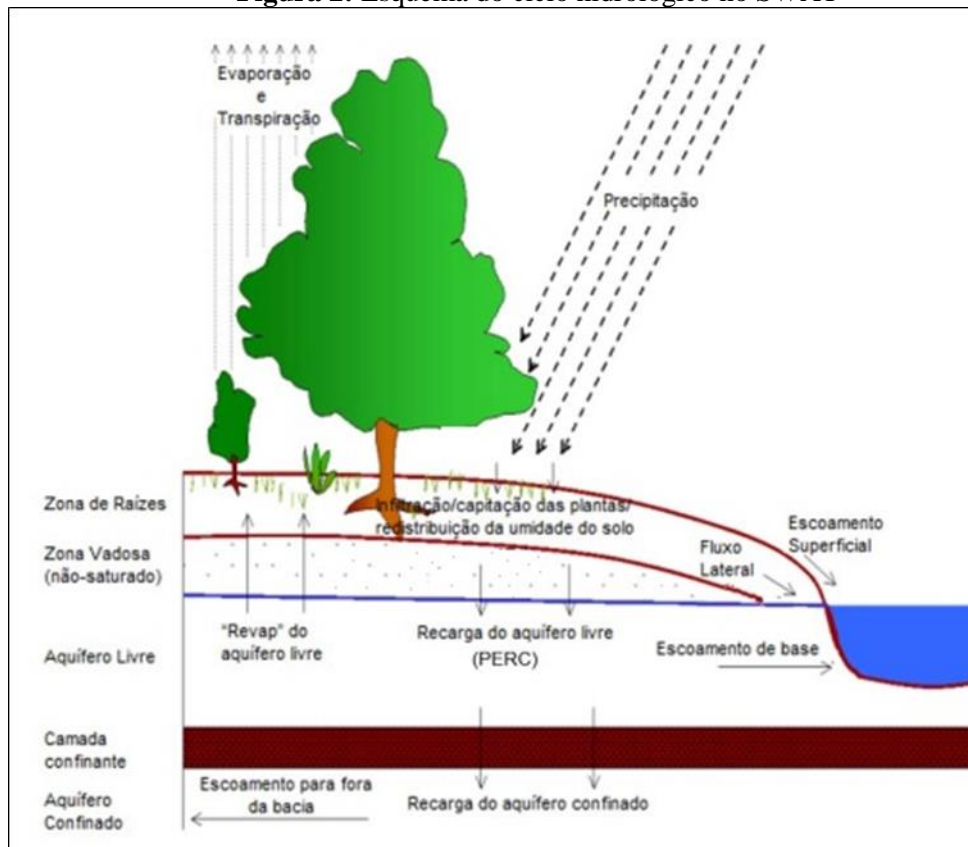
Dessa forma, o escoamento, transporte de sedimentos e de químicos agrícolas são calculados para cada HRU e propagado para obter o deflúvio total na bacia hidrográfica, aumentando a precisão e melhorando a descrição física do balanço hídrico. O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (Neitsch *et al.*, 2011).

Além dos dados geoespaciais, o modelo requer dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar e umidade relativa (Duraes, 2010). Estes dados diários que alimentam o SWAT compõem as forçantes do modelo, que variam durante o período estudado. Já os dados de tipo de solo, uso e cobertura e o modelo digital de elevação, são estáticos durante a modelagem, mantendo um mesmo valor durante toda a análise.

A simulação hidrológica realizada pelo SWAT é dividida em duas fases relacionadas ao ciclo hidrológico (Figura 2). A primeira fase é a do terreno do ciclo hidrológico, que é dividida em sete módulos: clima, hidrologia, cobertura vegetal/crescimento de plantas, erosão, nutrientes, pesticidas e práticas de manejo. Essa fase está associada ao controle da quantidade de água, sedimento, nutrientes e descarga de pesticidas no canal principal da sub-bacia. Para isso são realizados os cálculos de evapotranspiração potencial e real, o escoamento superficial, o deslocamento da água pelas camadas do solo, o fluxo de base, a produção de sedimentos, entre outros, para cada sub-bacia (Arroio Jr.,2016).

A segunda fase é a do itinerário ou propagação do ciclo hidrológico, que está relacionada com a movimentação da água, nutrientes, sedimentos e descarga de pesticidas, através das vertentes e da rede de drenagem até o exutório da bacia, ou seja, é o encaminhamento dos acúmulos da primeira fase através do curso d'água da bacia (Neitsch *et al.*, 2011).

Figura 2: Esquema do ciclo hidrológico no SWAT



Fonte: Neitsch *et al.*, (2011)

As etapas de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros físicos atuam no intuito de representar o sistema hidrológico da bacia da melhor forma possível, em consonância com a sua realidade. Como o modelo SWAT é semi-distribuído, ele é muito sensível a uma grande variedade de dados de entrada, relacionados ao solo, vegetação, clima, canal, reservatórios e aquíferos, dentre outros. Para tanto, é de grande importância identificar os parâmetros que mais influenciam no modelo e sua relevância nos resultados, diminuindo as incertezas e garantindo resultados satisfatórios nas simulações (Adriolo *et al.*, 2008; Lelis *et al.* 2012).

As etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT, até a versão 2009.93.7b, são realizadas no próprio ArcSWAT. Nas versões mais recentes do modelo (2012.10.19) esses processos passaram a ser executados em outra interface, o SWAT-CUP. Essa interface foi desenvolvida para agregar algoritmos de otimização, facilitando essas análises (Teixeira, 2018).

Após a identificação dos parâmetros mais sensíveis, normalmente os mesmos são submetidos a calibração. O processo de calibração consiste na modificação dos valores de entrada dos parâmetros, dentro de uma média de intervalos aceitáveis, para que o modelo replique as condições naturais do modelado.

O processo de calibração pode ser realizado de forma manual ou automática. A calibração manual é realizada através de métodos de tentativa e erro, onde o modelo é executado várias vezes e analisa-se os resultados a fim de que se possa observar os ajustes à dados reais, utilizando como base médias usadas por outros autores para a mesma área de trabalho ou áreas com condições físicas similares, ou a própria experiência e conhecimento do usuário. No que tange a calibração automática, a mesma é feita através de técnicas de otimização, que com o auxílio de algoritmos de busca determinam diversos conjuntos de parâmetros que retornam uma boa correlação das variáveis de saída do modelo com os dados observados em campo (Collischonn e Tucci, 2003).

Para ajustar o desempenho do modelo, normalmente em qualquer uma das formas de calibração, são utilizados métodos estatísticos tais como o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe - COE (Lelis et al. 2012). Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado para situações semelhantes àquelas em que será aplicado. Para isso, outra série temporal de dados, diferente da utilizada na calibração, deve ser utilizada no processo de validação (Alansi et al., 2009). Através do processo de validação é feita a comparação entre as respostas modeladas e os valores observados para garantir a qualidade dos resultados obtidos pelos modelos.

2.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS E PROCESSOS HIDROLÓGICOS

A bacia hidrográfica representa um conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes, sistema de interação entre fatores bióticos e abióticos de grande importância como unidade espacial de planejamento para sociedade. O seu conceito abrange além dos aspectos hidrológicos, todo o conhecimento das estruturas biofísicas, as mudanças no padrão de uso da terra e suas implicações ambientais (Pires, 2002).

Os processos que atuam na bacia hidrográfica ocorrem a partir do ciclo hidrológico, sendo esta considerada como o melhor espaço para avaliação do comportamento hídrico, uma vez que possui o espaço de entrada e saída da água, e a seção de rio que a define (Tucci, 2009).

Os principais processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica são os fluxos verticais e longitudinais. Os fluxos verticais representados pela precipitação e evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, inicialmente são os que mais afetam o balanço do volume de água na bacia, uma vez que possuem relação com os processos de absorção e reflexão da radiação solar. Os fluxos longitudinais são representados pelo escoamento superficial e subterrâneo (Tucci et al. 2006).

O autor destaca que a vegetação possui grande importância no balanço de energia e fluxo de volume de água na bacia, através da sua capacidade de retenção de água, evapotranspiração e interceptação da precipitação. A vegetação retém parte da precipitação para suas atividades morfofisiológicas, depois quando elimina a água pela sua respiração e evapotranspiração contribui com sua reciclagem. Em trabalho realizado por Miranda (2017) sobre o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal, o autor ressalta que à medida que a Caatinga é degradada, a temperatura do ar e da superfície, a evaporação da água no solo e a mudança do ciclo geoquímico aumentam, tornando mais difícil cultivar próximo da Caatinga. O que suscita a importância da compreensão do balanço hídrico, em especial em florestas nativas de regiões áridas e semiáridas.

Além disso, as mudanças no tipo de uso e cobertura que ocorrem nas bacias hidrográficas (urbanização, impermeabilização, desmatamento e atividades agropecuárias) influenciam na dinâmica dos processos hidrológicos, uma vez que as características do solo, a densidade da vegetação e o tipo de uso e cobertura possuem efeito sobre o comportamento dos componentes hidrológicos do balanço hídrico, principalmente a evapotranspiração, infiltração e o escoamento.

A evapotranspiração exerce papel fundamental dentro do ciclo hidrológico e é considerada um dos principais componentes, dada a sua magnitude, grande parte da saída de água do sistema de uma bacia ocorrerá por evapotranspiração, com valores que em muitos casos podem exceder a precipitação, principalmente em áreas de clima semiárido, onde a evapotranspiração é regulada pela água disponibilizada pela chuva e também pela capacidade de retenção de água nos solos (Bacelar, 2005).

A precipitação ao atingir o solo pode infiltrar ou escoar a depender das características relacionadas principalmente ao tipo de solo, sua porosidade, densidade, tipo de cobertura, condições de umidade e compactação. Em áreas de florestas a capacidade de infiltração de água nos solos é maior, pois a cobertura vegetal dissipa a energia da chuva e protege a superfície do arraste das partículas, aumentando a infiltração, diminuindo o escoamento e a erosão. Além disso a capacidade de transpiração da vegetação é maior, o que conseqüentemente diminui a umidade dos solos, o que também contribui com uma maior infiltração de água, em detrimento da umidade antecedente e da permeabilidade. Em contrapartida, em áreas desmatadas, compactadas, a infiltração de água no solo é menor e o escoamento superficial maior.

Outro aspecto importante é o aumento do fluxo de água nos rios, em razão da diminuição da transpiração pelo desmatamento, isso ocorre porque com a diminuição da perda de água por evapotranspiração, a tendência é que ocorra um aumento no nível do lençol freático e

elevação do fluxo superficial de saturação nas áreas mais rebaixadas do relevo (Bacelar, 2005; Rupprechet e Schoefield, 1989.)

No que tange a estrutura e textura dos solos, normalmente aqueles mais porosos, apresentam menor densidade e menor compactação, conseqüentemente maior capacidade de infiltração, todavia as condições associadas a variações de umidade, intensidade da precipitação e saturação influenciam muito na capacidade de infiltração de água no solo. Segundo Tucci et al. (2006) existe uma camada do solo não saturada, onde ocorre infiltração e percolação e outra saturada onde ocorre armazenamento e escoamento subterrâneo. Na camada não saturada podem existir condições de escoamento que dependem de vários fatores.

Com a precipitação, os solos começam a ficar saturados e a taxa de infiltração diminui, com o excedente da precipitação não infiltrado, forma-se o escoamento superficial. Além disso, pode ocorrer escoamento superficial sem o solo atingir o nível de saturação dele, situação associada a chuvas torrenciais em ambientes secos, onde a velocidade da chuva é maior do que a velocidade de infiltração de água no solo.

Segundo Lorandi e Cançado (2002) o escoamento superficial ocorre através da ação da gravidade gerada pelo desnível apresentado entre as cotas (encostas), a qual vence a força de atrito existente entre a água e a superfície do solo, favorecendo os processos erosivos. Toda água que é escoada vai para rede de drenagem principal da bacia hidrográfica, sendo o escoamento do rio influenciado por diversos fatores, tais como a declividade, rugosidade, seção de escoamento e obstruções ao fluxo.

2.2.1 Processos hidrológicos e efeitos dos tipos de uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas

Dentro de uma bacia hidrográfica os processos hidrológicos influenciam diretamente nos processos sedimentológicos que regem o deslocamento das partículas sólidas, que interferem na evolução e formação de vertentes, que condicionam o escoamento, ou seja, são processos intimamente vinculados (Viana, 2019; Zanadrea et al. 2017).

O processo de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica depende da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos da mesma, que envolvem a desagregação, erosão, transporte, sedimentação e depósito das partículas, nas calhas dos rios, lagos, encostas e reservatórios. São processos contínuos que possuem um fluxo e uma dinâmica de construção e evolução das paisagens terrestres, sobretudo na formação dos diferentes ambientes existentes nas próprias bacias hidrográficas. Todavia, esses processos não ocorrem de forma isolada,

possuem relação com o material de origem, relevo, solo, clima, vegetação e principalmente o tipo de uso e ocupação, que ocorre sem planejamento e de forma desordenada, intensificando esses processos e transformando as condições de equilíbrio natural nas bacias (Zanadrea et al. 2017; Carvalho, 2008; Tucci, 2009).

As principais alterações no uso e cobertura do solo de bacias hidrográficas estão ligadas a expansão das atividades agrícolas e pecuárias, a substituição da vegetação natural, a urbanização, o desmatamento e obras civis na própria bacia hidrográfica, dentre outras atividades, que tem contribuído com o aumento dos processos erosivos, o transporte de sedimentos, contaminantes nos cursos de água e o assoreamento de rios e reservatórios (Carvalho et al., 2005).

Dentro desse contexto, a cobertura vegetal desempenha papel fundamental na redução dos processos erosivos, aumentando a estabilidade e o teor de agregados do solo através da produção de matéria orgânica, diminuindo o impacto da gota da chuva por meio de suas folhas e raízes. Quanto maior a densidade da cobertura vegetal, maior é sua importância na redução da produção de sedimentos no processo de escoamento superficial (Lorandi e Caçado (2002).

Silva et al. (2017) analisando a influência do uso e cobertura do solo no escoamento e produção de sedimentos numa bacia do bioma Caatinga, concluiu que comparando os resultados dos dois períodos analisados (1985 e 2015) a produção de sedimentos na bacia foi maior no ano de 2015 em virtude do aumento da área de solo exposto, com crescimento de 290% (1,34 ton/ha.ano) em relação ao uso da primeira simulação (0,87 ton/ha.ano). O autor destacou que a mudança do uso do solo dessa região e o tipo de solo predominante (Luvisolo Crômico) podem ter contribuído para isso, pois a maioria da vegetação arbustiva foi retirada e esse tipo de solo que é característico do semiárido, apresenta mudança de textura abrupta, sendo mais suscetível a erosão. Muitos trabalhos evidenciam os impactos causados pelas alterações do uso e cobertura nos processos hidrossedimentalógicos de bacias no bioma da Caatinga, que está entre os ecossistemas mais ameaçados da Terra com altas taxas de conversão de vegetação nativa em agricultura (Menezes et al., 2012; Vieira et al., 2013; Miranda, 2017).

Em relação as áreas agrícolas as principais alterações estão relacionadas à remoção da cobertura vegetal e perda da camada superficial, sendo a erosão hídrica a principal causa da degradação e uma ameaça à integridade dos ecossistemas aquáticos devido aos processos de desprendimento, arraste das partículas do solo e conseqüente aumento da produção de sedimentos (Bertoni & Lombardi Neto, 1999).

Quando a conversão da vegetação em agricultura ocorre para o plantio de culturas que não sofrem alterações frequentes na sua estrutura principal (café e fruticultura) os

desmatamentos são considerados de intensidade pequena e o escoamento é menor. Todavia, quando o desmatamento é feito para a utilização de cultivos anuais, intensivos, o impacto é maior. Isso ocorre porque as culturas anuais provocam a mudança de cobertura do solo anualmente para diferentes plantios, e principalmente porque o preparo do solo ocorre antes do período chuvoso e a precipitação pode ocorrer durante o plantio, ficando o solo sujeito aos impactos da chuva (Tucci et al., 2006).

Em relação às atividades agropecuárias, extensas áreas acabam sendo queimadas para dar lugar à pecuária extensiva, sendo o solo compactado pelo pisoteio do gado, dificultando a infiltração de água, aumentando o coeficiente de escoamento e implicando na diminuição da recarga, aumento da erosão, assoreamento de corpos hídricos e desenvolvimento da vegetação. De acordo com Rodrigues et al. (2018), as constantes mudanças no uso e cobertura da terra, resultantes da agropecuária, provocam alterações significativas no balanço de água do solo, com reflexos tanto em camadas superficiais quanto sub-superficiais.

Outro aspecto muito importante relacionado à dinâmica do transporte de sedimentos na bacia é o assoreamento de reservatórios. A construção de reservatórios ou açudes numa bacia hidrográfica em detrimento de múltiplos usos (controle de enchentes, agricultura, irrigação, abastecimento público e geração de energia) acaba alterando a dinâmica natural do rio e criando uma barreira de impedimento para passagem dos sedimentos. Como a velocidade de escoamento da água é menor nos lagos formados pelo reservatório, as partículas que são transportadas acabam sendo depositadas no fundo.

Ao longo do tempo ocorre um potencial aumento do assoreamento e surgem consequências associadas a inundações em áreas a montante do reservatório, redução da seção e transporte de maior quantidade de sedimentos para a jusante, que são depositados na região do volume morto do reservatório (Carvalho, 2008). A intensidade desse processo pode diminuir a capacidade de armazenamento do reservatório, além de ocasionar diferentes níveis de impactos nos ambientes localizados a jusante da barragem, tais como a desestabilização e erosão da costa, que perde o equilíbrio dinâmico e sazonal entre os fluxos fluviais de suprimento de materiais e consequente retrabalhamento destes materiais pelas forças oceanográficas, além da redução da produtividade primária estuarina e os estoques pesqueiros, prejudicando as comunidades ribeirinhas (Souza et al. 2011).

2.3 Utilização do modelo SWAT no Mundo

O modelo SWAT vem sendo aplicado em diversas partes do mundo no desenvolvimento de estudos ambientais com múltiplas finalidades, gerando uma vasta literatura sobre o seu uso. Além disso, muitas aplicações do modelo foram realizadas por agências governamentais na Europa e nos Estados Unidos (Gassman et al., 2007; Arroio Jr, 2016). Nesse contexto esse tópico aborda alguns estudos realizados com o modelo SWAT em várias regiões do mundo, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, que é onde está inserida a área de estudo desse trabalho.

No que tange a aplicação do SWAT em regiões semiáridas no mundo, segundo um estudo de revisão desenvolvido por Rocha et al. (2023), só foram identificados artigos científicos publicados sobre a utilização do SWAT em regiões semiáridas a partir do ano de 2009, sendo que a maior ênfase teve início no ano de 2014.

Os autores destacaram que no período de 2009 a 2022, foram publicados 234 estudos, dos quais, aproximadamente 62% ocorreram na Ásia, 21% na América, 9% na Europa, 7% na África e 1% na Oceania. Os estudos foram divididos em 5 grupos, com foco em agricultura, governança hídrica, conservação ambiental, processos hidrológicos e eventos extremos. É importante ressaltar que teses, dissertações e resumos publicados em anais de eventos, não foram considerados nessa revisão. Dentre as conclusões ao analisar todos os estudos, os autores ressaltam que a resposta dos processos hidrológicos de acordo com a dinâmica da vegetação é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão de bacias hidrográficas nas regiões semiáridas, e principalmente que o sucesso na utilização do modelo não depende do local onde é aplicado e sim da disponibilidade de dados consistentes e sem falha, sendo esse um dos principais desafios.

Tais dados evidenciam ao mesmo tempo a aplicabilidade do modelo SWAT como ferramenta de auxílio na realização de estudos ambientais em condições diversas, e também a necessidade da realização de mais pesquisas com o modelo nas regiões semiáridas, principalmente no semiárido brasileiro que é o foco desse estudo, tendo em vista que dos 21% da América, somente 18 artigos científicos publicados foram do Brasil. Todavia, esse número também pode ser interpretado como um indicativo da carência de dados consistentes para serem utilizados, o que pode ter dificultado essa produção.

Em estudo realizado por Brouziyne et al. (2017) sobre calibração manual e análise da sensibilidade do balanço hídrico de uma bacia localizada no noroeste do Marrocos, numa região semiárida dominada por atividades agrofloretais com a utilização do SWAT, o autor analisou

12 parâmetros diferentes relacionados ao fluxo de base, escoamento e total de rendimento de água, dos quais 4 apresentaram maior sensibilidade: CN2¹, SOL-AWC², ESCO³ e GWQMN⁴. Segundo o autor o parâmetro que apresentou maior sensibilidade aos três componentes foi o CN2 e isso pode ter sido impulsionado pela resposta da cobertura da terra na bacia, que em sua maioria (86%) correspondem as áreas de pastagens, terras áridas e cultivadas que apresentam escoamento significativo mesmo em eventos de precipitação menores. Já a sensibilidade dos parâmetros SOL-AWC, ESCO e GWQMN pode ser explicada pela classe de solos dominante na área, pertencentes aos grupos hidrológicos A e B, que possuem taxas de infiltração altas e moderadas e alta capacidade de drenagem. Os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo foram o R2⁵, NSE⁶ e PBIAS⁷. Na calibração o NSE e R2 apresentaram valores mensais de 0,68 e 0,85, e valores diários de 0,58 e 0,79, respectivamente. O valor de PBIAS foi de 17% e 19% para os dois intervalos. Na validação, os valores mensais obtidos foram NSE 0,88, R2 0,91 e PBIAS de 13%, no intervalo diário os valores foram respectivamente, 0,65, 0,73 e 20%. Sendo desta forma o desempenho geral do modelo SWAT considerado satisfatório, levando em consideração as condições limitadas de dados e também a característica intermitente da bacia. Dentre as condições limitadas de dados, os autores destacaram a existência de apenas uma estação hidrométrica disponível para medição da vazão, pequena quantidade e má distribuição das estações de medição climática ao longo da bacia, e séries temporais contendo lacunas, o que culminou na determinação de um período de calibração e validação curtos.

Na literatura sobre o uso do SWAT, principalmente em regiões semiáridas, a maioria dos estudos indicam o CN2 como o parâmetro mais sensível da análise de sensibilidade. O parâmetro CN2 corresponde a curva-número para a condição de umidade, cuja função é o cálculo do volume de escoamento superficial. Esse parâmetro vai ser muito influenciado pelo tipo de uso e cobertura e também pelos tipos de solos da área de estudo. Como muitos estudos indicam as mudanças nos usos das bacias, salientando o avanço das pastagens, áreas urbanizadas e agrícolas, essas atividades intensificam a compactação dos solos, alteram as estruturas e acabam interferindo nas condições de umidade, o que reflete no escoamento. Outro aspecto passível dessa sensibilidade, diz respeito a existência de solos rasos sujeitos a chuvas

¹ Número da curva de escoamento.

² Quantidade de água disponível nas camadas do solo.

³ Fator de compensação de evaporação do solo.

⁴ Água do aquífero profundo que retorna ao canal.

⁵ Coeficiente de correlação de determinação.

⁶ Coeficiente de eficiência.

⁷ Percentual de viés das vazões simuladas pelo modelo em relação às observadas.

concentradas, o que é muito comum nas áreas de clima semiárido do Brasil, onde ocorrem períodos de estiagem e má distribuição das chuvas, sendo muito frequente chover em um dia, a quantidade de água suficiente para um mês.

Aidi Huo et al. (2020) também destacam o parâmetro CN2, na realização de um estudo de comparação de duas abordagens automáticas para análise de sensibilidade do modelo SWAT na bacia do rio Heihe, região árida de clima semiárido, no noroeste da China. Os algoritmos utilizados foram o de ajuste de incerteza sequencial (SUFI-2) e o *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA). Os resultados indicaram que o SWAT teve um desempenho muito bom na bacia do rio Heihe, de acordo com os dados de escoamento observados no período de 2005 a 2013, o coeficiente de determinação da simulação (R_2) e o coeficiente de eficiência (Ens) apresentaram valores superiores a 0,8. Em ambas as abordagens de análise de sensibilidade, a maior importância é atribuída ao parâmetro CN2 (número da curva de escoamento) que exibe uma sensibilidade muito alta. O valor inicial do CN2 é 79,0 e o valor calibrado final é 84,2. Em comparação com o SCE-UA, o SUFI-2 fornece quase a mesma classificação geral dos parâmetros, porém leva menos tempo e possui maior precisão. Os autores concluem que o SUFI-2 é uma ferramenta prática e flexível para se obter uma simulação confiável de análise de incerteza no SWAT, levando a um maior entendimento e melhores valores estimados

Mengistua et al. (2019) realizaram um estudo sobre as técnicas para calibração e validação do modelo SWAT em bacias áridas e semiáridas com escassez de dados na África do Sul. Neste estudo o SWAT foi utilizado para estimar todos os componentes do balanço hídrico da bacia. Para a calibração e validação do modelo foi utilizada a abordagem de regionalização com similaridade física, que se baseia na abordagem de que as bacias que tenham atributos fisiográficos e climáticos semelhantes, teriam também respostas hidrológicas semelhantes. Deste modo, com essa metodologia é selecionada uma bacia com características semelhantes a bacia de interesse, que tenha uma estação hidrométrica funcional. Logo, a bacia semelhante será calibrada e validada e os parâmetros do modelo serão transferidos a bacia não medida, cujos dados são escassos. Segundo os autores os dados de descarga desempenham um papel de relevância no procedimento, e como a bacia da área de estudo não possui estação hidrométrica para medição da vazão, os autores adotaram a regionalização por similaridade para a calibração e validação do modelo. Com esse objetivo eles utilizaram o estudo de tipagem eco-regional e classificação de rios utilizado pelo Departamento de Assuntos Hídricos e Florestais, que cobre toda a África do Sul e agrupa os rios semelhantes. Assim foi selecionada a bacia para a captação doadora (denominada A21C). Foram empregados processos de calibração e validação bidirecionais, um na captação do doador (captação quaternária A21C) com um programa de

calibração semiautomático, SWAT-CUP, e o segundo foi conduzido na captação alvo (Soutloop) com a interface ArcSWAT do auxiliar de calibração manual. Na análise de sensibilidade, dos 16 parâmetros listados, três foram considerados mais sensíveis: ALPHA, CN2 e SHALLST. Os indicadores de desempenho mostraram que tanto na calibração como na validação os resultados foram considerados aceitáveis. Os autores ressaltaram que a modelagem hidrológica em bacias não medidas (sem dados de estação hidrométrica) está sujeita a incertezas devido à indisponibilidade de dados para os processos de calibração e validação, por isso a abordagem de regionalização deve ser aplicada com cautela. Os autores concluíram que este estudo mostra que a transferência de parâmetros de modelo calibrados de uma bacia hidrográfica doadora para uma bacia hidrográfica alvo, sem inspeção adicional dos resultados da bacia hidrográfica alvo, causaria uma incerteza potencial nos resultados do modelo. Nesse estudo a calibração manual adicional foi feita como uma alternativa para inspecionar a incerteza. Outro ponto sobre o tipo de abordagem utilizado na metodologia diz respeito ao tamanho das bacias, segundo os autores essa informação não foi considerada durante a avaliação de semelhanças das bacias, uma vez que o foco era a vazão, todavia é preciso considerar os tamanhos no processo de regionalização.

De fato, a abordagem utilizada é interessante e mostra-se como uma alternativa frente à dificuldade na obtenção de dados completos e com qualidade em regiões semiáridas, todavia é preciso ter cautela diante da quantidade de incertezas conforme pontuam os autores. No que tange as semelhanças entre as características físicas que devem ser consideradas na análise, compreende-se que a forma e tamanho da bacia também podem influenciar no comportamento hidrológico da mesma, a exemplo do tempo de concentração, que segundo Tucci et al. (2014) é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia deslocar-se até a seção principal, ou seja, tempo que é necessário desde o início da precipitação para que toda bacia contribua com a vazão na seção de controle, ou mesmo a própria distribuição da precipitação na bacia, onde a mesma quantidade pode inundar áreas ou não a depender de características inerentes ao tamanho e forma da bacia, associadas a outros aspectos.

Sujeet Desai et al. (2021) realizaram com o SWAT a calibração multilocal e avaliação do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica semiárida da Índia Central. O período de calibração foi de 2000-2005 e a validação de 2006-2011, para ambos foram utilizados o SUFI-2 (SWAT-CUP). Os autores selecionaram 10 parâmetros para calibração, identificados através da revisão de estudos realizados na área de trabalho, dentre os quais foram identificados como mais

sensíveis: CN2, SOL_AWC, GW_DELAY⁸ e REVAPMN⁹. Os parâmetros que controlam o escoamento superficial foram os mais sensíveis (CN2 e SOL_AWC) seguidos pelos parâmetros que influenciam o fluxo de base (GW_DELAY e REVAPMN). Os autores fizeram a calibração e validação multifocal, ou seja, para cada uma das estações hidrométricas, nesse caso foram utilizadas 4 estações: Shahijina, Mohana, Garrauli e Basoda. Para calibração foram analisados os valores de NSE e RSR (raiz do erro quadrático médio com relação ao desvio padrão). O desempenho do modelo para a estação Shahijima foi “muito bom” com valores de NSE e RSR de 0,84 e 0,40. O desempenho de Mohana foi “muito bom”, com valores de NSE e RSR de 0,91 e 0,30, respectivamente. Porém para as duas estações o PBIAS permaneceu superior a ± 10 e o desempenho do modelo foi classificado como “Não satisfatório” e “Bom”. O desempenho da estação Garrauli foi classificado como “Satisfatório” com valores de NSE e RSR de 0,60 e 0,63. O valor de PBIAS foi inferior a ± 5 , indicando um desempenho muito bom. A estação de Basoda apresentou valores de RSR, NSE e PBIAS de 0,33, 0,89 e -0,9, respectivamente indicando um desempenho muito bom. Segundo os autores os resultados indicaram que o SWAT conseguiu capturar muito bem os fluxos mensais. No que tange a validação, o período utilizado foi de 2006-2011, os valores de NSE, RSR e PBIAS para a estação Shahijina foi de 0,75, 0,5 e ± 10 , considerados com “bom”. Na estação de Mohana, o desempenho foi bom, com valores de NSE e RSR de 0,79, 0,45, já o valor de PBIAS foi de ± 15 , indicando uma subestimação. Na estação de Garrauli de NSE, RSR e PBIAS foram de 0,65, 0,59 e 11,6, e na estação de Basoda foram de 0,85, 0,39 e 14,9, respectivamente. Nas quatro estações os valores de R2 variaram de 0,83 a 0,88, sendo considerado “muito bom”. Na análise do balanço hídrico sazonal, os autores observaram que durante o período de monções a precipitação, o escoamento e a evapotranspiração apresentaram os valores máximos, e no período pós-monção, esses valores diminuem, porém o fluxo de base apresentou valor significativo. Os maiores valores de precipitação, evapotranspiração, escoamento e fluxo de base foram encontrados na parte montante da bacia. A evapotranspiração é o principal componente da bacia e constitui 61% da perda da precipitação total. Os autores concluíram que embora a parte a montante da bacia receba mais chuva, a maior parte dela flui como escoamento superficial ou é perdida como evapotranspiração, motivo pelo qual a região sofre uma escassez aguda de água durante os meses restantes do ano. Na porção média e inferior da bacia, o escoamento superficial é

⁸ Tempo de retardo da água subterrânea.

⁹ Limite no aquífero raso.

armazenado devido à presença de grandes projetos de irrigação como barragens, o que também contribui para a recarga das águas subterrâneas.

Essas barragens utilizadas para irrigação são do tipo subterrânea, cuja técnica de construção tem como objetivo o armazenamento hídrico no sedimento aluvionar de um curso d'água, visando à exploração agrícola de vazante e/ou a irrigação (Brito et al. 1989). Essas barragens fazem com que a água fique armazenada no perfil do solo com perdas mínimas de umidade, em decorrência da evaporação ser mais lenta, o que auxilia na manutenção da umidade dos solos, em muitos casos até no período de secas prolongadas (Silva et al. 2007), contribuindo dessa maneira com a recarga subterrânea. É importante ressaltar que a dinâmica de funcionamento dessas barragens é diferente de uma barragem convencional ou mesmo dos açudes que são comumente construídos nas regiões semiáridas do Brasil, nas barragens subterrâneas o processo de perda de água por evaporação é mínimo ou nulo.

Abdula e Al-Shurafat (2020) realizaram com o SWAT, a modelagem da precipitação e o escoamento na bacia do Rio Yarmouk, localizada numa região semiárida entre os países: Síria e Jordânia. Segundo os autores o rio Yarmouk é o maior afluente do rio Jordão, possui 60 km e forma uma fronteira entre a Jordânia e a Síria. Na região da bacia, os verões são secos e quentes e os invernos apresentam temperaturas moderadas e clima chuvoso. A precipitação média apresenta variação de 486 mm na região de maior altitude (Montanha Golã) e 106 mm nas planícies do sul (deserto da Jordânia). O período de calibração foi de 1986-1995 e a validação de 1996-2000. A modelagem da bacia foi realizada para dois cenários: (1) condições de pré-desenvolvimento, onde não intervenção humana; e (2) condições pós-desenvolvimento, onde houve intervenção humana (condições urbanas). Os parâmetros mais sensíveis foram, por ordem de maior de sensibilidade, respectivamente: CN2, SOL_AWC, SOL_Z, ESCO e GR_REVAP. Os valores de R2, NSE e PBIAS para a calibração e validação nas condições (1) foram respectivamente: 0,87, 0,66, -41.4, 0,81, 0,80 e 9,5. Nas condições (2) os valores de calibração e validação foram: 0,89, 0,88, 13.2, 0,81, 0,80 e 2,78. Os autores observaram que calibrar o modelo para as condições pós-desenvolvimento produz melhores resultados do que calibrá-los sob condições de pré-desenvolvimento, segundo eles isso ocorre devido à maior flexibilidade para calibrar através dos parâmetros de gestão da água da bacia.

Os autores ressaltaram os desafios encontrados na modelagem do ciclo hidrológico do rio *Yarmouk* devido à má qualidade dos dados da parte Síria, baixa escala do mapa e extrapolação de vazão para as condições de pré-desenvolvimento. Ainda, assim, eles concluíram que o SWAT é um modelo razoável para uso em bacias semiáridas, embora ainda busquem um modelo mais representativo do local. Todavia, eles salientam a importância de

uma calibração cuidadosa, uma análise de incerteza e aplicação adequada dos resultados, fator esse que tem sido evidenciado em todos os trabalhos com o modelo nessas regiões.

Ballesteros et al. (2019) utilizou o modelo SWAT para avaliar o impacto de cinco práticas de gestão (BMPs) na redução da produção de sedimentos e nutrientes na bacia hidrográfica de El Beal, sudeste da Espanha. A calibração e validação foram realizadas com dados de sensoriamento remoto do satélite AET do Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM). O modelo SWAT obteve bom desempenho no período de calibração, com valores estatísticos de 0,78 para a eficiência de Kling-Gupta (KGE), 0,81 para o coeficiente de determinação (R^2), 0,58 para a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e 3,9% para o viés percentual (PBIAS), bem como no período de validação ($KGE = 0,67$, $R^2 = 0,83$, $NS = 0,53$ e $PBIAS = -25,3\%$). Os resultados indicaram que a restauração da barragem de verificação foi o BMP mais eficiente, com redução de 90 % dos sedimentos (S), 15% do nitrogênio total (NT) e 22% do fósforo total (FT), seguida pelo reflorestamento com valores de 27% (S), 16% (NT) e 20% (FT). Segundo os autores todos os valores de eficácia melhoraram quando os BMPs foram avaliados em combinação. Tais dados evidenciam a importância da utilização dessas técnicas em conjunto na área da bacia, o que contribui com a diminuição da produção de sedimentos, sobretudo a utilização da vegetação para proteção dos solos e manutenção da qualidade da água

Galata *et al.* (2020) analisou as respostas hidrológicas das mudanças no uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Hangar, Etiópia. O modelo foi calibrado e validado usando dados de fluxos de 13 anos (1990-2002) e 9 anos (2003-2011). O SWAT-CUP foi usado para análise de sensibilidade, calibração e validação. Os parâmetros mais sensíveis para área de estudo foram: CN2, SURLAG e CANMX. Tanto para calibração como para validação o modelo SWAT funcionou corretamente, apresentando valores de NSE, PBIAS e coeficiente de determinação (R^2) numa faixa muito boa. Os autores ressaltam que as mudanças no uso da terra e aumento da população possuem impacto significativo nos recursos naturais e socioeconômicos na Etiópia, e estudos sobre mudanças no uso do solo são raros no país. Os resultados revelaram que a expansão de terras cultivadas, áreas de construção, desmatamento e pastagem durante o período de 1987-2017 diminuíram a produção média anual de água de contribuição total na bacia, fluxo lateral, evapotranspiração, fluxo de água na estação seca e recarga de aquífero. Além disso, as mudanças no uso da terra aumentaram o escoamento superficial, a produção total de sedimentos e o fluxo das estações úmidas e chuvosas.

Villamizar et al. (2019) fez a avaliação da produção de água sobre diferentes cenários de uso da terra e clima com o modelo SWAT na bacia de Tona, Colômbia. Foram realizadas comparações com estimativas de produção de água para condições históricas (1987-2002) e

condições de cenários futuros (2006-2050). Os autores concluíram que as mudanças no uso da terra determinam a produção de água nessa bacia andina. As HRUs com pastagens naturais e cultivadas, localizadas em sub-bacias de alta elevação, apresentaram baixa produção de água em relação a outros usos. Pastagens arborizadas apresentaram efeito misto, florestas plantadas, florestas e arbustos nas cabeceiras da área de drenagem apresentaram produção semelhante. Os cenários futuros de uso foram divididos em A (permanência do uso atual da bacia), B e C (cenários diferentes de conservação). Os resultados indicaram que ambas as estratégias dos cenários B e C aumentaram a produção de água, porém no B (transição natural de reflorestamento) o aumento foi semelhante a evapotranspiração (ET), e no C (conceito típico de reflorestamento) a ET foi maior. Os resultados indicaram que diferentes abordagens de mudanças de uso da terra para determinado clima, geraram diferentes estimativas de produção de água. Mesmo com dificuldades no processo de calibração e incertezas relacionadas aos dados climáticos futuros, o modelo identificou as áreas da bacia com maior e menor rendimento hídrico, sendo importante ferramenta para auxiliar na escolha de áreas estratégicas para atividades de proteção e conservação.

Qi et al. (2020) utilizou o SWAT para simular os efeitos de cenários de redução da irrigação no fluxo dos rios da bacia hidrográfica de *Ichawaynochaway Creek*, no sudeste dos Estados Unidos. Foram simulados cenários que variaram de secas extremas a condições de umidade excessiva, dentro de período de 16 anos. Os resultados indicaram que a redução do uso de água na agricultura teve um efeito muito positivo no fluxo de água dos rios. Foi observado que em condições de baixo fluxo, pequenas reduções de irrigação desencadeariam aumentos pequenos, porém potencialmente importantes do ponto de vista ecológico dos rios. A montante, a redução de 10% na irrigação resultou no aumento de 7% da vazão. A jusante, sob condições de fluxo extremamente baixo, o fluxo sem a irrigação foi 35% maior do que com irrigação. Foi concluído que a redução da irrigação é uma forma eficaz de aumentar a vazão, destacando que para fins de gestão, a simulação através de modelos são úteis para avaliar a eficácia das estratégias de conservação da água. Além disso, os autores ressaltaram que as simulações de cenários de irrigação com maior porcentagem de economia podem não ser realistas sem mudanças socioeconômicas drásticas, todavia, destacaram que as reduções de uso de água e respostas obtidas para esse trabalho, já estão dentro das capacidades técnicas das tecnologias de irrigação existentes.

Scot-Shaw et al. (2020) realizou a calibração do modelo SWAT para simular a produção de sedimento numa plantação de acácias na bacia hidrográfica de *Two Streams em KwaZulu-Natal*, África do Sul. Para simulação foram utilizados 11 anos de período de registro de dados

diários (1989-1999) posteriormente estendidos até 2014. Três anos foram usados como período de aquecimento, a média de análise de sensibilidade realizada com SWAT-CUP foi utilizada para classificar os parâmetros. A calibração automática do fluxo de água também foi realizada com o SWAT-CUP. Foram feitas comparações com simulações anteriores de outros modelos realizados no local, e foi constatado que o modelo SWAT simula os fluxos com mais precisão. Os resultados indicaram superestimação anual do fluxo de água de 12mm dos 20mm observados, segundo os autores, isso sugere que melhorias adicionais devem ser utilizadas juntamente com observações de satélites para regiões geograficamente mais amplas. A principal limitação observada no trabalho foi a carência de dados de entrada de solo, uso e clima prontos para inserir no SWAT. As cargas de sedimentos mais altas ocorreram nas áreas de declives mais acentuados ao longo de estradas de cascalho e sistemas ribeirinhos, as áreas de plantio apresentaram rendimento anual de 0,02 t.ha⁻¹ de sedimentos. Foi concluído que o SWAT-CUP é uma ferramenta útil para determinar a sensibilidade dos parâmetros de entrada e melhorar a eficiência da simulação, fornecendo uma indicação das incertezas do modelo. Além disso, os autores ressaltaram que o modelo oferece uma abordagem útil para gerenciar bacias hidrográficas, avaliar impactos dos diferentes usos da terra e identificar áreas de alto risco de erosão.

2.3.1 Utilização do modelo SWAT no Brasil

No Brasil, o primeiro uso do modelo SWAT foi em 1999, e na última década sua aplicação teve um crescimento notável conforme pesquisa realizada por Bressiane et al. (2015), dentre os diversos estudos realizados a autora destaca que a principal dificuldade para utilização do modelo no Brasil é a falta de dados completos, organizados e acessíveis, o que resulta na necessidade de parametrizações teóricas para muitas aplicações. Tal fato corrobora também com o que foi evidenciado nos estudos realizados com uso do SWAT em outras partes do mundo, principalmente nas regiões semiáridas, contidas em países periféricos, com baixo investimento no sistema de geração de dados hidroclimáticos, cartográficos e produtos do sensoriamento remoto. Nesse contexto, de forma resumida esse item traz alguns estudos realizados com o SWAT no Brasil.

Linhares et al. (2022) realizou um estudo de modelagem hidrológica com o SWAT em uma típica bacia do semiárido brasileiro, a bacia hidrográfica do rio Salgado, localizada na porção do sul do estado do Ceará e totalmente inserida no bioma Caatinga. Para calibração foram utilizados dados dos anos de 1986 a 2005, para validação foram utilizados os dados dos

anos de 2006 a 2017. Os autores evidenciaram que os dados da bacia do Rio Salgado possuem qualidade e quantidade, tanto nas estações pluviométricas como nas estações fluviométricas. Sendo que desta forma foi possível englobar as principais variações climáticas e hidrológicas da bacia, com especial atenção para os períodos cíclicos de secas e chuvas. Para otimização dos parâmetros foi utilizado o SWAT-CUP e algoritmo SUFI-2. Das 83 estações pluviométricas da área, foram utilizadas 22 estações, das 8 estações fluviométricas, foram utilizadas 3 estações, em ambos os casos a redução foi pela qualidade e quantidade de dados. Para a primeira estação (Icó) os resultados indicaram que os valores de calibração foram considerados bons com $R^2=0,84$ e $NS=0,65$, enquanto no período de validação o valor foi um pouco inferior $R^2=0,83$ e $NS=0,57$. Com relação às vazões calibradas para os meses considerados normais e secos, as vazões simuladas ficaram bem próximas das vazões observadas, sendo classificada como uma calibração muito boa, porém nos meses em que ocorreram os maiores eventos de vazões o ajuste pode ser considerado razoavelmente satisfatório (o modelo subestimou a vazão). Na segunda estação (Lapinha) os valores de calibração foram $R^2=0,85$ e $NS=0,84$ e validação $R^2=0,82$ e $NS=0,68$, os resultados mostram que o SWAT subestimou as vazões médias, mas que, graficamente os resultados são bons. Para a terceira estação (Podimirim) as análises estatísticas também apresentaram resultados considerados bons, indicando uma boa correlação entre as vazões simuladas e observadas, todavia o modelo subestimou as vazões de picos e 12 eventos e superestimou em 5 eventos. Segundo os autores tal resultado sugere que parte da água precipitada está sendo infiltrada no solo e usada para escoamento subterrâneo, podendo-se associar tais oscilações nas vazões a influência do Aquífero existente na área.

No que tange a análise espaço temporal do balanço hídrico de água no solo, segundo os autores dentre os fatores climáticos a precipitação é a principal variável que controla a disponibilidade de água. A precipitação da bacia concentra-se nos meses de janeiro a abril. Observa-se pequena diferença de produção de água entre as áreas sedimentares e do cristalino, mesmo a bacia possuindo solos rasos e relevo fortemente ondulado, o que indicaria normalmente valores altos de escoamento. Isso se deve as pedoformas da bacia com formas côncavo-côncavas que favorecem o escoamento subsuperficial. Os valores de evapotranspiração foram bastante heterogêneos o que demonstra a variabilidade espacial desse componente na bacia. Os maiores valores de conteúdo de água no solo, escoamento e produção de água estão associados as áreas sedimentares, enquanto as áreas cristalinas apresentaram os menores valores. Ao finalizar o estudo os autores identificaram a existência de ilhas hidro-pedo-geológicas, locais com condições específicas que favorecem a presença de água mesmo nos períodos secos, o que explica a diferença de comportamento da água no solo da bacia.

É válido destacar como as características físicas do solo influenciam no comportamento dos componentes hidrológicos e das rochas, a exemplo dos valores de escoamento e conteúdo de água no solo que foram maiores na área de embasamento sedimentar da bacia, onde segundo os autores os solos eram mais profundos. Já nas áreas de embasamento cristalino, onde os solos eram mais rasos esses valores foram menores, tal comportamento pode ter relação com a textura e condutividade hidráulica desses solos. Outro aspecto diz respeito a diversidade de associações entre as características fisiográficas da bacia, que podem resultar em respostas hidrológicas específicas em determinadas áreas, a exemplo da identificação das “Ilhas hidro-pedo-geológicas” citadas no trabalho e também das próprias HRUs que são geradas pelo modelo.

Miranda (2017) analisou o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal com o modelo SWAT. Para realização do trabalho a calibração foi realizada a nível de evapotranspiração e índice de área foliar. Foram encontrados valores de Nash Sutcliffe para ET (0,61 e 0,63: calibração e validação) e IAF (0,67 e 0,78) equiparáveis a outros estudos em vegetações similares. O autor concluiu que o balanço hídrico da caatinga só apresentou escoamento superficial quando os valores de precipitação ultrapassam 63 mm de chuva total e uma máxima mensal de 20 mm. Na caatinga 85,03% da água da chuva é evapotranspirada, contra 2,45% para o escoamento superficial, 3,58% para percolação e apenas 0,41% para fluxo de base.

Esse comportamento do escoamento na região semiárida do bioma caatinga, salienta o papel da precipitação como variável do balanço hídrico no controle da disponibilidade e/ou déficit de água na atmosfera ou no solo (Linhares et al. 2022) Isso ocorre justamente por causa das condições climáticas da região, marcada pela escassez e má distribuição de chuvas, associadas a altas temperaturas, o que reflete nos valores baixos ou nulos dos fluxos longitudinais do solo como o escoamento e a percolação. Logo, para que o escoamento ocorra é preciso que o solo atinja seu ponto de saturação através dos valores máximos de precipitação.

Em estudo realizado por Chagas et al. (2022) foi feito com a utilização do SWAT na análise da umidade do solo, considerando os diversos tipos de uso e solos da bacia experimental do rio Jatobá, localizado no semiárido de Pernambuco. O período escolhido foi de 2004 a 2019. Na bacia foram encontradas quatro classes de usos predominantes: Caatinga rala, caatinga densa, agricultura e pastagem. Quanto aos solos a bacia possui três classes: Argissolo vermelho-amarelo, Neossolo regolítico e Neossolo litólico. Segundo os autores o monitoramento da umidade do solo foi feito por meio da sonda Diviner, o que possibilitou a avaliação do modelo SWAT por meio do coeficiente de determinação R². A bacia foi dividida em 33 sub-bacias e foram definidas 227 HRUs (Unidades de Respostas Hidrológicas). Foram simuladas pelo

modelo SWAT a variação da umidade do solo, precipitação, evapotranspiração, temperatura e o balanço hídrico. A partir dos dados gerados os autores destacaram que o ano de 2012 foi o mais seco, com valores de precipitação (341 mm) menores que os valores de evapotranspiração (1274 mm) promovendo um elevado déficit hídrico. Além disso, a temperatura atmosférica do ano de 2012 foi a mais elevada (24,04°C) e a umidade do solo (190,2 mm) apresentou a menor média anual, sendo este um indicativo da relação da umidade do solo com o regime de chuvas. Outro ponto observado foi que as sub-bacias que apresentaram maior umidade foram aquelas que possuíam maior área de pastagem e estavam próximas do curso d'água principal, em contrapartida os menores valores foram associados as áreas compostas por Caatinga rala. Para cada uma das sub-bacias o valor de R² variou de 0,70 a 0,75 e houve uma boa correlação da umidade observada e simulada. No que concerne a relação entre a umidade do solo e HRUs, as áreas de argissolo apresentaram maior umidade do solo e os menores valores foram encontrados nas áreas dos neossolos. Sendo dessa forma possível constatar a influência do tipo de solo na distribuição dos teores de água na bacia. A combinação argissolo com pastagem apresentou maior estoque hídrico anual e os menores valores de umidade foram encontrados nos neossolos com Caatinga densa.

O estudo traz dados importantes que ajudam a compreender o funcionamento do balanço hídrico nas regiões semiáridas, sobretudo, partindo da análise dos componentes hidrológicos associados aos diferentes tipos de usos. É possível verificar a diferença do comportamento dos solos mais argilosos e dos solos mais arenosos em relação a retenção de água e o quanto essas características influenciam nos processos da bacia. Além disso, outro fator relevante apontado nesse estudo é a interceptação da água da chuva pela vegetação, que acaba influenciando no teor de água no solo. Como a vegetação da Caatinga apresenta maior porte em relação a vegetação de pastagem, a umidade do solo associado a Caatinga é menor em razão da maior interceptação. Outra característica que deve ser levada em conta nessa análise diz respeito a capacidade de evapotranspiração da caatinga e da pastagem, o que também reflete na retirada de água do solo e conseqüentemente nos valores de umidade.

No Brasil, o modelo SWAT vem sendo muito utilizado para identificar os impactos das mudanças no uso da terra sobre o comportamento hidrológico das bacias em diferentes biomas, o que demonstra a sua importância e aplicabilidade em diversos ecossistemas. Em estudo realizado por Trentin et al. (2023) o SWAT foi utilizado para analisar a vazão da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, no bioma Pampa, em um cenário de mudanças no uso do solo, no período de 2010 a 2019. Segundo os autores, nos últimos anos as pastagens nativas do bioma Pampa vem sendo substituídas por áreas de cultivo, principalmente de eucalipto. Os usos da

terra analisados no estudo foram: floresta, eucalipto, arroz, campo, soja, água e urbano. Os resultados indicaram que as mudanças no uso da terra alteraram a vazão e o balanço hídrico da bacia. O valor de vazão média mensal aumentou em 17,7% e os picos de vazão foram mais frequentes. Segundo os autores, tais valores podem ser associados a expansão das lavouras de soja em solos mais sensíveis ao escoamento, o que aumenta os riscos de inundações. Além disso, em relação a evolução das HRUs os resultados indicaram uma mudança heterogênea no uso da terra em relação aos diferentes tipos de solos, ou seja, o comportamento hidrológico vai variar para o mesmo uso da terra de acordo com o tipo de solo.

Neto (2011) utilizou o SWAT para simulação hidrossedimentalógica da bacia do Riacho dos Namorados (Paraíba). A bacia foi simulada pelo modelo parametrizado na situação atual do uso do solo com e sem a presença de açudes, como forma de avaliar a influência dos açudes. Para avaliar os efeitos da mudança no uso do solo, foram simulados quatro cenários em que a bacia poderia estar: vegetação nativa (Caatinga); reflorestamento com Algaroba; monocultura de milho e área desmatada. Para a simulação foram incluídos os cinco principais açudes existentes na área, porém segundo o autor, os açudes não possuíam todos os dados necessários e alguns nem existiam, uma vez que as barragens dos pequenos açudes eram de terras e possuíam apenas um sangradouro. O modelo exigia que o reservatório fosse vinculado a uma única bacia, porém os reservatórios existentes (açudes) na área apresentavam confluência em mais de uma bacia, por isso vinculou-se os reservatórios ao trecho que possuía maior área de drenagem. Os resultados indicaram que houve influência dos açudes na atenuação da vazão líquida e carga de sedimentos. Entre os cenários, verificou-se que as áreas de reflorestamento com Algaroba protegeriam a bacia melhor do que a Caatinga, e que em termos de erosão, é melhor ter a cultura de milho no solo do que o solo sem vegetação.

Nas regiões semiáridas do Brasil é muito comum a construção de açudes para ajudar a enfrentar os problemas de escassez de água, todavia, a maior parte desses açudes são construídos sem planejamento e a montante de reservatórios públicos, em muitos casos para atender a interesses particulares de moradores da região (Figueiredo e Srinivasan, 1999). Ainda segundo os autores, a maioria dos açudes do Nordeste não são construídos para regularizar as vazões e sim para acumulação, ou seja, nenhuma liberação de água é feita a jusante dos açudes. O que na prática pode ocasionar a atenuação da vazão líquida e dos sedimentos conforme mencionado no estudo de Neto (2011), é válido ressaltar que nos períodos chuvosos pode ocorrer o transbordamento e a passagem dessa água e sedimentos para jusante, o que de fato suscita a relevância de estudos mais específicos sobre os impactos desses açudes nas bacias hidrográficas.

Valério (2014) avaliou os efeitos de alterações nas precipitações devido a mudanças climáticas, na resposta hidrológica da bacia do rio Paraguaçu (Bahia). Para isso, 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. Além disso, os resultados foram analisados através de comparações entre os cenários. O autor concluiu que o modelo hidrológico apresentou desempenho satisfatório em representar as vazões da região estudada, considerando a maior dificuldade em representar a variabilidade em escala diária. Em relação aos cenários avaliados, detectou uma tendência na diminuição das chuvas e das vazões a curto e a longo prazo. Com base nos resultados, destacou que projeções obtidas através de modelos climáticos globais possuem grandes incertezas associadas a simulações de longo prazo.

Muitos estudos sobre mudanças climáticas têm sido realizados com o uso do modelo SWAT (Siqueira, et al., 2017; Silva, 2020; Farias, et al., 2021; Tibúrcio, et al., 2023) o que evidencia a sua importância e aplicabilidade a nível mundial, sobretudo em regiões semiáridas onde as bacias hidrográficas estão sujeitas a sazonalidade climática que já é influenciada por outros fenômenos, como El Niño e La Niña e que refletem na variabilidade das precipitações nas bacias.

Nesse sentido, estudos de projeções são necessários para chamar atenção sobre a urgência de medidas de planejamento e gestão dessas áreas, no sentido de mitigar possíveis impactos que refletem em todo ecossistema e que também afetam a população dessa região. Contudo, conforme evidencia o autor a incerteza dessas projeções a longo prazo é grande, o que suscita as dificuldades ainda enfrentadas na utilização do modelo SWAT nas regiões semiáridas, por questões de escassez e qualidade dos dados, calibração e outros fatores, que enfatizam a importância da realização de mais pesquisas que sirvam de base e modelo dos métodos utilizados.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo dispõe de informações sobre a importância da bacia do rio Paraguaçu dentro do estado da Bahia e apresenta a caracterização fisiográfica dos principais aspectos ambientais utilizados para geração das Unidades de Respostas Hidrológicas.

3.1 ASPECTOS GERAIS

A bacia do rio Paraguaçu é o mais importante sistema fluvial de domínio inteiramente estadual, a bacia ocupa uma área de 54.877 km², cerca de 10,14% do território baiano, abrangendo 86 municípios (INEMA, 2014). Por ser uma bacia que abrange uma área extensa, o Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraguaçu (CBHP) dividiu a bacia em três trechos: Alto, Médio e Baixo.

Segundo o último inventário do INEMA (2020) existem 94 barragens de portes e funcionalidades variadas na bacia, sendo também o rio Paraguaçu responsável por 60% do abastecimento da capital baiana, Salvador. A bacia possui grande importância do ponto de vista econômico, estratégico, ambiental e social dentro do estado, estando o uso de suas águas associado ao desenvolvimento de diversas atividades, tais como: abastecimento público, privado e industrial; dessedentação de animais; pesca; atividades de lazer; esporte náutico; geração de energia; irrigação; recepção de esgotos e barramentos.

O rio Paraguaçu nasce no município de Barra da Estiva, a aproximadamente 1.200 metros de altitude na Serra do Sincorá e percorre direção oeste-leste até a sua foz na Baía de Todos os Santos. O rio possui regime de abastecimento perene, devido aos afluentes oriundos da Chapada Diamantina, é nessa região onde nasce a maioria dos rios que vão formar as bacias independentes do Paraguaçu, Jacuípe e Rio de Contas e, ainda, dos rios Salitre, Jacaré e Paramirim, afluentes do rio São Francisco. A Chapada Diamantina segundo o IBGE (1993) é beneficiada pela constituição litológica e clima úmido, além de águas provindas de rochas calcárias.

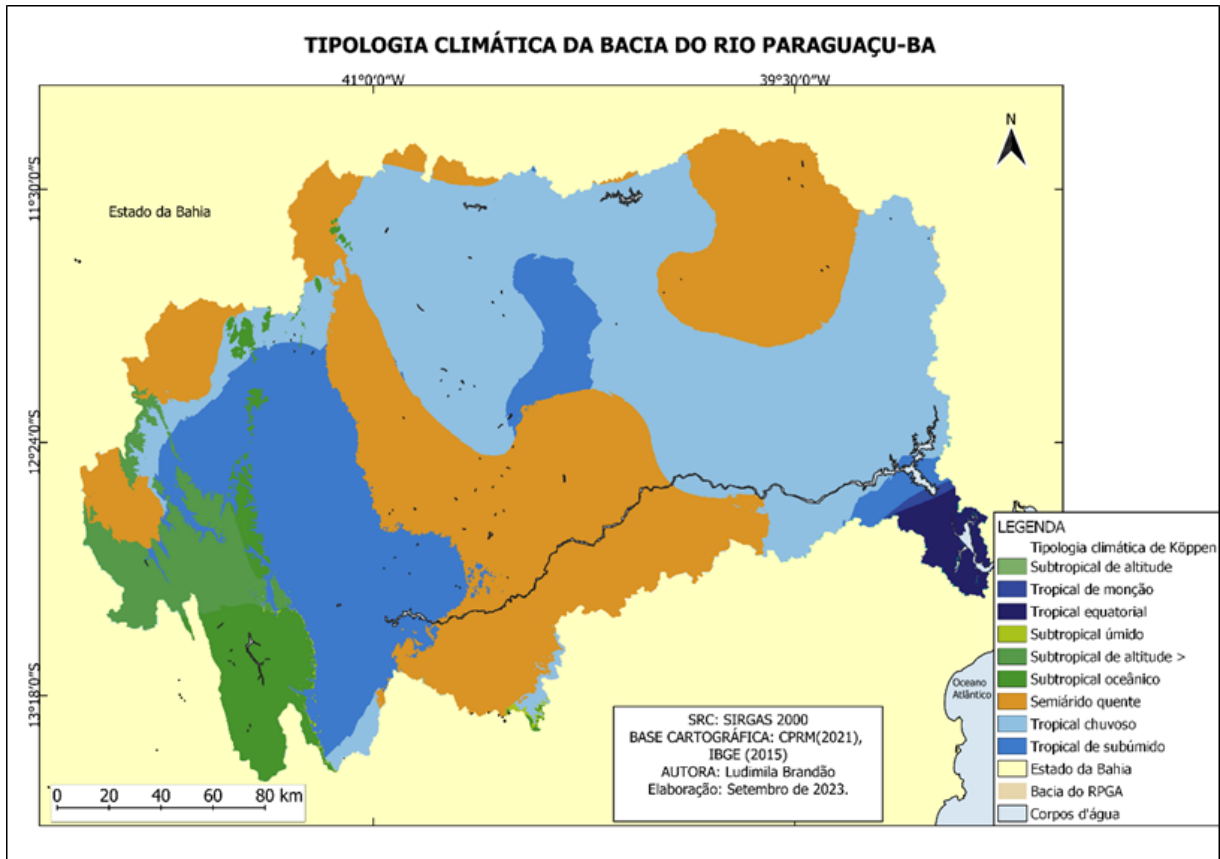
Em relação à hierarquia fluvial da rede de drenagem a bacia do rio Paraguaçu é de 5º ordem e possui extensão de 128,77 km. Em termos de extensão e densidade, a bacia possui uma importante distribuição assimétrica dos seus afluentes em relação ao rio principal. Os principais rios da margem esquerda são: Santo Antônio, Piranhas, Capivari, do Peixe, Paratigi, Saracura, Paulista, Preto, Bonito, Utinga, Cochó, Jacuípe, Tupim e Curimataí, dentre outros, de menor porte. Na margem direita, recebe os rios: Una, Palma, Cambucá, São Francisco, Vermelho, Roncador, Toca da Onça, Grande e Sebastião, além de córregos e outros afluentes menores.

3.2 ASPECTOS DO CLIMA

De acordo com a classificação climática de Köppen (Figura 3), há predominância de três tipos de clima principais e suas variações na bacia do Rio Paraguaçu: o clima subtropical na parte mais elevada da bacia, correspondente a região da Chapada Diamantina; o clima seco e

suas variações na parte centro-leste correspondente ao trecho médio da bacia, e o clima tropical chuvoso no baixo curso da bacia, próximo ao litoral (SEI, 1997).

Figura 3: Classificação climática da bacia do RPGA

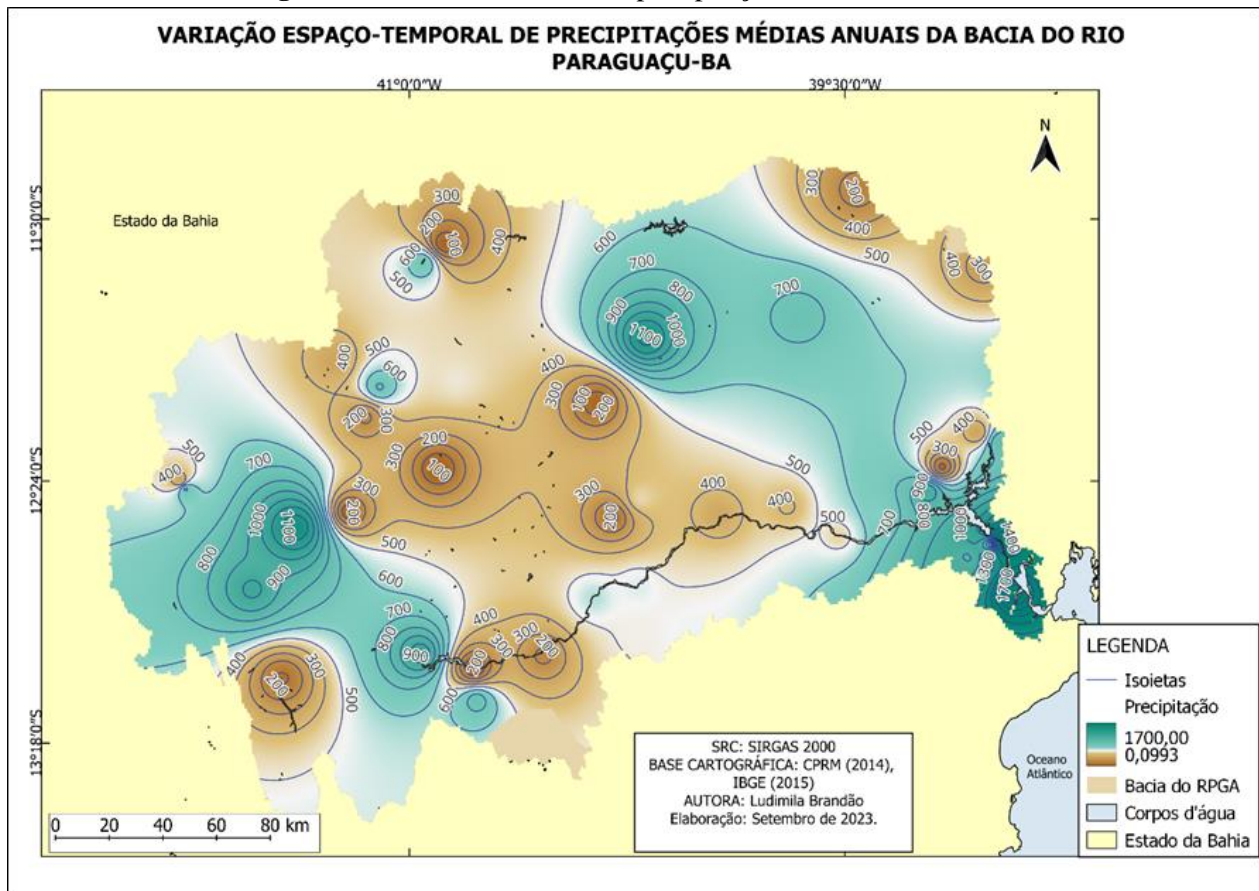


Fonte: A autora

No baixo curso da bacia as precipitações anuais giram em torno de 1250 mm. No seu trecho médio, região com 60% da área pertencente ao semiárido brasileiro, as precipitações anuais correspondem a 600 mm (MACEDO, 2013). No seu trecho alto, na região da Chapada Diamantina, o efeito orográfico acaba sendo determinante nos valores de precipitação acima da média em relação as outras áreas pertencentes ao semiárido, atingindo índices anuais acima de 1000 mm (Tanajura et al. 2010).

A partir da análise do comportamento da precipitação no mapa de isoietas das médias anuais dos anos de 1977 a 2006 da bacia do rio Paraguaçu, é possível visualizar as diferenças na sazonalidade climática da bacia, ficando evidente o contraste entre os três trechos: o alto do Paraguaçu na parte oeste (clima subtropical de altitude e subúmido), médio Paraguaçu na parte central (clima semiárido) e baixo Paraguaçu na parte leste, localizada mais próxima do litoral (clima tropical equatorial, de monção e chuvoso), onde fica o exutório da bacia (Figura 4).

Figura 4: Isoietas de médias das precipitações anuais de 1977 a 2006



Fonte: A autora

O clima é um fator condicionante nessa região, principalmente em relação à constituição da fauna e vegetação, outro aspecto de grande relevância é a diversidade de altitudes e relevos que corroboram para a ocorrência de microclimas, fator a ser considerado na bacia.

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia (PERH-BA) as médias das temperaturas anuais são elevadas, situadas em entorno dos 24 °C, variando entre 20 °C e 26 °C, ocorrendo temperaturas mais amenas no litoral e nas regiões mais altas da Chapada Diamantina. Durante o inverno, as frentes polares provocam chuvas principalmente no litoral. As porções mais centrais do Estado que correspondem a região semiárida, se constituem em “ponto final” dos sistemas de correntes atmosféricas e, portanto, tendem a ser as regiões mais secas.

3.3 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS

As análises hidrológicas envolvem a avaliação da infiltração/escoamento da água no terreno e isso depende de informações do substrato geológico, características geomorfológicas e dos solos.

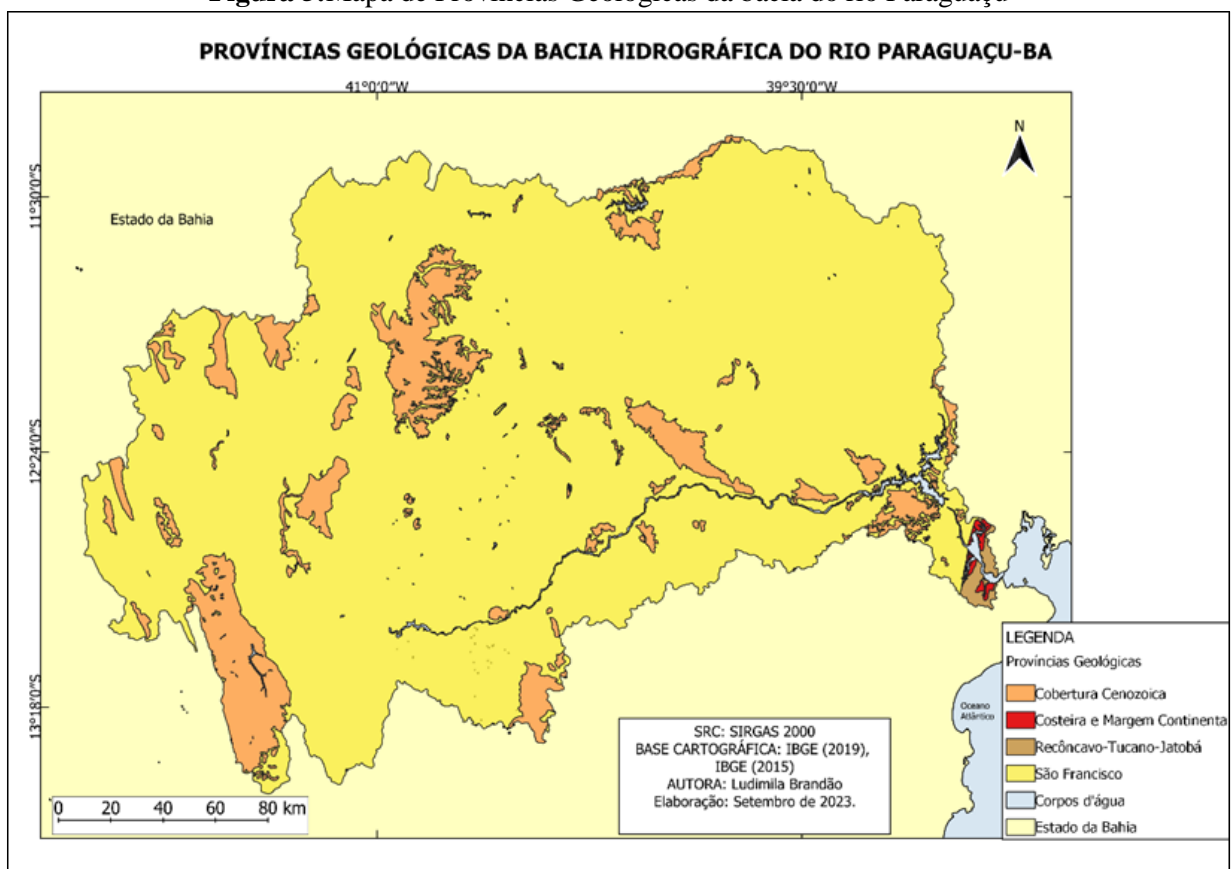
3.3.1 Substrato Geológico

O embasamento geológico da bacia do rio Paraguaçu é bastante diversificado, apresentando rochas com idades geológicas distintas, que variam desde o Arqueano até o período mais recente, o Quaternário.

O traçado do rio tem toda a extensão controlada por estruturas geológicas, que começam desde a travessia de rochas sedimentares no seu alto curso, onde as falhas e fraturas proporcionaram o surgimento dos vales. Passando pelas áreas de rochas calcárias com vales encaixados e canais sinuosos, rochas cristalinas com vales abertos e canais anastomosados no seu médio curso, até o canal retilíneo e vale encaixado do seu baixo curso onde forma a Baía do Iguape, caracterizada como uma “ria” da Falha de Maragogipe (IBGE, 1993).

A maior parte do percurso do rio é feito sobre domínio de rochas metamórficas do Pré-Cambriano, isso ocorre porque a bacia encontra-se inserida na unidade geotectônica correspondente ao Cráton do São Francisco (Figura 5).

Figura 5: Mapa de Províncias Geológicas da bacia do rio Paraguaçu



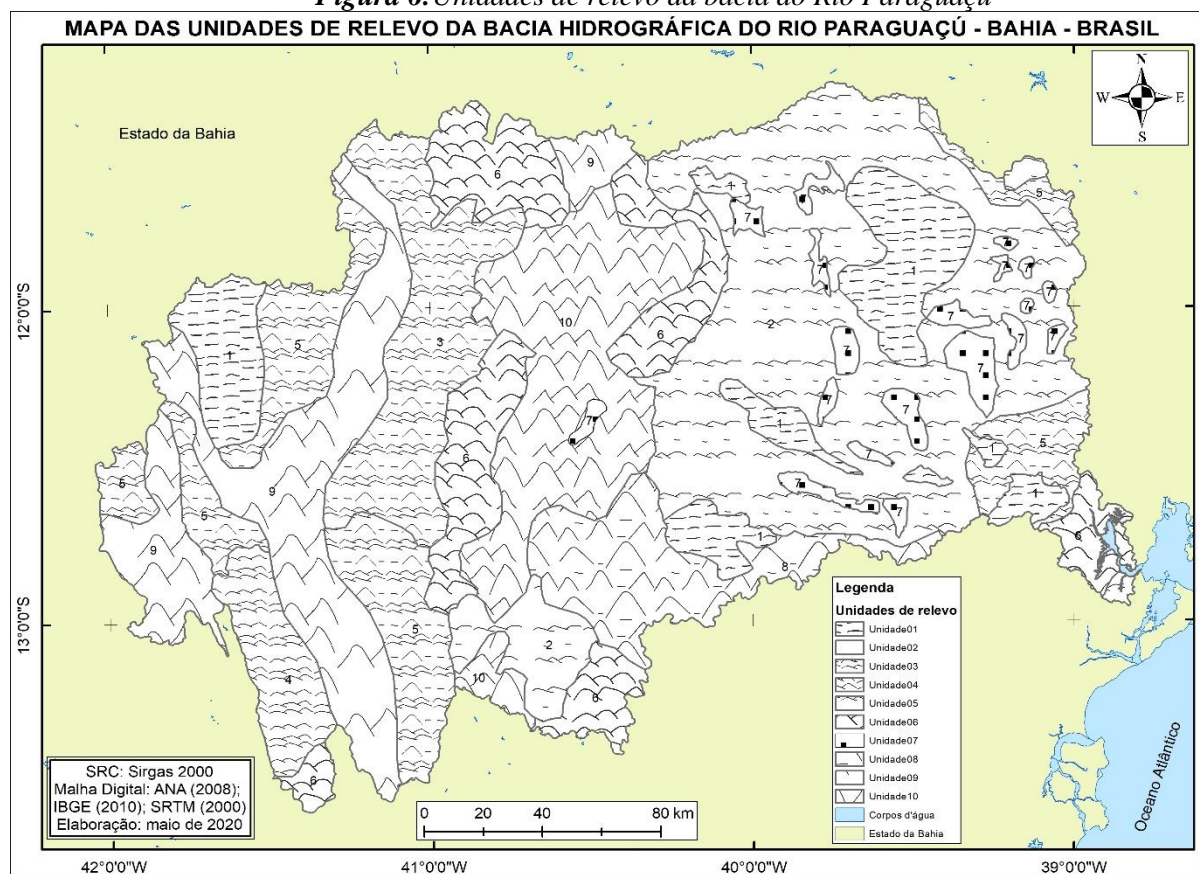
Fonte: A autora

Segundo Almeida (2013) o Cráton do São Francisco constitui grande parte dos terrenos metamórficos do Estado da Bahia, cuja evolução cessou no final do Paleoproterozóico, estando presente também nos estados de Minas Gerais, Goiás, Pernambuco e Sergipe. Em seu alto curso o rio percorre os Supergrupos Espinhaço (Grupo Chapada Diamantina) e São Francisco (Grupo Una), representados por metarenitos e rochas carbonatadas. No curso médio, possui embasamento cristalino representado por gnaisses variados, rochas metamórficas granulitizadas e granitos integrantes do Bloco Jequié. Próximo a foz em seu curso baixo, percorre as rochas sedimentares mesozoicas (Grupo Brotas) e os sedimentos quaternários das Formações Barreiras e Marizal (Mestrinho, 1998). Seus principais domínios são caracterizados como Coberturas Cenozoicas, Coberturas Metassedimentares Neoproterozóicas e Mezoproterozóicas, Embasamento Paleoproterozóico e Embasamento Arqueano.

3.3.2. Características do Relevo

A geomorfologia da área da bacia do rio Paraguaçu é caracterizada pela diversidade de formas que variam ao longo do seu trecho, características associadas a litologia, vegetação e o clima da região denotam através das paisagens esse contraste, que se destaca pelas feições e a própria dinâmica do relevo (Figura 6).

Figura 6: Unidades de relevo da bacia do Rio Paraguaçu



Fonte: A autora

A bacia pode ser classificada em 10 unidades de relevo (Figura 6) com base na sua litologia, altitude e formas. De modo geral, o relevo é mais abrupto à oeste em seu alto curso, representado por rochas cristalinas, mais resistentes e com maiores altitudes. Enquanto a Leste no médio e baixo curso, o substrato sedimentar permite maior suavização, à medida que o rio se aproxima da faixa litorânea ocorre um aplainamento em relação as formas e elevações. O alto curso da bacia do rio Paraguaçu é geomorfologicamente representado pela Chapada Diamantina, bloco controlado por dobras e falhas com altitudes acima de 700 metros, que superam 1500 metros de altitude nos relevos mais movimentados.

As maiores altitudes da bacia ocorrem a oeste/sudoeste na região do Pediplano Central da Chapada Diamantina, constituído por metarenitos e metasilites do domínio tectônico do Rift do Espinhaço. Nessa região, ocorre associação de áreas com aplainamento, representadas por colinas ligeiramente onduladas (Unidade 5) e áreas de dissecação associadas a região geomorfológica da Serra da Borda Ocidental e Serra do Sincorá, que apresentam relevo ondulado, grandes colinas com forte declividade (Unidade 9). Ao sul da região geomorfológica do Pediplano Central, o relevo apresenta formas de colinas levemente onduladas com topos planos largos (Unidade 4), que indicam a atuação de processos de pediplanação antigos, referentes ao Cenozóico.

No alto curso da bacia, ao norte da Serra do Sincorá, ocorre uma depressão com importantes mudanças nas formas de relevo, devido à variação do domínio tectônico. Representada pelo Patamar de Solto Soares, essa unidade geomorfológica apresenta área de controle cárstico com fracos modelos de dissecação e superfícies planas, além de processos de dissolução (Unidade 1). Na borda oriental da Serra do Sincorá, está a unidade geomorfológica do Patamar de Utinga, que apesar de apresentar predominância de formas do tipo colinas levemente onduladas, pode ser dividido em duas porções devido a variação do relevo. Ao Sul, os acidentes geográficos desenvolvem-se quase inteiramente sobre rochas calcárias apresentando formas de colinas ligeiramente onduladas, associadas a colinas de ondulações marcadas por taludes alongados e elementos de crista próximos aos vales dos rios (Unidade 5).

Na porção norte, as áreas planas apresentam predominância (Unidade 3), o relevo apresenta uma série de pediplanos com processos de dissecação associados as Coberturas detrito lateríticas e as áreas dos planaltos metareníticos de quartzo do Mesoproterozóico. Nas Chapadas do Morro do Chapéu, localizadas ao norte do Patamar de Utinga, o relevo também é representado pela Unidade 3.

Em seu médio curso o rio Paraguaçu penetra no relevo esculpido em superfície de pediplanação. Nessa área ocorre uma transição de uma depressão para uma área mais elevada

que representa o Patamar do Médio Paraguaçu com as nascentes do rio Tupim, Capivari e Peixe. O Patamar é constituído por rochas do embasamento cristalino (Arqueano Lençóis), suas bordas leste e oeste apresentam relevo de colinas onduladas (Unidade 6) sobre um substrato de granitoides Paleoproterozóicos e gnaisses Paleoarqueanos. Em suas áreas mais altas o relevo do Patamar do Médio Paraguaçu é formado por um relevo mais fortemente dissecado (Unidade 10) alinhado com encostas íngremes controladas por fraturas profundas e falhas.

Ao sul do Patamar, truncado pelo rio Paraguaçu, está o Pediplano do Médio Paraguaçu, com relevo de morros ligeiramente ondulados (Unidade 2), que faz transição a sudoeste para um conjunto de grandes colinas alinhadas com cumes e escarpas rodeadas por vales estreitos (Unidade 10) onde a rede de drenagem representa as Morrarias do Médio Paraguaçu. A sudeste ocorrem formas de colinas, modelados de dissecção de topos convexos e tabulares do Planalto de Maracás (Unidade 6). A leste, o canal do rio avança cruzando o relevo de morros ondulados do Pediplano do Médio Paraguaçu (Unidade 8).

O curso médio da bacia do rio Paraguaçu muda para uma superfície plana com terreno plano e encostas levemente onduladas (Unidade 2) que representam a região geomorfológica da Depressão de Jacuípe. Essa região é composta por rochas do pré-cambriano que compõem o ambiente tectônico do cinturão orogênico formado pelo domínio Salvador – Curaça, no Norte, no Sul, o domínio Jequié representa o Pediplano do Médio Paraguaçu. Ocorre como porções dentro de áreas unitárias que marcam formas de relevo das áreas planas (Unidade 1) associada à presença da Cobertura detrítica-laterítica, formando colinas isoladas com topos planos. Outra forma de relevo que ocorre ao longo destas áreas planas, são os grandes morros revestidos por cristas longitudinais e maciços isolados (Unidade 7), desenvolvidos em corpos graníticos do Proterozóico.

No baixo curso da bacia, o rio Paraguaçu sofre uma inflexão para o sudeste controlado pela Formação Barreiras e Bacia do Recôncavo que formam as nascentes da margem esquerda do rio Jacuípe, último importante afluente do Paraguaçu. O relevo da apresenta formas de grandes morros e colinas dispersas em áreas levemente onduladas que representam a região geomorfológica da Morraria do Baixo Jacuípe (Unidade 7).

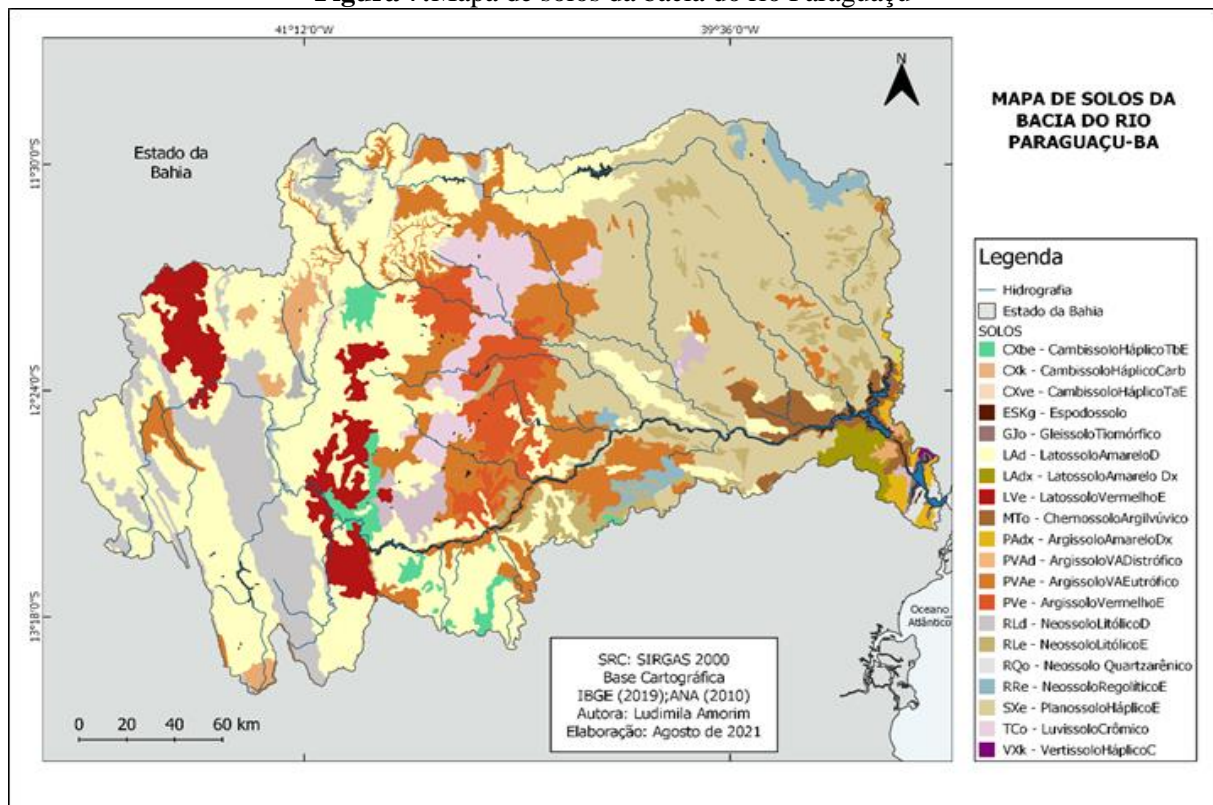
Na região que compreende a área alagada da barragem da Pedra do Cavalo, o substrato são gnaisses do Pré-cambriano com muitas áreas recobertas pela Cobertura detrítica-laterítica, formando os Tabuleiros Interioranos. Que apresenta associação de colinas ligeiramente onduladas e onduladas (Unidade 5) e áreas planas de relevo (Unidade 1) relacionadas com as porções de topo da Cobertura detrítico-laterítico. A jusante da barragem da Pedra do Cavalo até a Baía do Iguape, o rio Paraguaçu corre sobre rochas do embasamento Pré-cambriano com

relevo de dissecação, caracterizado por colinas onduladas dos Patamares Pré-Litorâneos. Na área da Baía do Iguape o contato dessas terras com o embasamento ocorre por meio de levantamento do relevo. Isso coincide com a falha que delimita a borda leste da bacia do Recôncavo com a idade Cretácea, onde ocorre uma transição de colinas ondulantes para colinas e áreas planas ligeiramente onduladas (Unidade 2) próximas à baía de Todos os Santos com arenosos e manguezais.

3.3.3 Principais Solos da Bacia do Rio Paraguaçu

A alimentação no banco de dados do software dos tipos de solos referentes presentes na área de estudo com características físicas e químicas é fundamental. Nesse contexto a bacia do rio Paraguaçu apresenta-se bastante diversificada, em decorrência da sazonalidade e aspectos relacionados aos fatores pedogenéticos, que influenciam na variação de condições e distribuição dos solos ao longo da bacia. Por ser uma bacia que possui maior parte da área inserida numa região de clima semiárido, existem ainda condições específicas associadas à distribuição das chuvas e temperaturas que corroboram para os tipos de solos existentes na região. As classes de solos existentes na área da bacia são: Argissolos, Cambissolos, Neossolos, Planossolos, Latossolos, Luvisolos, Chernossolos, Espodosolos, Gleissolos e Vertissolos (Figura 7).

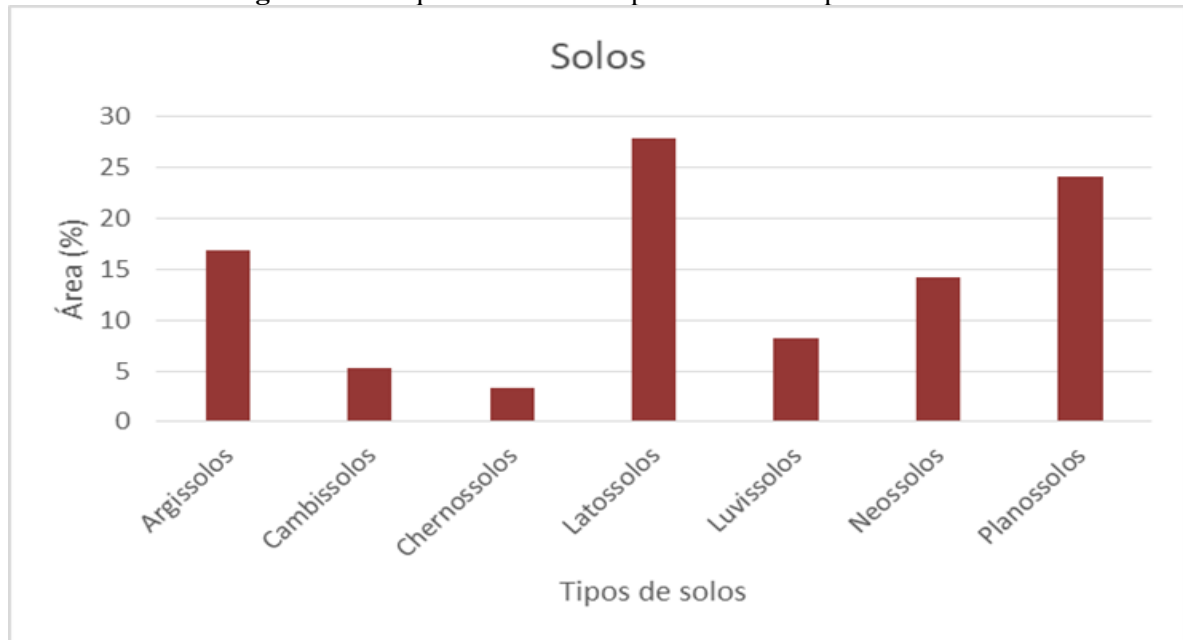
Figura 7: Mapa de solos da bacia do rio Paraguaçu



Fonte: A autora

Os solos predominantes na bacia, são respectivamente, os Latossolos, Planossolos, Argissolos e Neossolos, conforme pode ser visualizado na figura 8.

Figura 8: Área que os diferentes tipos de solos ocupam na bacia.



Fonte: A autora

Os Argissolos são solos evoluídos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS, 2018). Devido ao processo de eluviação das argilas do horizonte superficial e acúmulo no horizonte B, esses solos tornam-se mais suscetíveis aos processos erosivos, em decorrência da diferença de infiltração entre os horizontes. No caso dos solos mais porosos que apresentam texturas mais leves e relação textural menor, a suscetibilidade também é menor. Os Argissolos amarelos e vermelho-amarelos possuem cores associadas a presença dos óxidos de ferro (hematita ou goethita) apresentam transição clara, abrupta ou gradual entre os horizontes A – Bt, profundidade variável e vão de forte a imperfeitamente drenados. Esses solos podem ser classificados no 3º nível categórico como distróficos ($V < 50\%$ -fertilidade baixa), eutróficos ($V > 50\%$ -fertilidade alta) e distrocoesos, que ocorrem quando os solos são distróficos e apresentam horizonte subsuperficial adensado, muito duro a extremamente duros quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos. Tal característica diminui a porosidade do solo, aumenta a densidade, dificulta a penetração de raízes e a permeabilidade da água no solo. A drenagem interna dos argissolos no semiárido é bastante variável, muitos destes solos podem apresentar pedregosidade ou camadas de concreções ferruginosas, e cimentações naturais que

constituem impedimento parcial ou total da permeabilidade da água que penetra no solo (Santos, 2017). Os Argissolos Amarelos distrocócos, pouco profundos, com textura média/argilosa, estão nos sedimentos do Grupo Barreiras, região dos Tabuleiros interioranos no baixo curso da bacia. Os Argissolos Vermelho Amarelo e Vermelho eutróficos ocupam a parte central da bacia, os Argissolos Vermelho Amarelo distróficos ocorrem nos relevos movimentados da região do Planalto Bonito no alto curso.

Os Cambissolos são solos minerais que possuem horizonte B incipiente com textura franco/arenosa ou mais argilosa. Na bacia do rio Paraguaçu, os Cambissolos Háplicos eutróficos estão associados ao relevo cárstico da borda leste da Chapada Diamantina, nas superfícies aplanadas relacionadas ao calcário Bambuí, que segundo a PEMAPE (2011) são terras de alto potencial agrícola que podem estar encobertas por materiais detríticos e neste caso os solos podem ter baixa fertilidade.

Os Neossolos são solos pouco evoluídos, com textura franco/arenosa a arenosa, constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, que não apresentam nenhum tipo de horizonte diagnóstico. Normalmente são solos rasos, cascalhentos, pedregosos e com frequentes afloramentos de rochas. Ocorrem associados a relevos mais movimentados e por isso apresentam extrema suscetibilidade a erosão, uma vez que são rasos e ocupam áreas de declives. São classificados no 2º nível categórico a depender da espessura e do tipo de contato lítico como Litólicos, Regolíticos e Quartzarênicos. Os Litólicos possuem espessura menor, apresentando contato lítico ou fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, e sequência A-R ou A-Cr, enquanto os Regolíticos não apresentam nenhum tipo de contato lítico dentro de 50 cm e apresentam sequência A-C ou A-Cr. Ambos ocorrem nas áreas com relevos mais movimentados. Em contrapartida os Quartzarênicos, desenvolvidos a partir de material sedimentar, ocorrem em relevos mais planos a suave e não apresentam contato lítico, conseqüentemente são mais profundos. Os Neossolos Quartzarênicos ocupam a região geomorfológica das planícies litorâneas no baixo curso da bacia, constituídas por sedimentos do Quaternário. Os Neossolos Litólicos e Regolíticos estão distribuídos nas áreas com afloramentos rochosos e relevos movimentados da bacia, por serem solos pouco desenvolvidos e com baixo potencial agrícola, são utilizados para pastagem.

Os Planossolos são solos minerais, pouco profundos, imperfeitamente ou mal drenados, marcados por uma transição abrupta, com horizonte superficial de textura mais leve e horizonte B plânico adensado com acentuada concentração de argila (SiBCS, 2018). Devido a essas características, o horizonte subsuperficial torna-se uma camada de impedimento para a percolação de água no perfil, o que torna a permeabilidade desses solos lenta ou inexistente.

Tal condição nos períodos de chuvas rápidas e concentradas, podem levar a saturação e facilitar o arraste das partículas do solo (Gonçalves, 2014). Os Planossolos Háplicos eutróficos ocupam o relevo plano de grande parte da área leste da bacia, região da Depressão Sertaneja. Apresentam textura franco/arenosa e franco/argilo/arenosa e caráter solódico, o que indica que a saturação por sódio possui valores que variam de 6 a menos do que 15% em um ou mais horizontes dentro de 150 cm (SBCS, 2018).

Os Latossolos são solos minerais muito evoluídos, devido ao avançado estágio de intemperização e transformações do material constitutivo. A sua ocorrência está associada a relevos planos e suave ondulado, por isso possuem pouca suscetibilidade a erosão, principalmente os de textura média e argilosa. Por essas características são considerados solos com boas condições físicas e muito utilizados para agricultura irrigada, os problemas estão relacionados a baixa fertilidade e acidez (Santos, 2017).

Na área da bacia os Latossolos Amarelos distrocoesos, profundos, com a presença de horizontes coesos, ocorrem sobre relevos planos e suave ondulados dos Tabuleiros (Grupo Barreiras) onde as principais explorações agrícolas são a fruticultura (Laranja) e fumo. Os Latossolos Amarelos distróficos, textura média e argilosa, predominam na porção centro-leste da bacia, ocupando grande parte dos relevos planos e suave ondulados. Os Latossolos Vermelhos eutróficos, profundos com textura argilosa, ocorrem na borda leste da Chapada e no Patamar de Souto Soares.

Os Luvisolos são solos minerais não hidromórficos, que possuem horizonte Bt com marcante incremento de argilas de alta atividade e alta saturação por bases, o que confere boa fertilidade a esses solos. Os Luvisolos Crômicos Pálicos de textura média/argilosa, pouco profundos, ocorrem na porção central da bacia, associados aos relevos ondulados do Patamar do Médio Paraguaçu.

Os Chernossolos são solos minerais, que apresentam horizonte A chernozênico, com argila de alta atividade e alta saturação por bases, sobrejacente a um horizonte B textural ou incipiente. O desenvolvimento depende principalmente de condições que favoreçam a existência de um horizonte superficial rico em matéria orgânica com alto teor de cálcio, magnésio e presença de minerais esmectíticos, promovendo reação moderadamente ácida a fortemente alcalina (SiBCS, 2018). Os Chernossolos Argilúvicos pouco profundos, de textura média argilosa, ocorrem nos relevos planos a suave ondulado nas proximidades do rio Paraguaçu, no Lago da Pedra do Cavalo. Após a construção da Barragem Pedra do Cavalo, boa parte desses solos foram alagados.

Espodosolos são solos minerais que apresentam horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial que pode ser alábico, apresentando normalmente a sequência de horizontes A, E, B espódico e C bem contrastantes (SiBCS, 2018). São solos de textura arenosa, típico de ambientes de umidade elevada, onde por processo de podzolização a matéria orgânica e complexos de alumínio com ou sem óxidos de ferro migram das camadas superficiais e acumulam no horizonte B, que apresenta coloração escura e contrastante com os horizontes superiores que são constituídos de areia. Na bacia do rio Paraguaçu uma pequena mancha de Espodosolos Ferrihumilúvico ocorre nas planícies litorâneas próximo a Baía do Iguape.

Os Gleissolos são solos hidromórficos, muito mal drenados em condições naturais, estes solos encontram-se durante o ano todo ou por longos períodos permanentemente saturados por água. Em decorrência do ambiente redutor caracterizam-se por forte gleização. Em relação a textura, os horizontes superficiais podem ser arenosos, o horizonte glei possui textura francoarenosa. Devido à redução e solubilização do ferro ocasionada pelo processo de gleização, o horizonte glei (C, B, E ou A) apresenta cores aczentadas/azuladas de cromas baixos. Esses solos desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água, em áreas de relevos planos de terraços fluviais, lacustres ou marinhos (SiBCS, 2018). Os Gleissolos Tiomórficos ocorrem nas planícies flúvio - marinhas, no entorno da Baía do Íguape, local onde desagua o rio Paraguaçu.

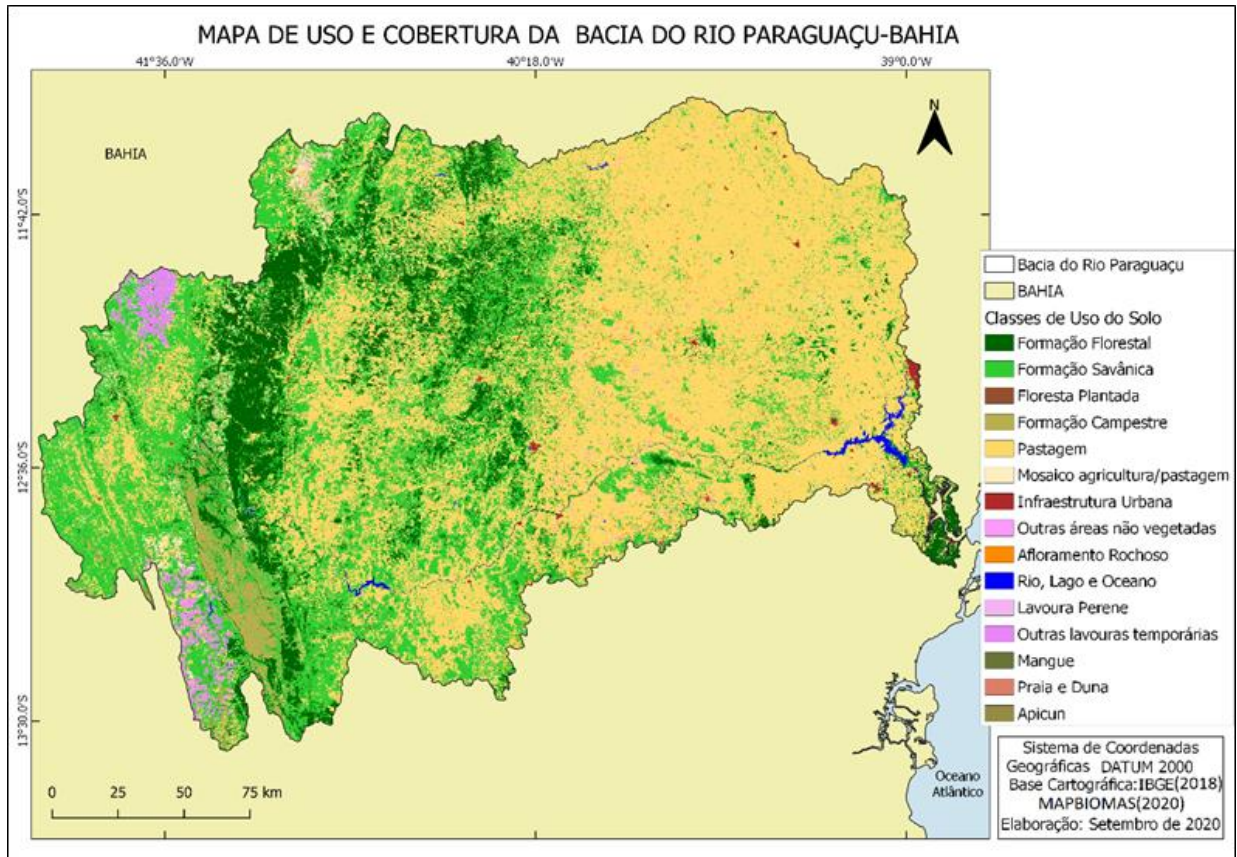
Os Vertissolos são solos minerais, que possuem horizonte vértico com textura argilosa ou muito argilosa, alta CTC e alta saturação por bases. Apresentam mudanças de volume com a variação do teor de água no solo, com a ocorrência de fendas profundas na época seca, e evidências de movimentação sob a forma de superfícies de fricção, chamadas de slickensides (SiBCS). Esses movimentos de expansão e contração ocorrem devido ao alto teor de argilas expansivas (2:1), o que faz com que esses solos possuam consistência muito dura quando seco e pegajosa e plástica quando molhado. Variam de pouco profundos a profundos e ocorrem em relevos plano a suave ondulados. Na bacia os Vertissolos ocorrem no baixo curso, no entorno da Baía de Íguape sobre folhelhos e siltitos do Grupo Santo Amaro.

3.4 Cobertura e Uso da Terra

Devido a sua grande extensão, o uso e cobertura ao longo da Bacia do Rio Paraguaçu apresenta diversificações que refletem suas condições edafoclimáticas, principalmente no que tange a cobertura vegetal (Figura 9). Desta maneira, a área da bacia exhibe as seguintes regiões

fitoecológicas: Savana (Cerrado), Estepe (Caatinga), Floresta Estacional Semidecidual e Decidual, Floresta Ombrófila e áreas de Formações pioneiras (Mangues e restingas).

Figura 9: Cobertura e Uso da Terra do RPGA



Fonte: A autora

A vegetação de Cerrado tem sua principal ocorrência associada ao alto curso da bacia, adaptando-se as condições de clima e altitude. Apresenta predomínio de formação essencialmente campestre, estrato herbáceo (campo limpo e rupestre) com indivíduos raquíticos, e cerrado aberto com fitofisionomia gramíneo lenhosa (IBGE, 1993; IBGE, 2012). A Caatinga está distribuída em toda área da bacia, principalmente na borda oriental da Chapada, ao norte da Serra nas Chapadas do Morro do Chapéu, e a centro-leste na região semiárida da bacia. Ocorre o predomínio de espécies de dossel semi-contínuo tais como Savana Estépica Arborizada e Savana Arborizada (IBGE, 1993). A Floresta ombrófila aberta e mista, ocupa as áreas próximas a foz do rio Paraguaçu, ambiente que possui o clima mais úmido e os maiores índices de precipitação da bacia (IBGE, 1993). A região da bacia apresenta núcleos localizados de vegetação remanescente e florestas secundárias devido ao avanço das atividades antrópicas.

As Florestas Estacionais semi-decidual e decidual, são caracterizadas pela estacionalidade foliar dos indivíduos arbóreos, que se adaptam à deficiência hídrica do solo no

período seco, são considerados complexos fitofisionômicos fortemente influenciados pelos aspectos da Caatinga. Ocorrem ao longo de toda bacia, por toda a encosta oriental da Chapada, em parte das serras ocidentais e na região central da bacia (IBGE, 1999).

O alto curso da bacia é o trecho que ainda conserva grande parte da vegetação, principalmente devido ao crescimento do turismo ecológico e histórico (que incentiva a conservação dos recursos naturais da região) e a existência de Unidades de Conservação como o Parque Nacional da Chapada Diamantina e o Parque Estadual do Morro do Chapéu. Todavia, nos últimos anos houve avanço do desmatamento e uma diminuição progressiva da cobertura vegetal e degradação de matas ciliares na região, em função da substituição de espécies vegetais nativas por pastagens para pecuária bovina, agricultura e as atividades de extrativismo vegetal que ocorrem principalmente nas regiões de Mucugê, Andaraí, Utinga, Barra da Estiva, Iraquara e Bonito (Pereira, 2008).

Em toda a bacia do rio Paraguaçu, as atividades agrícolas representam 19% da produtividade do estado. No alto curso as lavouras temporárias de maior rendimento (kg/ha) segundo dados da Produtividade Agrícola Municipal – PAM (2018) são: tomate, cebola, cana-de-açúcar, batata inglesa, mandioca, melancia, milho e feijão. Grande parte concentrada ao norte da Serra do Sincorá, nos municípios de Souto Soares, Iraquara e Mulungu do Morro e também ao sul do Pediplano Central da Chapada, no Agropolo Mucugê-Ibicoara. O Agropolo é um dos polos agrícolas mais produtivos do estado, com grande densidade de pivôs centrais, que teve aumento considerável fomentando pela construção da Barragem do Apertado (Figura 10).

Figura 10: Área dos pivôs centrais do polo agrícola



Fonte: Google Maps (2021)

Em relação as lavouras permanentes na área, destacam-se os pomares: banana, maracujá, mamão, laranja, goiaba, manga e tangerina. As culturas de café arábica e canephora, típico de regiões de elevadas altitudes, possuem importante produção na região com destaque no cenário nacional.

No trecho médio da bacia, ocorre maior espaçamento na distribuição da vegetação, à medida que ocorrem variações de clima e altitude as características de cobertura se distinguem em relação a região da Chapada Diamantina, a vegetação predominante nesse trecho é a Caatinga. Esse curso do rio possui a maior parte da população e infraestrutura urbana da bacia, cidades que variam de 10 mil a 500 mil habitantes, densidade que ocorre em função da proximidade com a costa e todo processo de interiorização do território, que ocorreu com a abertura de rotas de transporte do Recôncavo para a Chapada Diamantina e possibilitou o povoamento do médio curso da bacia, além do surgimento de cidades como Feira de Santana, que concentra o Centro Industrial de Subaé (CIS), segundo maior distrito da indústria baiana. Com essa interiorização teve início a criação de gado que ainda tem grande expressividade no cenário econômico da região. Sobretudo ocorre o uso da caatinga nativa em substituição ao pasto plantado, supressão da vegetação para plantio de pastos, e pisoteio, que também são relevantes e reconfiguraram a paisagem semiárida (Vale e Rios, 2016).

A questão da sazonalidade acaba impondo limitações agrícolas nessa área, favorecendo a onipresença das atividades pecuárias. Situação que é muito comum no semiárido brasileiro, extensos locais são utilizados para pastagem no período seco e agricultura de sequeiro no período chuvoso. Outro aspecto importante, é que em muitos casos, a pecuária é principal fonte da economia dos municípios do semiárido, visto a adaptação dos animais aos ambientes secos e à oferta de dieta alimentar natural, a própria caatinga, para suprir parte de suas necessidades nutricionais (Vale e Rios, 2016). Além disso, as matas ciliares próximas as áreas de várzeas e brejos existentes na Caatinga, acabam sendo desmatadas para o desenvolvimento da agricultura, situação que é muito comum ao longo do médio curso.

Segundo os dados do PAM (2018) as lavouras temporárias com maior rendimento (kg/ha) são: tomate, abacaxi, mandioca, milho, cebola, cana-de-açúcar e batata doce. As lavouras permanentes que possuem maior rendimento (kg/ha) são: maracujá, tangerina, banana, café, coco da baía, laranja, limão, manga, tangerina e goiaba.

O trecho referente ao baixo curso é caracterizado pelo predomínio de espécies florestais secundárias da Mata Atlântica (Floresta Ombrofila Densa) e a ocorrência de áreas de influência marinha e flúvio-marinha associadas a presença de mangues e restingas que têm sido reduzidos por mudanças no fluxo de água doce e marés. Embora existam áreas de reflorestamento e duas

unidades de conservação no trecho (APA Pedra do Cavalo e Reserva Extrativista Marinha do Iguape) restam poucas formações originais do bioma, devido a substituição da vegetação por culturas variadas, vegetação secundária e pastagens.

Os municípios existentes nesse trecho atuam como pontos estratégicos para entrada e saída do interior baiano. Segundo o PAM (2018) as lavouras temporárias com maior rendimento (kg/ha) existentes nesse trecho são de: mandioca, milho, feijão, fumo, cana-de-açúcar, batata-doce, amendoim e abacaxi.

E as lavouras permanentes são de: banana, coco-baía, laranja, maracujá, manga, mamão e limão. Destaca-se no trecho o cultivo de laranja nas cidades de Governador Mangabeira, Cruz das Almas e Sapeaçu que é muito comercializada na região metropolitana de Salvador e no Recôncavo Baiano.

Além da agricultura, as atividades econômicas desenvolvidas na região são a pecuária com destaque para criação de gados e aves, indústrias de couro para criação de calçados, papel reciclado, laticínios, derivados de cana-de-açúcar, criação de peixes, mariscos e a pesca que ocorrem principalmente na zona de estuário do rio, onde existem comunidades ribeirinhas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo apresenta as bases cartográficas, os desenvolvimentos técnicos e os programas utilizados para a modelagem da bacia utilizando o SWAT.

4.1 DADOS DE ENTRADA E GERAÇÃO DAS HRUS

Para realização da modelagem inicial, o modelo SWAT requer informações referentes ao relevo, tipos de solos, clima e tipos de cobertura e uso da terra. O primeiro passo para que o modelo SWAT simule os diferentes processos físicos numa bacia hidrográfica é a inserção dos dados geoespaciais e tabulares de entrada.

Os dados geoespaciais correspondem ao Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE), mapa de solos e mapa de cobertura e uso da terra. O SWAT necessita de um banco de dados com diversas informações para atender o preenchimento dos parâmetros que designam as características de cada tipo de solo, cobertura e uso da terra. O modelo possui um banco de dados interno, porém com informações pedológicas e de cobertura e uso da terra associados aos Estados Unidos. Como esses dados são bastante específicos, e a área de estudo desse trabalho está localizada numa zona de clima tropical, foi necessário buscar essas informações, fazer

associações quanto a cobertura e uso da terra e criar um banco de dados de solos com base no projeto RADAM, visto que os solos brasileiros possuem características diferentes dos solos formados em regiões temperadas.

Além disso, são necessários dados tabulares referentes as séries temporais de vazão e as informações climáticas da área de estudo. As variáveis meteorológicas requeridas pelo modelo são: precipitação diária (mm), radiação solar (MJ/m²), temperaturas máximas e mínimas (°C), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa (%).

4.1.2 Modelo digital de elevação

Para delimitação da área da bacia de drenagem e hidrografia, o primeiro dado espacial de entrada requerido pelo SWAT é o Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE utilizado foi o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA, com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Foi selecionado um recorte na área da bacia, entre as coordenadas geográficas 11° 39' a 13°54' S e 38° 54' a 42°41' W, onde foram baixadas 15 imagens: S12W039; S12W040; S12W041; S12W042; S12W043; S13W039; S13W040; S13W041; S13W042; S13W043; S14W039; S14W040; S14W041; S14W042; S14W043 e posteriormente elaborado o mosaico. O MDE foi baixado em coordenadas geográficas e depois reprojetoado em UTM (SIRGAS 2000 / UTM zone 24S) para inserção no ArcSWAT.

Após a instalação do ArcSWAT, criação e configuração de um novo projeto, o MDE foi inserido no modelo. Após abrir o MDE, foi definida a unidade de altura em metros (DEM projection setup), em seguida calculada a direção dos fluxos para definição das bacias (*Flow direction and acumulation*) etapa que demora um pouco devido aos vários processamentos que são realizados.

Finalizado esse processo, no campo área (Ha) foi definido um valor a partir do qual foram criados os cursos d'água, nesse campo quanto menor o valor maior a hidrografia, dessa maneira através de testes optou-se por utilizar o valor de 50.000 para área de estudo. Foi então gerada de maneira automática a rede de drenagem e exutórios (*Create streams and bullet*) a partir dos quais as sub-bacias foram criadas (*Outlet and Intlet Definition*). Cada exutório vai ser criado no ponto de encontro entre os canais de forma automática, sendo possível manualmente deletar, mover ou criar esses pontos.

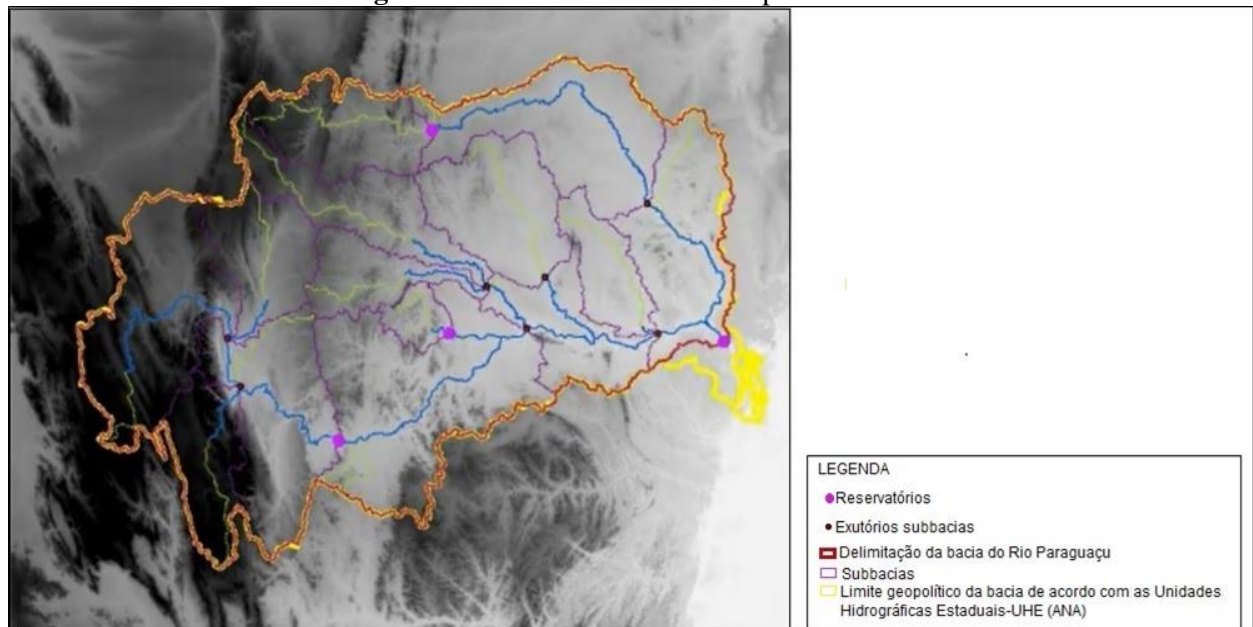
Após a definição dos pontos foi feita a delimitação das bacias (*Whole Watershed outlets*) indicando o limite final da bacia, que no caso desse trabalho correspondeu ao local da

Hidrelétrica Pedra do Cavalo, principal barragem da Bacia do Rio Paraguaçu. Ao final do processo a bacia da área de estudo foi delineada e dividida em 14 sub-bacias. Em seguida o modelo calculou os parâmetros da área de cada sub-bacia (*Calculate subbasin parameters*) e foram adicionados alguns pontos referentes aos reservatórios presentes na bacia.

O limite inicial da bacia do Rio Paraguaçu utilizado nesse trabalho foi o das Unidades Hidrográficas Estaduais – UHE, denominadas Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UEPGRH (ANA, 2014), estabelecidas com base na gestão dos recursos hídricos, com enfoque nos aspectos geopolíticos e divisas estaduais, sobrepondo o critério estritamente hidrográfico.

Após a inserção do MDE e delineamento da bacia no SWAT, o limite da bacia foi estabelecido com base no ponto de exutório final (Barragem Pedra do Cavalo), ficando a delimitação da bacia de acordo com as Unidades de Planejamento Hídrico-UPH (Figura 11), caracterizadas por uma homogeneidade de fatores geomorfológicos, hidrográficos e hidrológicos que permitem a organização do planejamento e do aproveitamento dos recursos hídricos ali existentes (ANA, 2016).

Figura 11: Divisão de sub-bacias e pontos de exutórios



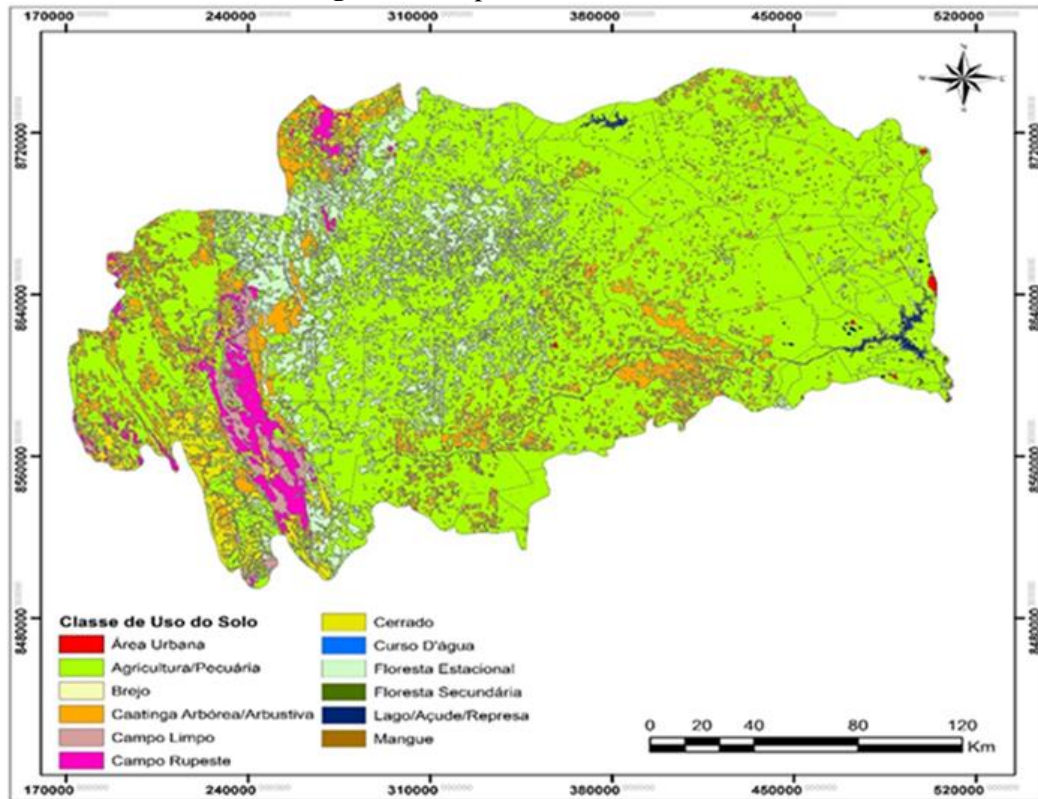
Fonte: Adaptada pela autora

4.1.3 Dados de cobertura e uso da terra

Para elaboração do mapa temático de cobertura e uso da terra na área da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia, foi feita a interseção entre o mapa de classes de uso do solo (figura 12) do

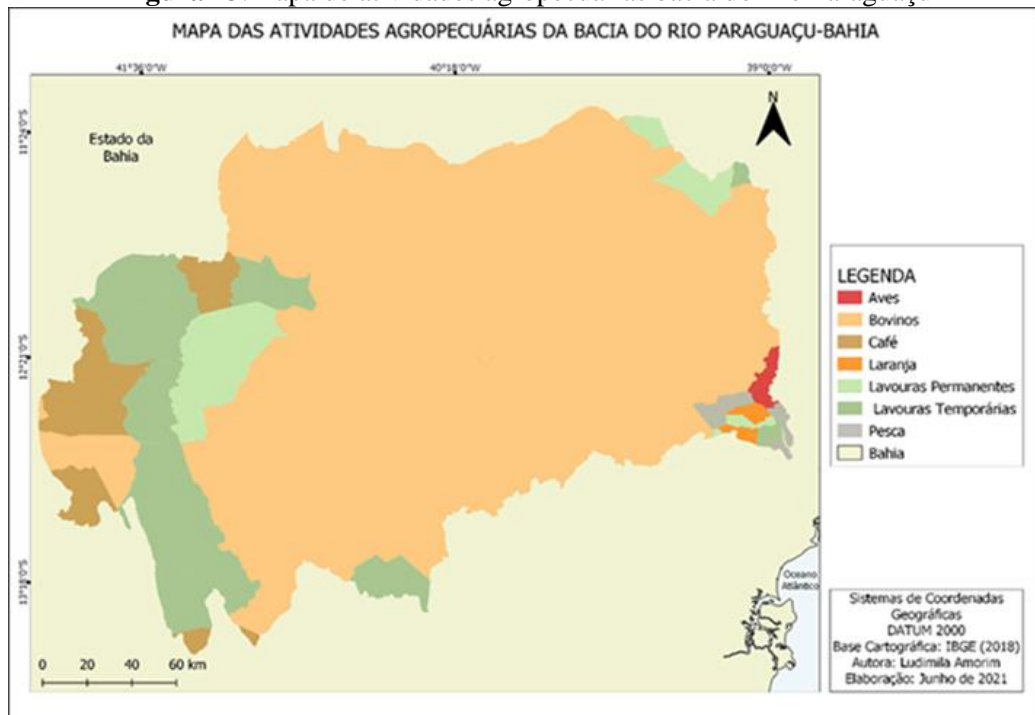
livro “Semeando Águas do Paraguaçu” (Carelli, 2015) e o mapa de atividades agropecuárias (figura 13) do IBGE (2018).

Figura 12: Mapa de classes de uso



Fonte: Carelli (2015)

Figura 13: Mapa de atividades agropecuárias bacia do Rio Paraguaçu



Fonte: A autora

O mapa de atividades agropecuárias do Brasil (IBGE, 2018) indica as áreas de cultivos temporários e permanentes, criação de animais, atividades de silvicultura e pesca por município.

O mapa do projeto “Semeando Águas do Paraguaçu” (Carelli, 2015) indica as classes de uso do solo na bacia do Rio Paraguaçu: área urbana, agricultura/pecuária, brejo, caatinga arbórea/arbustiva, campo limpo, campo rupestre, cerrado, floresta estacional, floresta secundária, cursos d’água e mangue.

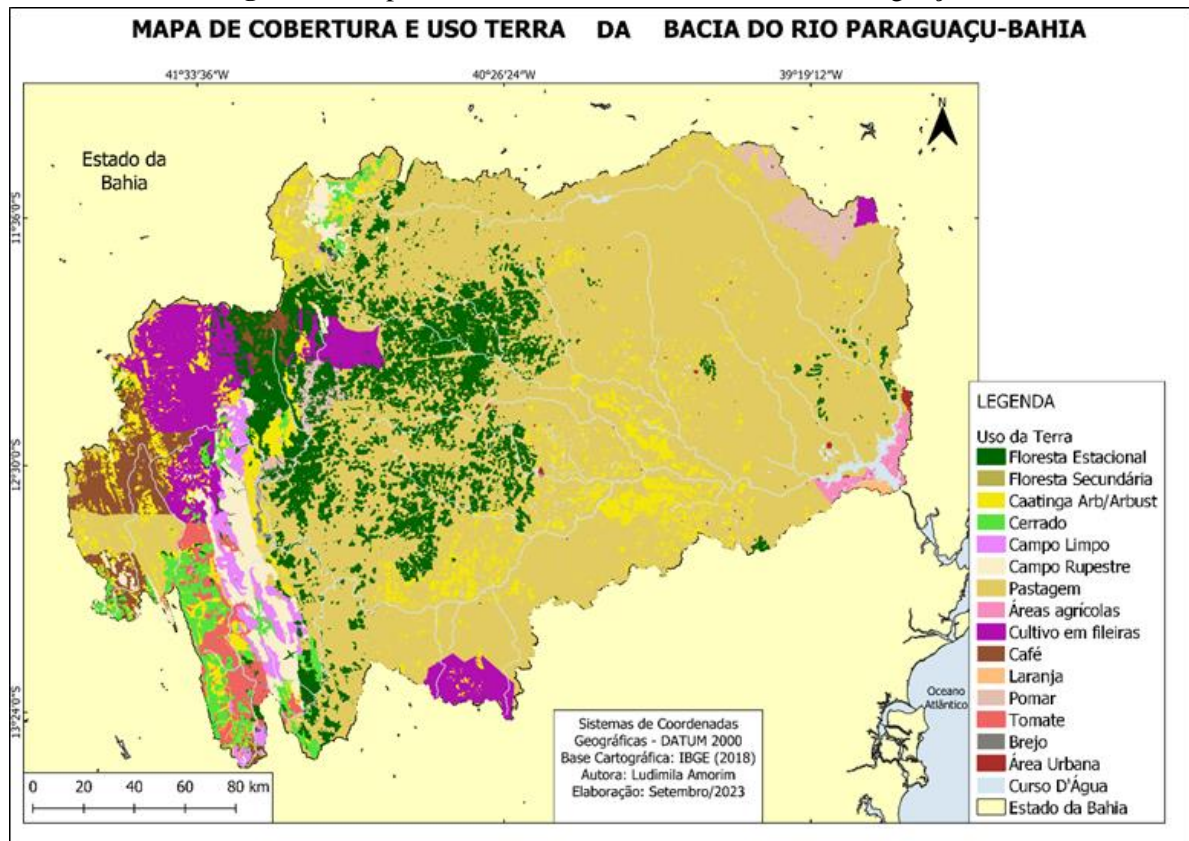
A identificação das culturas agrícolas existentes nos municípios foi feita através dos dados de Produção Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2018) que identificaram os tipos de culturas permanentes e temporárias, rendimento por hectare e produção anual de cada município brasileiro.

Inicialmente foi feito o recorte da área do mapa do IBGE (2018) para os limites da bacia do Rio Paraguaçu. Em seguida realizada a correção da geometria dos *shapes* e depois a interseção, gerando uma nova camada, onde os limites dos dois mapas foram mantidos e os campos em comuns e as tabelas de atributos foram unidas. Na tabela de atributos do novo *shape*, foram copiados os dados de classes de uso para uma nova coluna, onde foram feitas as substituições. Todo local que no mapa de classes de uso era identificado como agricultura/pecuária, foi substituído pela atividade agropecuária correspondente naquela área de acordo com o IBGE.

Ao fazer isso, obteve-se maior especificação das atividades agropecuárias desenvolvidas na bacia, além das classes de uso, o que facilitou a associação com as classes de uso disponíveis no banco de dados do SWAT. Isso é importante porque o modelo durante a simulação considera o crescimento vegetal nos diferentes tipos de culturas e plantas, distinguindo as culturas anuais de estação quente e fria, culturas perenes, árvores, período de plantio, colheita e irrigação, logo, quanto mais informações, melhor a resposta na simulação.

A partir disso, foi confeccionado o mapa de uso e cobertura da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia (Figura 14), determinou-se as seguintes classes: área urbana, brejo, caatinga arbustiva arbórea, café, campo limpo, campo rupestre e cerrado, cultivo em fileiras, curso d’água, floresta estacional e secundária, laranja, pastagem, pomar, tomate e áreas agrícolas.

Figura 14: Mapa de uso e cobertura da Bacia do Rio Paraguaçu



Fonte: A autora

Após a definição das classes, confecção do mapa e inserção dessas informações no *Arcswat*, foram feitas as associações com as classes de uso do solo correspondentes existentes no banco de dados do modelo SWAT (Quadro 1).

Quadro 1- Associação de classes de uso com banco de dados do SWAT

Classes de uso	Banco de dados SWAT
Área urbana	Urban área medium density (URMD)
Brejo	Wetlands (WETL)
Caatinga	Range Brush (RNGB)
Campo limpo	Range Grass (RANGE)
Campo rupestre	
Cerrado	
Cultivo em fileiras	Agricultural land row crops (AGRR)
Floresta estacional	Forest-Deciduous (FRSD)
Floresta secundária	Forest Mixed (FRST)
Laranja	ORANGE
Pastagem	Pasture (PAST)
Pomar	Orchard (ORCD)
Tomate	Tomato (TOMA)
Áreas agrícolas	Agricultural Land-Generic (AGRL)

Curso d'água	Water (WATR)
Lago/Açude/Represa	
Café	COFFEE

Fonte: A autora

O banco de dados do SWAT dispõe de uma grande variedade de tipos de uso e cobertura da terra, segundo Arroio Junior (2016, p.76) “são 127 categorias relacionadas a diversos tipos de culturas agrícolas, feições naturais e coberturas específicas, com valores e padrões referentes a cada categoria de uso da terra”. Além de outras categorias para as áreas urbanas, classificadas de acordo com a densidade e o tipo de urbanização.

Para realização dessa etapa buscou-se associar essas classes mediante as características e semelhanças de cada grupo, além da utilização de trabalhos realizados com o SWAT no Brasil, para verificação das classes utilizadas em relação a cobertura vegetal do cerrado e caatinga que são biomas predominantes na bacia (Miranda, 2017; Andrade, 2018; Valério, 2015; Medeiros, 2013; Silva, 2018).

Desse modo, quanto a vegetação, as classes foram escolhidas devido à similaridade de suas características físicas, a caatinga arbustivo/arbórea foi associada a classe Range Brush (RNGB) que é considerada uma cobertura composta por uma variedade de arbustos e pequenas árvores densas, existente na região do Texas (EUA) e que se assemelha a caatinga brasileira.

Já o cerrado, os campos limpos e rupestres que são característicos de vegetação herbácea e arbustiva foram associados a classe Range Grass (RNGE) representada pela variedade de gramíneas (Andrade, 2018; Silva, 2018).

Os brejos na bacia correspondem as áreas úmidas, ambientes lênticos com presença de neossolos flúvicos, e foram associados aos *Wetlands* (WETL) que no modelo corresponde as regiões que possuem os solos sob condição de saturação (Andrade, 2018).

O pomar (Orchard – ORCD) foi associado as lavouras permanentes dos cultivos de frutas como: manga, maracujá, banana, mamão, tangerina e goiaba. A área de cultivo de laranja que é expressiva na região foi associada com a classe ORANGE já existente no banco de dados e que corresponde ao mesmo tipo de cultivo.

O cultivo de tomate na bacia que corresponde as áreas do Agropolo Mucugê-Ibicoara foram associadas a classe Tomato (TOMA) já existente no banco de dados do modelo.

O cultivo em fileiras que na bacia corresponde as áreas de lavouras temporárias de mandioca, feijão, cana-de-açúcar, cebola, batata-inglesa e milho, foi associado no modelo a *Agricultural land row crops* (AGRR) que representa as culturas agrícolas anuais, variedades de culturas individuais com características regionais (Andrade, 2018).

As áreas agrícolas gerais identificadas como *Agricultural Land-Generic* (AGRL), foram associadas as áreas de atividades agropecuárias de pesca, por estarem localizadas em regiões que também possuem áreas agrícolas segundo o relatório de Produção Agrícola Municipal - PAM (IBGE, 2018) sendo essa associação mais similar à realidade local diante das alternativas do banco de dados.

4.1.4 Dados pedológicos

O mapa de solos foi elaborado através do mapeamento das unidades de solos distribuídas nas paisagens do Brasil feito pelo IBGE (2019), com base cartográfica na escala de 1:250.000 e pontos amostrais referentes a um levantamento pedológico na escala de 1:1.000.000. Para esse mapeamento o IBGE fez uma atualização das legendas e polígonos com base no Manual Brasileiro de Classificação de Solos, além de utilizar imagens de satélite e a interpretação das informações do Projeto RADAMBRASIL, dentre outros insumos.

Desse modo, para área de estudo foram identificadas 15 classes de solos: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, Argissolo Amarelo distrocoeso, Argissolo Vermelho eutrófico, Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, Chernossolo Argilúvico órtico, Latossolo Amarelo distrocoeso, Cambissolo Háplico Ta eutrófico, Cambissolo Háplico Tb eutrófico, Latossolo Vermelho eutrófico, Luvissole Crômico órtico, Neossolo litólico distrófico, Neossolo Regolítico eutrófico e Planossolo Háplico eutrófico.

Além das informações geoespaciais, o modelo SWAT requer uma série de parâmetros referentes as características químicas e físicas dos solos que são inseridas manualmente no modelo (Quadro 2). Isso ocorre porque os solos presentes no banco de dados do modelo são americanos, com características que diferem dos solos tropicais brasileiros, por isso é preciso cadastrar os solos brasileiros no modelo e preencher esses parâmetros.

Quadro 2-Parâmetros de solo do modelo SWAT

Parâmetros do modelo SWAT	Descrição
SNAM	Nome dado ao solo
NLAYERS	Número de camadas (horizontes do solo)
HYDGRP	Grupo hidrológico
SOL_ZMX	Profundidade máx. total
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm^3) (por camada)
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água (mm/mm) (por camada)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada da camada (mm/hr)

SOL-CBN	Conteúdo de carbono orgânico (%) (por camada)
CLAY	Porcentagem de argila % (por camada)
SILT	Porcentagem de silte % (por camada)
SAND	Porcentagem de areia % (por camada)
ROCK	Porcentagem de cascalho % (por camada)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal) (por camada)
USLE_K	Fator de erodibilidade K da equação USLE (por camada)

Fonte: Lima (2016)

Para área de estudo da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia, os parâmetros referentes aos solos foram extraídos do Projeto RADAM folha SD 24 Salvador, que traz os perfis de solos feitos pelo Levantamento Exploratório de Reconhecimento de Solos da Margem Direita do Rio São Francisco do Estado da Bahia (EMBRAPA,1978). O levantamento abrange toda a área leste e sul do Rio São Francisco que inclui a bacia do Rio Paraguaçu (Figura 15).

Figura 15: Área de localização do levantamento exploratório.



Fonte: RADAMBRASIL (1999).

Para realização da associação dos perfis de solo do RADAM com os solos mapeados pelo IBGE na área de estudo, foi feita a verificação por localização, região e município, na tentativa de selecionar a amostra correspondente a mesma área ou que apresentasse propriedades similares, satisfazendo em igualdade as características das classes do 1º, 2º e 3º nível categórico, ordem, subordem e grande grupo, respectivamente, de acordo com a classificação brasileira de solos.

O projeto RADAM traz a descrição dos perfis de solos e suas análises químicas e físicas, das quais foi possível retirar as seguintes informações para o modelo SWAT: Nome do solo

(SNAM), número de camadas (NLAYERS), profundidade total (SOL_ZMX) e de cada horizonte (SOL_Z), carbono orgânico por camada (SOL-CBN), porcentagem de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY) e cascalho (ROCK) por camada e pH.

Os grupos hidrológicos dos solos foram identificados através da metodologia proposta por Sartori et al (2005) que fez uma extensão da metodologia de classificação dos grupos hidrológicos para solos brasileiros propostos por Lombardi Neto (1989) para a nova nomenclatura do atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999).

Segundo Sartori et al. (2005) a classificação hidrológica feita pelo Serviço de Conservação de Solos (SCS) dos Estados Unidos, acaba induzindo os usuários a considerarem somente a textura superficial do solo para a classificação. Já a metodologia apresentada por Lombardi Neto (1989) apresenta-se com mais clareza para as condições dos solos brasileiros, uma vez que fornece melhores subsídios para classificação com base não somente na textura superficial, como também nas características físicas dos solos, tais como: a profundidade; a textura; a razão textural entre o horizonte superficial e subsuperficial; e a permeabilidade dos solos influenciada pela sua porosidade e pela atividade da argila.

Segundo Sartori et al. (2005, p, 6) a classificação de Lombardi Neto (1989) “é direta, assim como se procede com a original elaborada pelo SCS, “(...) no entanto ela é mais criteriosa e inclui alguns solos arenosos no grupo D e alguns solos argilosos no grupo A”. Dessa maneira sendo considerada adequada para o uso com o método SCS nas condições dos solos brasileiros. Assim, a identificação dos grupos hidrológicos foi feita com base na classificação de Sartori et al. (2005) conforme Quadro 3:

Quadro 3- Grupos hidrológicos dos solos

GRUPOS HIDROLÓGICOS - SARTORI (2005)		SOLOS
Grupo A: Solos com alta resistência a erosão	-Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); -Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; -Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); -Solos de textura média; -Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; -Solos bem drenados ou excessivamente drenados; -Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; -A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.	Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; Latossolo Amarelo, Elatossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
Grupo B: Resistência moderada	Solos profundos (100 a 200 cm); -Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; -Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;	Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; Latossolo Bruno;

	<ul style="list-style-type: none"> -Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; -Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; -Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; -A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. 	<p>Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico;</p> <p>Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
Grupo C: Resistência baixa	<ul style="list-style-type: none"> -Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); -Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; -São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; -Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); -A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. 	<p>Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; Cambissolo de textura média e Cambissolo Háplico ou Húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos (Latossólico); Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.</p>
Grupo D: Resistência muito baixa	<ul style="list-style-type: none"> -Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; -Solos rasos (prof. < 50 cm); -Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; -Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); -Solos orgânicos. 	<p>Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvisso; Plintossolo; Solos de Mangue; Afloramentos de Rocha; Demais Cambissolos que não se enquadram no Grupo C; Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: Sartori et al (2005)

Os parâmetros que não foram identificados nos perfis dos solos, tais como: albedo (SOL_ALB), fator de erodibilidade (USLE_K), condutividade hidráulica (SOL_K), porosidade do solo (ANION_EXCL), capacidade de retenção de água (SOL_AWC) e densidade aparente (SOL_BD), foram obtidos através de funções de pedotransferência (PTFs), caracterizadas como funções preditivas de certas propriedades dos solos a partir de outras facilmente medidas, ou seja, através de bases de dados e levantamento de solos (Budiman et al.,2003).

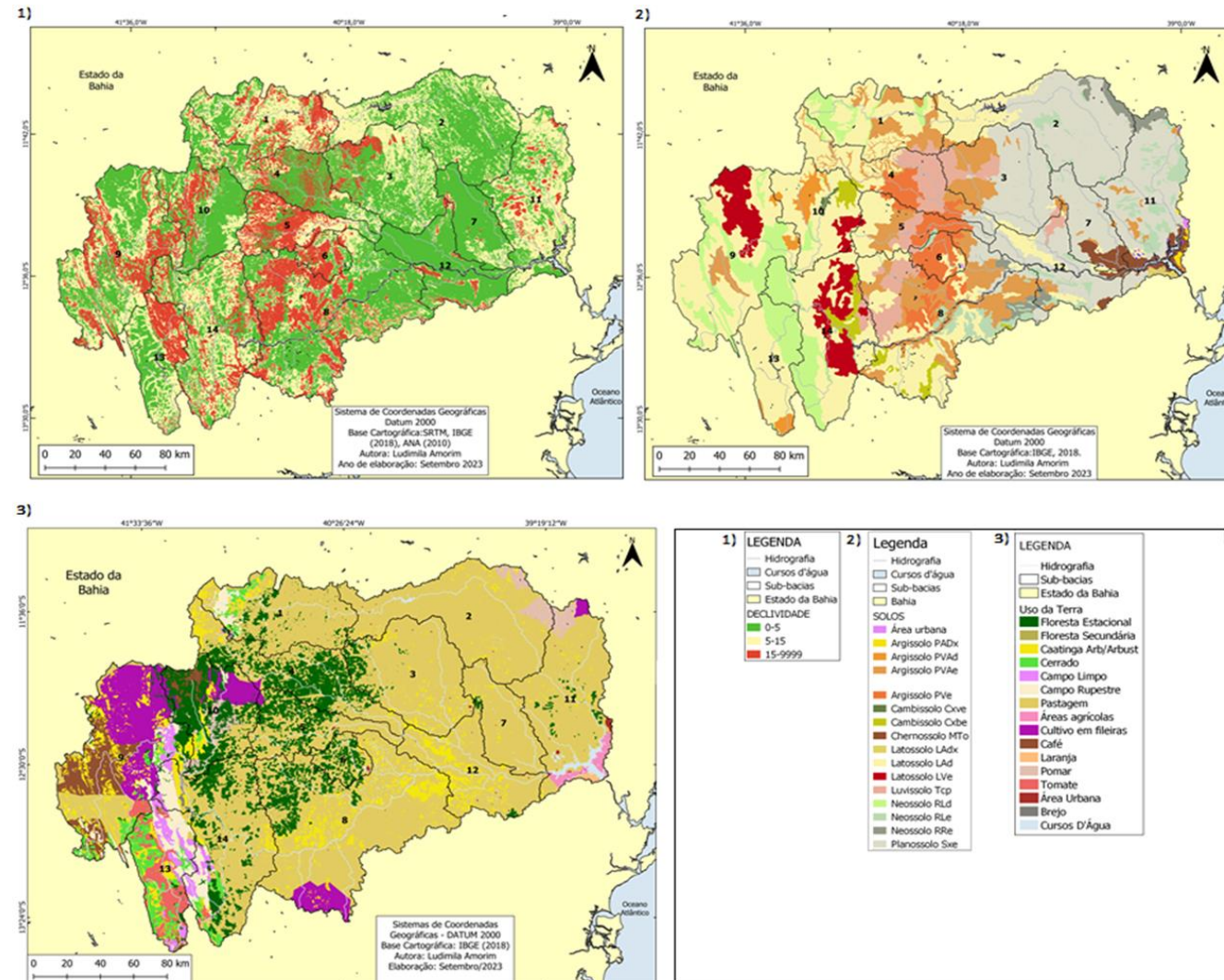
Para essa predição foi utilizada uma planilha *excel* desenvolvida por Saxton and Rawls (2006), nessa planilha ao entrar com os dados de textura, grupo hidrológico e matéria orgânica, todos os outros parâmetros foram calculados e em seguida inseridos manualmente no modelo.

4.1.5 Geração das unidades de respostas hidrológicas (HRUs)

Após o delineamento da bacia, a próxima etapa foi gerar as Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) que são “as áreas acidentadas dentro de sub-bacias formadas por uma única cobertura de terra, solo e combinações de gestão” (Arnold et al., 2011) ou seja, o SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias (HRUs) com características físicas homogêneas, que vão apresentar o mesmo tipo de uso da terra, solo e declividade. Por esse motivo cada HRU é única, com comportamento hidrológico diferente a depender da combinação de suas características físicas.

Para criar as HRUs, é feita a importação dos dados espaciais de uso da terra, solos e declividade (gerada através do MDE) para que suas informações sejam cruzadas pelo modelo (Figura 16).

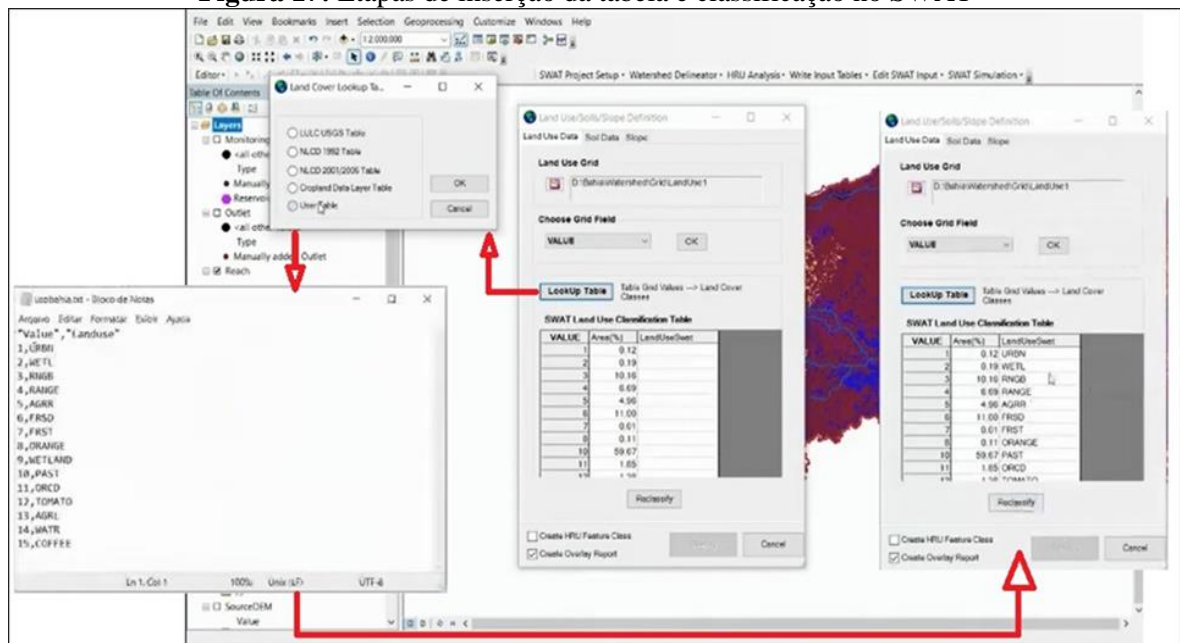
Figura 16-Mapas de declividade, solos e cobertura da Bacia do Rio Paraguaçu.



O primeiro mapa a ser inserido no modelo foi o de uso da terra, optou-se por inserir um *shape* ao invés do *grid*, para a reprojeção do tamanho do pixel que está sendo usado no modelo. Após inserção, o modelo transformou o *shape* em *raster* e fez o recorte para área da bacia, depois foram adicionados os 15 tipos de usos.

Nessa etapa, aparece um quadro com 3 colunas, uma do VALUE que representa os valores de uso de 1 a 15, a outra coluna com a ÁREA correspondente a cada um desses valores e uma terceira coluna (*LandUseSwat*) onde foi feita a associação com o banco de dados. Em seguida foi inserida uma tabela TXT (*LookupTable*), organizada anteriormente com os valores e o tipo de uso para serem associados automaticamente com a área (Figura 17).

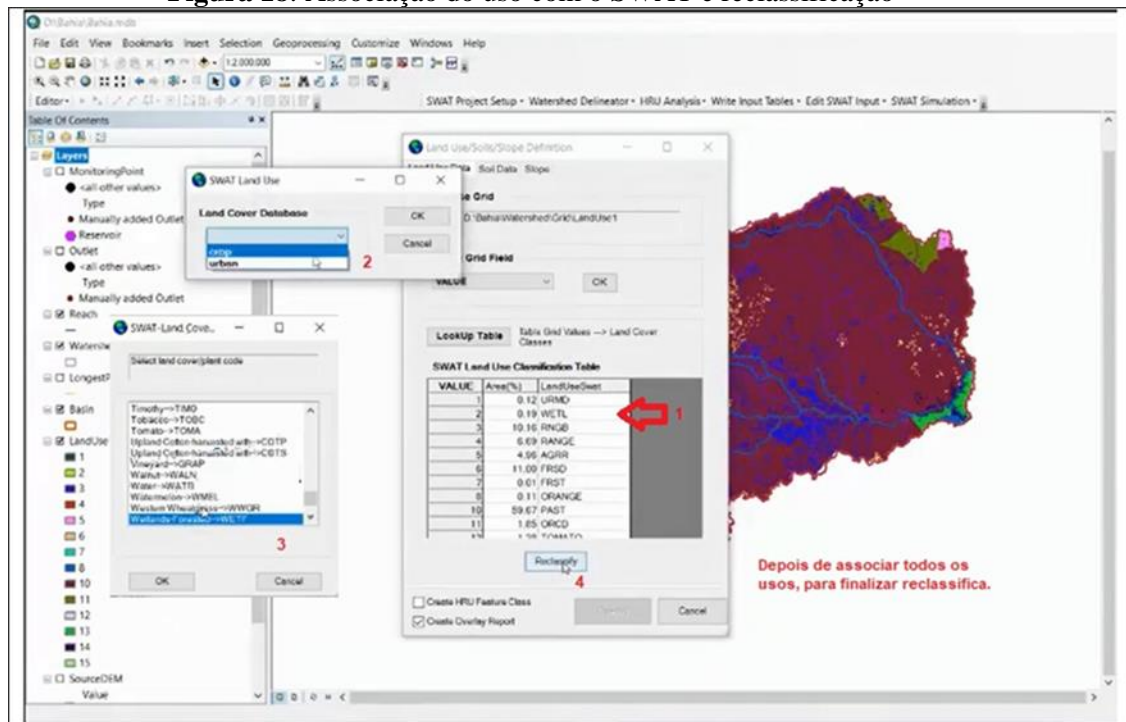
Figura 17: Etapas de inserção da tabela e classificação no SWAT



Fonte: Adaptado pela autora.

Após a inserção da tabela e associação automática dos usos com os valores, ao clicar em cada tipo de uso é possível fazer alterações e verificar se as associações estão de acordo com as categorias de uso existentes no banco de dados do modelo. Depois de checar cada tipo de uso, foi feita a reclassificação (Figura 18) e o processo finalizado, passando para etapa seguinte, onde foi feito o mesmo processo para inserção dos dados de solos.

Figura 18: Associação do uso com o SWAT e reclassificação



Fonte: Adaptado pela autora

Conforme supracitado, antes de inserir o mapa de solos no modelo, é necessário cadastrar manualmente os solos brasileiros no banco de dados e preencher os parâmetros para todas as camadas. Após o cadastro, o processo para inserir os solos é o mesmo do uso, porém ao tentar incorporar a tabela TXT dos solos o processamento indicou erro (*Wrong format*). O erro estava associado ao tamanho muito longo dos nomes dos solos, sendo necessário reeditar os nomes e colocar siglas. Dessa forma, onde tinha escrito Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico ficou como AVAE, e assim foi feito para todos os tipos de solos na tabela TXT e também no banco de dados onde os solos foram cadastrados inicialmente. Esse é um detalhe importante, pois conforme foi observado caso o nome não seja diminuído vai ocorrer erro posteriormente na etapa de geração das HRUs e vai ser necessário recadastrar os dados de solo e refazer todas as etapas.

Após essa etapa, o próximo passo foi a definição das classes de declividade (*Slope Descretization*), onde indica-se o número e o limite de cada classe. Para essa etapa, utilizamos como referência as classes de declividade identificadas na área da bacia do Rio Paraguaçu em trabalho realizado por Macedo (2014), onde 74 % da declividade da bacia corresponde ao relevo plano-suave (0-5), 15% ao relevo moderado íngreme (5 – 15) e 11% ao relevo íngreme ou muito íngreme (>15). Desse modo, através do MDE o modelo SWAT gerou o mapa de declividades

da bacia do Rio Paraguaçu-Bahia, conforme as três classes definidas por representarem bem o relevo da área de estudo. Depois de gerar o mapa de declividades, foram criadas as HRUs.

No processo de definição das HRUs (*HRUs definition*) é realizado um refinamento, onde o modelo dispõe de uma opção (*HRUs Thresholds > Multiple HRUs*) para que o usuário defina um nível de sensibilidade, a partir do qual serão eliminadas áreas de uso e cobertura, tipos de solo e classes de declividade com valores inferiores ao limite estabelecido. Essa é uma forma de estabelecer uma área mínima para as HRUs e eliminar aquelas que são muito pequenas. Somente as HRUs que passam nessa definição, vão para a próxima etapa de calibração e validação.

Observa-se que esse é um valor que varia muito entre os trabalhos realizados com o SWAT, sua definição está muito relacionada com a área de estudo e os objetivos de cada autor, uma vez que é preciso tentar limitar um pouco o número de HRUs a depender do tamanho da área, sendo de forma geral utilizada para ganho em eficiência nas etapas de calibração e simulação. Outro aspecto é em relação ao processamento computacional, que segundo Bueno et al. (2017) um elevado número de HRUs pode significar aumento do tempo e espaço (memória) para processamento. Logo, deve-se buscar equilíbrio entre esses aspectos, sem que haja uma perda na qualidade dos resultados do modelo.

Para este estudo optou-se por deixar o valor de 0% para o uso, 5% para a declividade e 7% para os solos. Antes da definição dos limites de sensibilidade, inicialmente foram criadas 1.297 HRUs, após o refinamento e redistribuição, o número final foi reduzido para 571 HRUs.

4.2 ENTRADA DE DADOS CLIMÁTICOS

Após a criação das HRU's a etapa seguinte foi a inserção dos dados climáticos e geração das tabelas no modelo. As variáveis meteorológicas requeridas pelo modelo são: precipitação (mm/s), temperatura (C°), velocidade do vento ($m s^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (MJ/ m^2), todavia houve bastante dificuldade em encontrar todas as variáveis e séries completas nas fontes oficiais (Instituto Nacional de Meteorologia INMET; Sistema Estadual de Informações Ambientais e de Recursos Hídricos-SEIA).

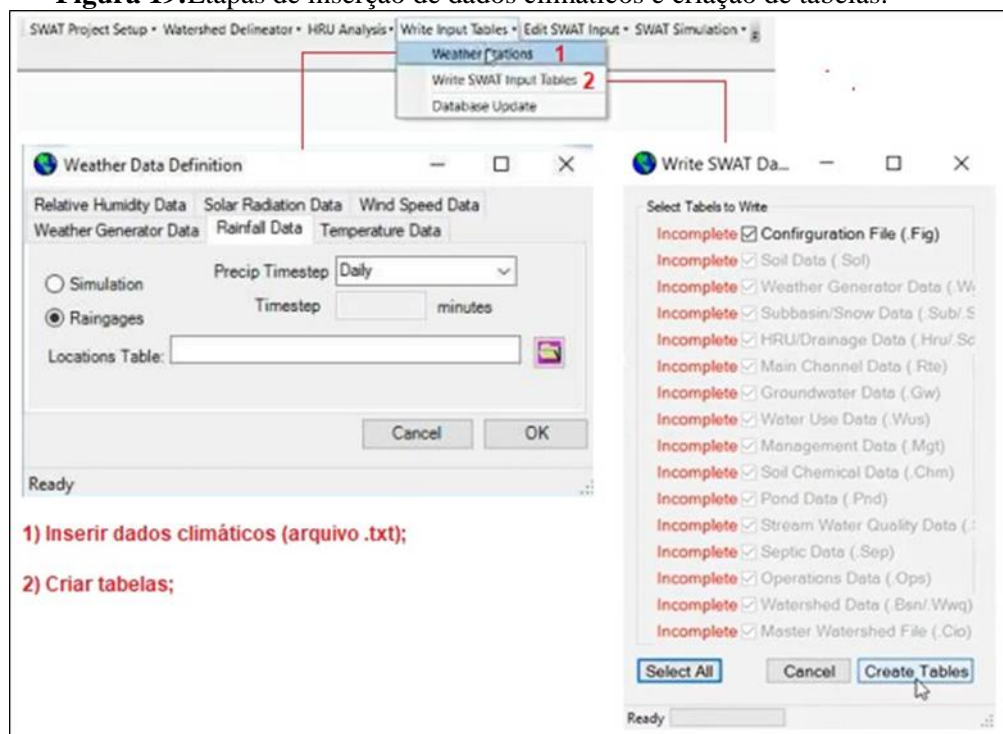
Dessa forma, os dados climáticos de precipitação e temperatura foram obtidos através do *Global Weather Data* também chamado de *World Weather for Water Data Service (W3S)*, uma plataforma de dados como serviço que permite ao usuário baixar dados climáticos de reanálise de uma região pré-estabelecida em qualquer bacia hidrográfica do mundo. Os dados são

baixados em formatos compatíveis com os modelos hidrológicos, tais como os formatos SWAT, HEC-HMS e CSV. Para área de estudo da bacia do Rio Paraguaçu, os dados de reanálise mostraram-se mais completos e apresentavam um maior número de estações.

Para realização desse trabalho foram obtidos dados do período de 2012 a 2019 para região compreendida entre as coordenadas geográficas 11° 39' a 13°54' S e 38° 54' a 42°41' W onde está localizada a bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu, Bahia. É válido destacar que o período foi estabelecido de acordo com os dados que haviam disponíveis, fator que foi uma das grandes dificuldades na realização da pesquisa, uma vez que os dados públicos disponibilizados estavam com séries incompletas e apresentavam alguns valores inconsistentes.

Os dados de vento (m s^{-1}), umidade (%) e radiação (MJ/ m^2) foram gerados pelo modelo através do gerador climático (XGEN), o qual é capaz de simular os processos hidrológicos da bacia em um ano médio sem a inserção de séries históricas de dados meteorológicos. Após essa etapa todas as variáveis climáticas (.txt) foram adicionadas no modelo e em seguida foram geradas as tabelas (Figura 19).

Figura 19: Etapas de inserção de dados climáticos e criação de tabelas.



Fonte: Adaptado pela autora

Os dados de vazão observada da bacia hidrográfica foram adquiridos no portal HIDROWEB, que é uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos (SNIRH) gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Nesse portal existe um

banco de dados que contém todas as informações da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Para área de estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu o posto fluviométrico escolhido foi a estação Fazenda Santa Fé (código 51330000), que está localizada na sub-bacia 12, na cidade de Rafael Jambeiro, cujo órgão responsável é a ANA e a operadora é o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Esse posto foi definido por apresentar dados diários mais completos e consistentes para validação do modelo (figura 20).

Figura 20: Estações pluviométricas e fluviométricas da bacia do RPGA.



Fonte: A autora.

4.3 SIMULAÇÃO

Após a inserção dos dados primários e criação das tabelas de entrada o modelo já está habilitado para fazer as edições das tabelas (caso seja necessário ajustar algum valor), calibrações e rodar as simulações. Para realizar a simulação é preciso configurar o processador que será utilizado (64-bit. release), indicar um período da simulação, além de estabelecer a série temporal em que a saída será fornecida (diária, mensal ou anual).

É necessário que se estabeleça um período de aquecimento no modelo (*warm up*), de no mínimo 1 ano, que não entra na calibração, esse período é importante para que o modelo simule o ciclo hidrológico corretamente. Assim como para calibração é necessário que seja estipulado um período de 2 a 10 anos (Neitsch *et al.*, 2005).

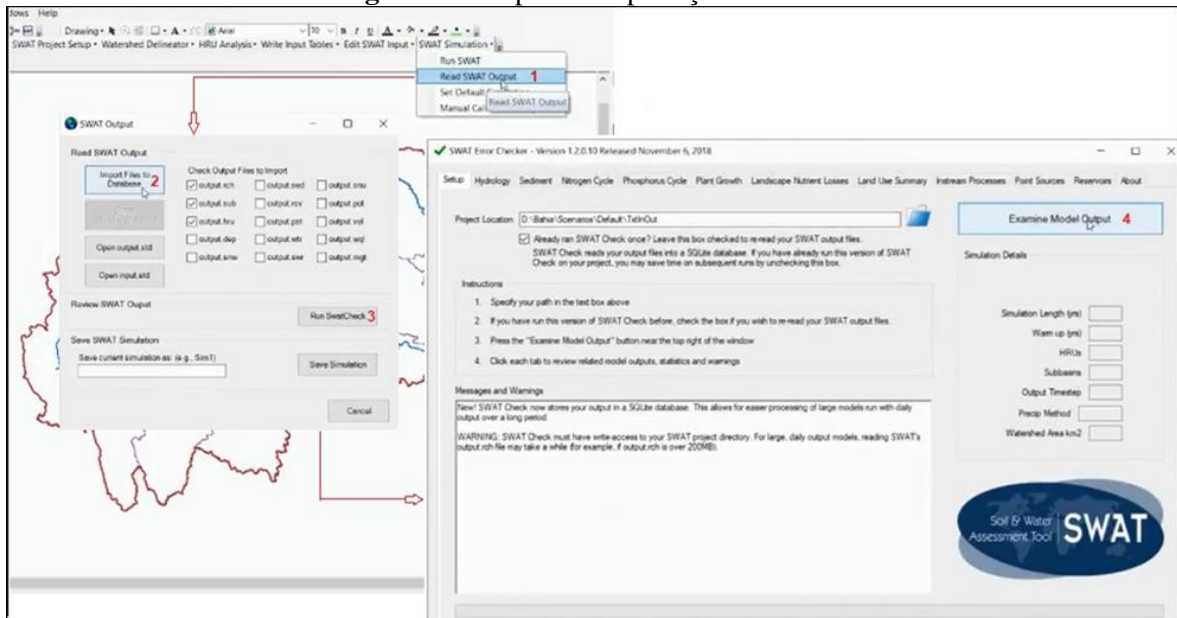
Para utilização do modelo SWAT na bacia do Rio Paraguaçu, o período de simulação indicado foi de oito anos (2012 a 2019), sendo feita a distribuição de três anos para aquecimento do modelo (2012-2014), três anos para calibração (2015-2017) e os últimos dois anos para validação (2018 - 2019).

4.4 CALIBRAÇÃO AGRONÔMICA

Após indicar o período de análise, suas distribuições e rodar o modelo, a calibração inicial começa com a série temporal anual para verificar se o balanço hídrico apresenta dados coerentes. Nessa etapa, após rodar o modelo os resultados são importados (*Read SWAT output*) e é feita a primeira leitura (*Run SWAT check*) através do *Swat Error Checker* que é um complemento do modelo, que faz a leitura da planilha de resultados e indica os erros (figura 21).

A partir dele é possível examinar a planilha dos resultados e verificar os parâmetros para cada tipo de uso na bacia, observando se os valores estão próximos aos valores reais e identificando o que precisa ser modificado através da calibração agronômica.

Figura 21: Etapas da importação de resultados



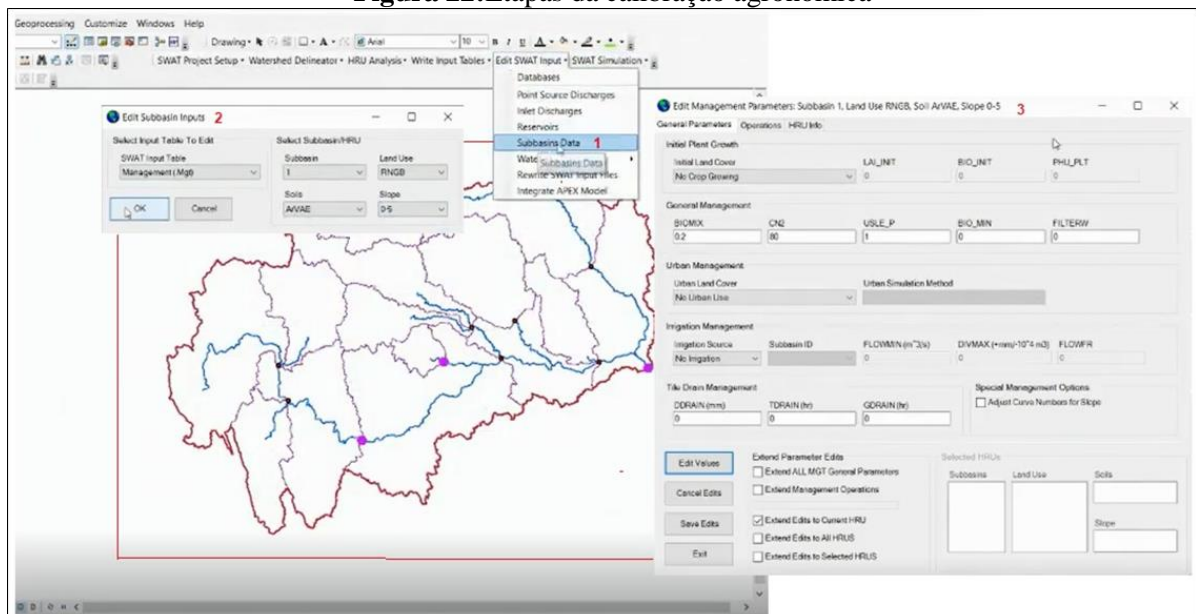
Fonte: Adaptado pela autora

A calibração agronômica (*Management Mgt*) nesse trabalho foi feita através do ajuste dos valores de biomassa e rendimento para cada uso, através da inserção de parâmetros específicos das culturas para a região de clima tropical, como períodos de plantio e colheita, adubação, irrigação.

Os valores de rendimento das culturas foram adquiridos no banco de dados de Produção Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2019) que tem informações anuais sobre as culturas permanentes e temporárias dos municípios de todo o país. Para os valores de biomassa da Caatinga, Cerrado e Floresta foram utilizados como referência respectivamente os trabalhos de Virgens et. al (2017), Roquette (2018) e Souza et. al (2012).

Essa alteração é feita através do ícone *Edit Swat Input>Subbasin Data*, onde é possível alterar vários parâmetros referentes ao solo, clima, sub-bacias, HRUs, canais secundários, águas superficiais, química dos solos e dentre outros a situação agrônômica que é o objetivo dessa calibração. Em seguida no ícone *Management Mgt* as alterações são feitas para cada tipo de uso das sub-bacias e salvas em todas as HRUs que possuem a mesma configuração (solo/uso/declividade) (Figura 22). Após a realização das alterações é preciso rodar o modelo novamente e checar a leitura dos parâmetros (*Swat Error Check*).

Figura 22: Etapas da calibração agrônômica



Fonte: Adaptado pela autora

4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a simulação do modelo é realizada a análise de sensibilidade, que identifica os parâmetros que apresentam maior sensibilidade nas simulações e que serão utilizados para calibração do modelo. Sendo desta maneira possível determinar o impacto da variação do parâmetro desejado no valor de saída do modelo, ou seja, a análise de sensibilidade pode ser compreendida como o estudo das relações entre os fluxos de informações que entram e saem do modelo (Antunes, 2015; Veiga, 2014; Castro, 2013).

Neste trabalho a análise de sensibilidade, calibração e posterior validação do modelo SWAT foram realizadas com a interface *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures – SWAT-CUP* (ABBASPOUR et al., 2007) que é uma ferramenta computacional para otimização dos processos e simulações realizadas no modelo SWAT.

Através do SWAT-CUP, a análise de incerteza e a calibração do modelo foram realizadas utilizando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting -SUF2, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). O método SUFI-2 permite trabalhar com um grande número de parâmetros na calibração do modelo o que torna o seu uso vantajoso.

A análise de sensibilidade dos parâmetros no SUFI-2 é determinada por um sistema de regressão múltipla e pelo método de amostragem aleatória o Hipercubo Latino (LHS). Os sistemas de regressão múltipla são representados na Equação 1, que retorna os valores dos parâmetros gerados pelo Hipercubo Latino versus os valores da função objetivo (Abbaspour et al., 2007).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (1)$$

Onde g é a função objetivo; b é o parâmetro; α é a constante de regressão; β é o coeficiente técnico associado à variável b ; e m é igual ao número de parênteses.

A média das variações são calculadas pela função objetivo que estima a sensibilidade dos parâmetros. O ranking desses parâmetros é feito de acordo com os valores do índice t-test e o teste de hipótese p-value (distribuição t de Student). Dessa forma, é possível identificar que quanto maior o valor absoluto de t-test e menor o valor de p-value mais sensível é considerado o parâmetro (Abbaspour et al., 2007).

O t-test é o coeficiente de regressão de um parâmetro dividido pelo seu erro. Caso esse valor seja maior que seu erro padrão, o valor do t-test será maior que zero, indicando que o parâmetro é sensível. Como no t-test não existe um limite de corte padrão para definir a sensibilidade dos parâmetros, o p-value é o coeficiente responsável por realizar esse corte. Para calcular o p-value é feita a comparação entre os valores de t-test com os valores dados na tabela de distribuição t-student. Assim o valor de p para cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente de regressão é igual a zero (Abbaspour et al., 2015).

Assim se o p-value for $< 0,05$ indica que a hipótese nula pode ser rejeitada, o que mostra que o parâmetro exerce influência sobre a variável dependente, sendo desta forma considerado sensível. Se o p-value for $0,05$ significa que existe apenas uma chance de 5% desses resultados terem surgido de uma distribuição aleatória, logo, há 95% de probabilidade da variável causar mudanças (Abbaspour et al., 2015).

É válido ressaltar que o SWAT é sensível a mais de 100 parâmetros, relacionados a vegetação, solos, clima, aquífero, canal, manejo e reservatório (Arnold et al.,1998) por esse motivo é de grande relevância identificar quais os parâmetros que mais influenciam nos resultados do modelo.

Nesse contexto, conforme as metodologias descritas, foram identificados os parâmetros que se mostraram mais sensíveis para calibração do modelo (Quadro 4). Dos 17 parâmetros selecionados para análise, 11 apresentaram-se mais sensíveis, dentre os quais, aqueles que apresentaram o valor de P-Value mais próximo de zero são considerados os parâmetros físicos de maior sensibilidade no ranking.

Quadro 4- Parâmetros mais sensíveis da bacia do Rio Paraguaçu

Parameter Name	t-Stat	P-Value
5:V__GW_REVAP.gw	-0,02	0,98
4:V__REVAPMN.gw	0,37	0,71
2:V__ALPHA_BF.gw	0,77	0,44
7:V__SURLAG.bsn	0,89	0,38
3:V__GW_DELAY.gw	2,24	0,03
11:V__GWQMN.gw	2,93	0,00
6:V__RCHRG_DP.gw	-5,05	0,00
8:V__ESCO.hru	-6,27	0,00
10:V__CANMX.hru	7,58	0,00
9:V__EPCO.hru	11,12	0,00
1:R__CN2.mgt	-13,47	0,00

Fonte: SWAT-CUP

4.6 CALIBRAÇÃO SWAT-CUP

A calibração é o processo que objetiva encontrar um conjunto de valores para os parâmetros do modelo, de modo que ele passe a representar as condições locais e o sistema hidrológico da bacia da melhor maneira possível, reduzindo dessa forma a incerteza de previsão. Esse processo é realizado através de uma criteriosa seleção dos valores para os parâmetros de entrada do modelo (dentro dos intervalos de incerteza), comparando-os com as previsões do modelo (dados de saída) para um determinado conjunto de condições assumidas com dados observados para as mesmas condições (Antunes, 2015; Arnold, 2012).

A definição dos parâmetros baseou-se em diversos estudos com realizados com SWAT no Brasil, onde foram definidos como os de maior sensibilidade ALPHA_BF, CN2, ESCO, SURLAG, GW_DELAY, SOL_Z, GWQMN, SOL_AWC, REVAPMN, GW_REVAP, EPCO, CH_N2, CANMX, RCHRG_DP, SOL_K, SLSUBBSN (Lino et al. 2009; Garbossa et al. 2010;

Durães, 2010; Rocha et al. 2010; Bonumá et al. 2011; Lelis et al. 2015; Andrade et al. 2013; Malutta, 2012 Strauch et al. 2011; Ferrigo et al. 2013; Salles, 2012; Blainski; Acosta; Nogueira (2017); Franco; Oliveira; Bonumá, (2017); Santos, J.T.S et al. (2018); Ali Zomorodian e Dowlatabadi, (2019); Martins et al. (2020); Valério, 2014; Alves, 2015; Lelis, 2011; Rodrigues, 2015)além da análise de sensibilidade do SWAT-CUP.

Foram selecionados parâmetros relacionados com as propriedades físicas dos solos (ESCO, EPCO, CN2), propriedades físico-hídricas dos aquíferos rasos e profundos (GWQMN, GW_REVAP, GW_DELAY, ALPHA_BF, REVAP_MN), propagação da água pelo canal (CH_K1, CH_K2, CH_N1, CH_N2, CH_W1, CH_W2), interferência no volume de água precipitado (CANMX) e relacionados aos processos de escoamento (SURLAG).

A calibração pode ser classificada como automática ou semiautomática. Sendo automática quando a definição dos valores dos parâmetros é feita sem interferência do usuário, através de um algoritmo de busca automática, que busca a melhor performance e adequação a realidade da bacia. E semiautomática quando o usuário interfere no processo, indicando valores e direcionando o algoritmo de calibração (Antunes, 2015).

Para execução desse trabalho foi escolhida uma abordagem semiautomática para calibração, realizada através do software SWAT-CUP por meio do algoritmo de otimização SUFI-2. O período estabelecido para calibração foi de três anos (2015 a 2017).

A busca pelo conjunto de valores dos parâmetros no SWAT-CUP ocorre através de iterações. Cada iteração corresponde a uma tentativa de obter um conjunto de parâmetros que representem os processos físicos da bacia, desta forma a cada nova iteração o modelo obtém um conjunto melhor do que o anterior. Ao final de cada iteração o modelo mostra o conjunto de valores dos parâmetros simulados e indica o melhor. Esse processo é encerrado quando as estatísticas satisfatórias forem alcançadas e não houver mais melhorias no valor da função objetivo.

Nesse trabalho, realizou-se no primeiro momento 10 iterações para testar a calibração, com o intuito de obter valores que estivessem mais adequados para realidade da área de estudo e que principalmente apresentassem um bom desempenho na validação, através dos coeficientes de correlação de determinação (R^2) e coeficiente de eficiência (NSE). Em seguida após verificar que houve uma boa correlação dos dados observados e simulados, realizou-se 300 iterações e o resultado foi satisfatório para área de estudo. Após o final da calibração o SWAT CUP indica a iteração que apresentou o melhor ajuste, ou seja, os melhores valores de cada parâmetro na área de estudo. No caso desse estudo, o melhor ajuste foi encontrado na iteração 205.

No SWAT a alteração dos parâmetros após o processo de calibração, pode ser realizado através da substituição direta, adição ou multiplicação. Respectivamente, a substituição é quando o modelo altera o valor diretamente. A adição ocorre quando um valor constante é adicionado ao valor inicial do parâmetro, e a multiplicação resulta da alteração do valor inicial por porcentagem (Castro, 2013). O **quadro 5** mostra a relação dos parâmetros otimizados, significados, limites estabelecidos, valores ajustados e métodos de alteração utilizados para a calibração das simulações na Bacia do Rio Paraguaçu.

Quadro 5- Parâmetros otimizados no SWAT-CUP

Parâmetros	Significado/descrição	Limite inferior	Limite superior	Valor ajustado	Método
CN2.mgt	Número da curva de escoamento inicial para condição de umidade II.	-0,23	0,05	-0,11	Multiplicação
ALPHA_BF.gw	Fator do fluxo de base (dia). É um indicador direto da resposta do fluxo das águas subterrâneas em função da recarga da bacia.	0,435	1,307	0,544	Substituição
GW_DELAY.gw	Tempo de retardo do fluxo das águas subterrâneas. Representa o tempo em que a água se move pelas camadas do solo até encontrar o aquífero raso.	193,35	520,44	489,37	Substituição
REVAP_MN.gw	Limite de profundidade da água no aquífero raso para que ocorra a percolação para o aquífero profundo. Integra o grupo de parâmetros relacionados aos fluxos da zona saturada.	41,144	347,18	345,65	Substituição
GW_REVAP.gw	Coefficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular. Parâmetro controlador da quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes.	-0,0925	0,1025	-0,0180	Substituição

RCHRG_DP.gw	Fração de percolação do aquífero profundo. A fração de percolação da zona da raiz que recarrega o aquífero profundo	-0,28	0,57	-0,26	Substituição
SURLAG.bsn	Coefficiente de retardo do escoamento superficial.	3,77	11,3	8,74	Substituição
ESCO.hru	Fator de compensação de evaporação do solo. Considera o efeito de capilaridade do solo.	0,36	1,09	0,52	Substituição
EPCO.hru	Fator de compensação de águas pelas plantas. Representa o teor de umidade das camadas superficiais do perfil do solo.	-0,18	0,60	0,25	Substituição
CANMX.hru	Armazenamento máximo do dossel. Representa a quantidade de água interceptada na copa das árvores.	4,22	68,10	47,13	Substituição
GWQMN.gw	Representa a água do aquífero profundo que retorna ao canal. Consiste no limite de profundidade necessário para que ocorra o fluxo de retorno das águas subterrâneas para o canal.	1853	5563	3788	Substituição
CH_N1.sub	Rugosidade dos canais tributários.	-14,76	15,086	-6,45	Substituição
CH_N2.rte	Rugosidade dos canais	-0,0009	0,0171	0,0135	Substituição
CH_K1.sub	Condutividade hidráulica efetiva no aluvião do canal tributário (mm / h).	-29,3	190,3	93,3	Substituição
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal de aluvião (mm / h).	195,3	586,3	420,1	Substituição
CH_W1.sub	Largura média dos canais tributários (m).	-60,8	179,8	85,5	Substituição
CH_W2.rte	Largura média do canal principal no topo da margem (m).	-128,3	157,3	66,3	Substituição

Fonte: A autora.

4.7 VALIDAÇÃO DO MODELO

Após a fase de calibração, foi realizada a validação do modelo, processo que confirma a capacidade do modelo em produzir simulações precisas. Nessa etapa é feita uma comparação dos dados de vazão simulados pelo modelo com os dados de vazão observados no campo. Para isso foram usados os dados da estação fluviométrica Fazenda Santa Fé, que foram comparados com os resultados do modelo para a mesma sub-bacia (12).

A análise de comparação entre os dados de vazão observada e simulada foram realizadas pelo SWAT-CUP através do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2). O NS é uma estatística que mede o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados, variando de $-\infty$ (infinito negativo) até 1, que indica ajuste perfeito. Calculado pela equação 2:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{méd\ obs})^2} \quad (2)$$

O R^2 mede o nível de associação linear entre duas as variáveis e também varia de $-\infty$ (infinito negativo) até 1, que indica associação perfeita (equação 2). Dessa forma é possível concluir que quanto mais próximos de 1 os valores de NS e R^2 melhor é a qualidade da simulação do modelo.

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_{obs} - Q_{méd\ obs}) \cdot \sum(Q_{sim} - Q_{méd\ sim})]^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{méd\ obs})^2 \cdot \sum(Q_{sim} - Q_{méd\ sim})^2} \quad (3)$$

Onde Q_{obs} é a vazão observada; $Q_{méd\ obs}$ é a média da vazão observada no período; Q_{sim} é a vazão simulada pelo modelo; $Q_{méd\ sim}$ é a média da vazão simulada no período.

Nesse estudo, após as 300 iterações, os índices de desempenho dos dados observados e simulados apresentaram valores de NS=0,83 e R^2 =0,85 classificados como “muito bons” segundo Moriasi et al. (2007), visto que quanto mais próximos de 1, os valores indicam que melhor é a qualidade da simulação.

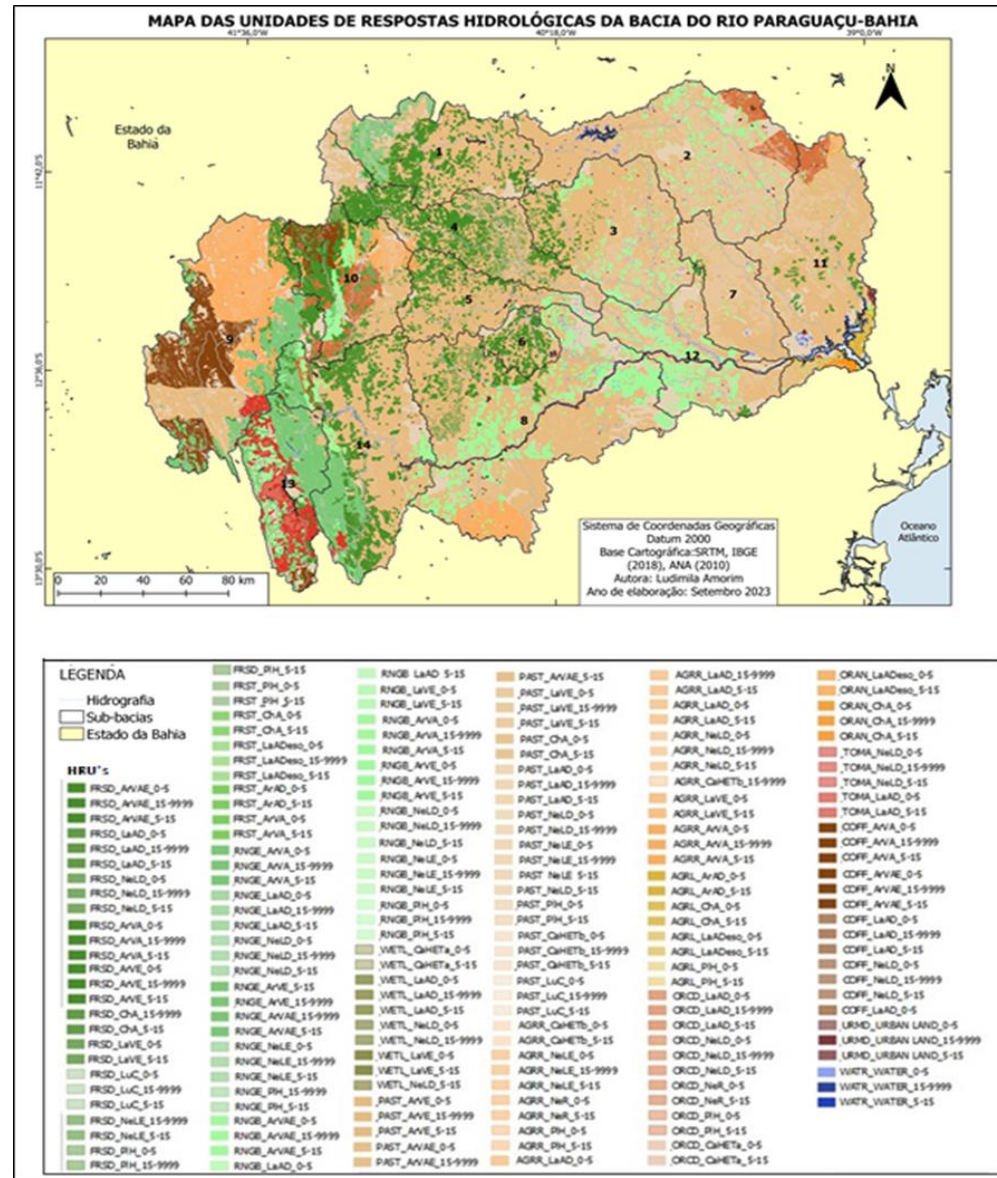
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões referentes a todas as etapas realizadas na pesquisa. A caracterização das HRUs das 14 sub-bacias do rio Paraguaçu, os resultados da calibração e validação do modelo para as condições locais e por fim a análise do comportamento hidrológico da bacia nos diferentes cenários de uso e variação sazonal (período seco e chuvoso).

5.1 DEFINIÇÃO DAS UNIDADES HIDROLÓGICAS

A bacia do Rio Paraguaçu foi dividida em 14 sub-bacias, as quais apresentaram um total de 571 HRUs, que variaram de acordo com as características eminentes ao tipo de cobertura e uso, solo e declividade em cada sub-bacia, conforme pode ser observado (Figura 23). A partir dessa combinação e definição das HRUs foram feitas as caracterizações dos ambientes nas sub-bacias, análise que possui grande relevância dentro do contexto de estudos ambientais, uma vez que através da identificação das combinações é possível compreender a dinâmica do comportamento dos processos hidrológicos na bacia.

Figura 23-Mapa das Unidades de Respostas Hidrológicas da Bacia do Rio Paraguaçu-Bahia



A sub-bacia 1, drenada pelo rio Jacuípe, está localizada no N-NW da bacia, apresenta área de 3410,45 km² e é composta por 34 HRUs. O relevo apresenta variação de plano a suave ondulado e fortemente ondulado em alguns pontos na borda oeste onde encontra-se o planalto do Morro do Chapéu, região de afloramento de rochas metassedimentares do Grupo Chapada Diamantina, cujas bordas apresentam formas de dissecação e declividade maiores que 15% com vales encaixados. Na porção leste da sub-bacia, o relevo fortemente ondulado está associado a porção sul da Serra de Jacobina, onde há domínio de formas de dissecação convexo-côncavas e em alguns pontos aguçadas que apresentam encostas com declividades entre 5 % e maiores que 15%. Na sub-bacia 1 o rio Jacuípe possui a Barragem de França, construída para regularização da vazão e abastecimento das cidades presentes na sub-bacia. Os solos predominantes são os Latossolos Lad, que se caracterizam por solos profundos de textura média e argilosa, abrangem uma superfície de 1818,69 km², associados as áreas planas e suave onduladas do relevo e as coberturas detrito-lateríticas ao sul da sub-bacia; os Neossolos RLd que representam solos minerais pouco evoluídos, apresentam contato lítico e aparecem associados ao topo e ao relevo mais fortemente ondulado do Planalto e da Serra; os Argissolos PVAe, que se caracterizam por textura franca argilo arenosa, pouco profundos (85 cm), estão associados ao relevo suave e fortemente ondulado nas encostas da Serra e próximo de algumas drenagens. O uso e ocupação predominante na sub-bacia é a pastagem (PAST) ocupando 2057,68 km², principalmente nas áreas planas associadas aos Latossolos Lad. As florestas estacionais (FRSD) possuem maior predominância na Chapada do Morro do Chapéu, próximas a drenagem e em algumas manchas na Serra de Jacobina. O Cerrado (RANGE) ocupa a maior parte do planalto, com área de 428,40 km², seguido da Caatinga (RNGB) que ocupa área de 220,12 km². A sub-bacia abrange as cidades de Morro do Chapéu, Piritiba e parte de Miguel Calmon.

A sub-bacia 2 também drenada pelo rio Jacuípe, está localizada a NE da bacia do rio Paraguaçu, apresenta área de 5464,44 km² e possui 23 HRUs. O relevo apresenta-se predominantemente plano e suave ondulado na borda oeste, com algumas dissecações associadas a Serra de Jacobina e alguns morros espalhados em áreas onduladas localizadas na parte S-SW, relevos residuais destacados pelo processo de pediplanação típico da região semiárida. Os solos predominantes na sub-bacia 2 são os Planossolos SXe abrangendo superfície de 3779,50 km², que são solos minerais imperfeitamente drenados, com horizonte superficial de textura mais leve e horizonte B plânico, estão associados as áreas planas e suaves onduladas do relevo. Os Latossolos LAd abrangem superfície de 920,28 km² e estão associados ao relevo plano a suave ondulado dos Tabuleiros Interioranos presentes na parte leste da sub-

bacia. Os Neossolos RRe apresentam espessura significativa A-C-R (150 cm), abrangem 149,48 km² e estão associados ao relevo plano e suave ondulado da borda leste da sub-bacia. O uso do solo predominante é a pastagem (PAST), abrange a área de 4166,41 km² e domina o relevo plano nas áreas de Planossolos SXe. As áreas permanentes de cultivo de pomares (ORCD) representam 330,38 km² e estão associadas aos cultivos de laranja, banana e maracujá em parte dos municípios de Conceição de Almeida e Valente. A caatinga (RNGB) representa a área de 301,27 km² e está associada ao relevo plano suave, seu remanescente vem diminuindo com o avanço das atividades agrícolas e pecuárias em toda a bacia. Fazem parte dessa sub-bacia as cidades de Várzea da Roça, Gavião, Nova Fátima, Riachão do Jacuípe, Pé de Serra, Conceição do Almeida, Retirolândia e Valente. O rio Jacuípe possui outro reservatório nesse trecho, a Barragem de São José do Jacuípe, construída para regularização da vazão, abastecimento humano e irrigação.

A sub-bacia 3 está localizada a Centro –E da bacia, é drenada pelos rios Paulista a oeste e pelo rio do Peixe a leste. Apresenta uma área de 3993,87 km² e possui 25 HRUs. O relevo é predominantemente plano a suave ondulado, apresentando-se mais fortemente ondulado a noroeste associado ao Patamar do Médio Paraguaçu, unidade que possui grandes morros que se suavizam a leste e sul e coalescem em suaves ondulações e rampas coluviais com a depressão do rio Paraguaçu, onde está situada a sub-bacia 3. Os Planossolos Sxe ocupam área de 2403,64 km² associados ao relevo plano, os Argissolos PVAe representados por textura média argilosa e ocupam o relevo suave ondulado e forte ondulado, associado aos Latossolos LVAe nas áreas mais planas, os Luvisolos Tcp com textura média argilosa, pouco profundos (70cm), ocupam o relevo mais fortemente ondulado. No que tange ao uso, a pastagem (PAST) é predominante na sub-bacia associada aos Planossolos SXe nas áreas de relevo plano. As florestas estacionais (FRSD) ocupam área de 188,90 km², estão associadas aos topos dos morros, vertentes e permeiam a rede de drenagem em alguns trechos. A caatinga (RNGB) ocupa área de 227,71 km² associada aos Planossolos SXe no relevo plano e aos Argissolos PVAe nos relevos suave ondulado. As cidades que fazem parte da sub-bacia são Baixa Grande, Ipirá e Pintadas.

A sub-bacia 4 está localizada na porção Centro – NW da bacia, possui área de 3404,34 km² e 55 HRUs. É drenada pelos rios Duas Barras e Capivari. O relevo apresenta-se fortemente ondulado com formas convexa-côncavas e elevações residuais com desníveis mais acentuados na parte central da sub-bacia, que coalescem e aplainam na parte leste, onde o relevo é plano e suave ondulado associado a superfícies de pediplanação. A oeste o relevo é plano a suave ondulado, com superfície aplainada desenvolvida a partir de coberturas residuais arenoargilosas e dos siltitos, apresenta-se também dissecado pelos córregos em direção ao rio Duas Barras. Os

Latossolos Lad predominam com área de 1138,41 km² associados ao relevo plano e suave ondulado da parte oeste, na parte leste os Planossolos SXe aparecem ocupando menor área no mesmo tipo de relevo. Os Luvisolos Tc_p abrangendo superfície de 836,69 km² e Argissolos PVe 662,38 km² estão associados ao relevo fortemente ondulado da região central da sub-bacia. Os Argissolos PVAe aparecem associados as encostas do relevo mais fortemente ondulado na parte oeste e suave ondulado na parte leste. O uso dominante é a pastagem (PAST), ocupando área de 1809,55 km² relacionada principalmente aos Latossolos LAd; a Floresta estacional (FRSD) ocupa área de 1198,14 km² e a Caatinga (RNGB) ocupa área de 268,15 km², o Cerrado (RNGE) ocupa área de 21,01 km² e os cultivos em fileiras (AGRR) correspondem a área de 14,95 km² que representa uma pequena parte das áreas agrícolas de cana-de-açúcar, mandioca e feijão do município de Utinga, nas proximidades do rio Duas Barras. As áreas urbanas (URMD) que fazem parte dessa sub-bacia são dos municípios de Mundo Novo, Ruy Barbosa, Macajuba e Tapiramutá.

A sub-bacia 5 está localizada a Centro – W da bacia, é drenada pelo rio Saracura, possui área de 2087,28 km² e apresenta 40 HRUs. O relevo predominante na bacia é o suave ondulado e ondulado com declividades de 5-15%, principalmente na parte central sentido oeste da sub-bacia onde a unidade de relevo é o Patamar do Médio Paraguaçu. Na parte leste o relevo vai aplainando e apresenta-se plano à medida que adentra a Depressão Sertaneja. Os Latossolos LAd predominam com área de 752,38 km², associado a relevo suave ondulado na parte oeste, na transição com o Patamar de Utinga; os Argissolos PVAe, Luvisolos Tc_p e Argissolos PVe estão associados ao relevo suave a fortemente ondulado e os Neossolos RLe a Serra do Orobó na parte central da sub-bacia, conjunto de serras com encostas que atingem inclinação maiores que 45° em alguns setores escarpados; os Planossolos SXe associam-se ao relevo plano. A pastagem (PAST) é predominante na sub-bacia associada aos Latossolos LAd no relevo suave ondulado. As florestas (FRSD) ocupam topo e encostas da Serra e o relevo ondulado na parte leste. As atividades agrícolas (AGRR) ocorrem a oeste da sub-bacia, avançando sobre as florestas (FRSD) nas margens do rio. A caatinga (RNGB) permeia o rio na parte leste, associada aos Argissolos e Planossolos. O aglomerado urbano presente na sub-bacia é a cidade de Ruy Barbosa.

A sub-bacia 6 está localizada no Centro-S da bacia, ocupa área de 805,30 km² e possui 29 HRUs. É drenada pelo rio Piranhas e possui um reservatório de múltiplo uso chamado de Juracy Magalhães, que foi criado desde 1938. O relevo predominante é o ondulado e fortemente ondulado, associado ao conjunto de serras e maciços residuais das Morrarias do Médio Paraguaçu, interpenetrado pelo piso aplanado do Pediplano do Médio Paraguaçu a leste, onde

o relevo é plano. Os Argissolos PVe são pouco profundos (100 cm), com textura média argilosa cascalhenta, estão associados ao relevo fortemente ondulado e os Latossolos LAd as áreas planas. Os Neossolos RLe aparecem na parte oeste, nas encostas e topo da Serra do Orobó. O uso predominante é a pastagem (PAST) que ocupa área de 518,21 km² ligada a criação de gados, associada também aos Argissolos PVe e ao relevo mais fortemente ondulado. As florestas (FRSD) ocupam área de 171,71 km² próximo ao rio e nos topos dos morros e serras. A caatinga (RNGB) representa área de 13,93 km² e ocupa as áreas planas a leste. O aglomerado urbano dessa área é a cidade de Itaberaba.

A sub-bacia 7 está localizada a Centro-E da bacia, ocupa área de 1953,25 km² e possui 17 HRUs. O relevo é predominantemente plano, associado a Depressão do Jacuípe, com a presença de alguns relevos residuais na região central e suave ondulação ao sul, na transição com o Pediplano do Médio Paraguaçu. Os Planossolos Sxe são predominantes na sub-bacia, abrangendo superfície de 1442,48 km² de toda área plana. Na porção sul, o relevo suave ondulado corresponde aos Chernossolos MTo, pouco profundos (52 cm) com horizonte superficial A franco-argilo-arenoso cascalhento sobre horizonte B textural. A pastagem (PAST) é o uso dominante na bacia, ocupando 88% da área associada a criação de gados. Devido a extensão das atividades pecuárias, o processo de supressão da vegetação é intenso, a caatinga (RNGB) ocupa área de 62,01 km² representando 3,17% do uso na sub-bacia, está associada as encostas dos maciços residuais e sopé da Serra da Caboronga (N-W), onde as florestas (FRSD) correspondem a 4,27 km². Os aglomerados urbanos presentes na sub-bacia são as cidades de Rafael Jambeiro e Serra Preta.

A sub-bacia 8 está localizada a Centro-S da bacia, é drenada pelo rio Paraguaçu e seus afluentes do lado esquerdo, rio Capivara e Tupim; e afluentes do lado direito, riacho São Francisco e Palha. Possui área de 8206,30 km² e 49 HRUs. O relevo apresenta-se bastante variado, ocorrem áreas planas a suaves onduladas associadas ao Pediplano do Médio Paraguaçu e suas superfícies aplainadas. Na parte central, interpenetrados entre as áreas planas destaca-se o relevo mais fortemente ondulado com serras e maciços residuais das Morrarias do Médio Paraguaçu, que apresentam formas de topos convexos e aguçados de dimensões medianas e talvegues de aprofundamentos variando de fraco a forte. Os Argissolos PVe predominam com área de 2544,80 km² na parte central do relevo fortemente ondulado, na parte centro-oeste ocorrem os Luvisolos TCp; os Argissolos PVAe ocupam áreas planas e suave onduladas a leste, e permeiam as drenagens; os Neossolos RLe ocupam os topos e encostas do relevo na porção sul e central onde é atravessado pelo rio Paraguaçu; Os Latossolos LAd ocupam a maior parte do relevo plano a suave ondulado com área de 2603,01 km² ao longo da sub-bacia; os

Planossolos SXe ocorrem em alguns pontos nas planícies aluviais e áreas planas à leste. O uso dominante é a pastagem (PAST) com área de 5102,73 km² ligada criação de gados. As condições climáticas colaboram para o domínio da caatinga (RNGB) que ocupa área de 1186,34 km² em tensão ecológica com as florestas (FRSD) que ocupam área de 476,69 km² das serras e morros da porção Norte-W. As atividades agrícolas (AGRR) correspondem aos cultivos de feijão, mandioca e milho do município de Maracás. As cidades presentes na sub-bacia são Boa Vista do Tupim, Marcionílio Souza, Iaçú e Ibiquera.

A sub-bacia 9 está localizada a Oeste da bacia e abrange área de 6230,05 km². Possui 65 HRUs e é drenada pelos rios Coxó e Santo Antônio. O relevo fortemente ondulado na parte central está associado a Serra do Sincorá, com altitudes quase sempre acima de 800 m, que variam de 400 a 600 m nos vales. A oeste a escarpa de falha da Serra faz contato abrupto com o Pediplano Central. A Norte - W apresenta vales estruturais na zona de transição da Serra para o Planalto do rio Bonito, que possuem relevos de dissecação homogênea de topos tabulares e topos convexos. Na parte sul- W, o relevo fortemente ondulado associa-se aos modelados de dissecação estrutural com topos que preservam restos de superfície de pediplanação, escarpas e ressaltos íngremes da Serra da Borda Ocidental. O relevo mais plano ao norte corresponde as superfícies de aplanamento do Patamar de Souto Soares, onde predominam os Latossolos LVe na parte central e os Latossolos LAd nas áreas de borda. A sul-w os Latossolos LAd ocupam os topos conservados do Pediplano Central da Chapada. Os Neossolos RLd predominam nos topos das serras e do planalto. No que tange ao uso, predominam os cultivos agrícolas (AGRR) de mandioca, cana, feijão e milho, nos Argissolos PVe das áreas planas dos municípios de Souto Soares, Mulungu do Morro e Iraquara; e nos Neossolos Rle do município de Palmeiras. Devido a características relacionadas ao microclima e altitude o cultivo de café (COFEE) do tipo arábica é forte na região, ocupando área de 1220,48 km² nos municípios de Seabra e Piatã. Ao sul da bacia existe um pequeno trecho de produção de tomates (TOMATO) do agropolo Ibicoara/Mucugê que ocupa área de 79,42 km². A vegetação de Cerrado (RNGE) nas sub-bacias do alto trecho do rio Paraguaçu, apresenta predomínio de formações campestres (campo limpo e campo rupestre) que na sub-bacia 9 ocupam área de 730,95 km² associados aos topos das serras. A Caatinga (RNGB) ocupa área de 1330,70 km² em meio a mosaicos de atividades de atividades agrícolas e pecuárias. As florestas ocupam área de 316,10 km². Os aglomerados urbanos presentes na bacia são as cidades de Mulungu do Morro, Iraquara, Boninal, Palmeiras e Lençóis.

A sub-bacia 10 abrange área de 2922,71 km², é drenada pelos rios Bonito e Utinga e possui 57 HRUs. O rio Utinga está no meio da sub-bacia, delimitando a borda do Patamar de

Utinga localizado do lado leste da sub-bacia, onde o relevo é predominantemente plano. A oeste o relevo é plano a fortemente ondulado, apresentando um planalto com dissecação homogênea de topos tabulares e convexos. Os Latossolos LAd predominam no relevo plano com área de 1884,62 km²; os Latossolos vermelhos LVe e Cambissolos Cxve ocupam o relevo cárstico que compõe a borda leste da sub-bacia, constituído por superfícies aplanadas relacionadas ao calcário Bambuí, cuja pedogênese origina esses solos eutróficos; os Cambissolos distróficos (Cxbe) ocupam as planícies aluviais; os Argissolos PVAd e Neossolos ocupam topos e encostas do relevo fortemente ondulado. As florestas (FRSD) predominam com área de 1190,11 km², embora estejam diminuindo com o avanço das atividades agropecuárias e o extrativismo, a vegetação do alto trecho do rio Paraguaçu apresenta-se mais conservada, principalmente na encosta oriental da Chapada, devido a existência de Unidades de Conservação. A pastagem (PAST) ocupa área de 450,45 km². A cafeicultura irrigada (COFFEE) ocupa área de 193,57 km² dos Latossolos LAd na porção norte-w em parte do município de Bonito. Os pomares (ORCHD) ocupam área de 252,80 km² e representam os cultivos de maracujá, banana, goiaba, mamão e tangerina dos municípios de Lençóis e Wagner. Os cultivos em fileiras (AGRR) de feijão, mandioca e milho, do município de Utinga, ocupam área de 319,55 km².

A sub-bacia 11 está localizada a Leste da bacia, ocupa área de 4768,26 km² e possui 61 HRUs. É drenada pelo rio Jacuípe e rio Paraguaçu, nessa sub-bacia está o exutório do Rio Paraguaçu e encontra-se a principal barragem da bacia, a Pedra do Cavalo. O relevo predominante é plano a suave ondulado, as áreas mais planas estão associadas a Depressão do Jacuípe, onde os Planossolos SXe são predominantes. O relevo suave ondulado está associado as Morrarias do Baixo Jacuípe, que constituem maciços amplos realçados em relação a superfície aplanada da depressão, que assumem forma de *inselbergs* em alguns pontos destacados na topografia, os Neossolos RLe predominam nesse relevo mais movimentado. Os Chernossolos Mto ocupam as áreas de várzea ao Sul; a Sul-E o relevo suave ondulado está associado aos topos concordantes pouco elevados, alvéolos côncavo-convexos conectados a vales de fundo chato dos Tabuleiros interioranos, drenados pelo rio Paraguaçu. Nos topos aplanados ou retocados dos tabuleiros, onde os sedimentos são mais espessos estão os Latossolos LADx de textura argilosa e muito argilosa, profundos, com elevada coesão dos agregados estruturais; e os Argissolos PADx com textura média/argilosa, pouco profundos (100cm), que apresentam elevada coesão entre os agregados. O uso dominante é a pastagem (PAST) com área de 3172,02 km² ligada a criação de gado, associada principalmente aos Planossolos SXe na parte central. Os cultivos agrícolas (AGRL) de milho, mandioca e feijão dos municípios de Cabaceiras do Paraguaçu, Conceição de Feita e São Gonçalo dos Campos

representam área de 247,73km². O cultivo de laranjas (ORANGE) nos Latossolos LADx do município de Mangabeira representa área de 55,50 km² ao sul da sub-bacia. O aglomerado urbano de densidade média representativo da sub-bacia é a cidade de Feira de Santana, que é o polo-industrial e maior cidade da bacia do rio Paraguaçu.

A sub-bacia 12 localizada a sul-E da bacia, abrange área de 2982,15 km², é drenada pelos rios Paraguaçu e rio do Peixe e possui 28 HRUs. O relevo é predominantemente plano, composto por superfícies aplainadas, no centro e sul da sub-bacia um conjunto de maciços residuais destacam-se com altitudes que variam de 280 a 300 metros, no sentido norte-E o relevo fortemente ondulado está associado a Serra do Caboronga. Os Planossolos SXe predominam nas áreas planas; os Neossolos RLe ocupam os topos e encostas dos maciços residuais no Centro - S; os Argissolos PVAe ocupam o topo e encosta da Serra do Caboronga; os Latossolos LAd estão associados a algumas áreas planas no norte da sub-bacia. O uso predominante é pastagem (PAST) associado a criação de gado, ocupando área de 1689,15 km², a caatinga (RNGB) ocupa os maciços e áreas próximas a drenagem com abrangência de 546,16 km². As florestas ocupam as encostas da Serra Jibóia no sul, com área de 20,02 km². Os aglomerados urbanos presentes na sub-bacia são Itatim, Santa Terezinha e Rafael Jambeiro.

A sub-bacia 13 localizada a sul-E, possui área de 2593,45 km² e 34 HRUs. É cabeceira do rio Paraguaçu, cuja nascente é ao sul no município de Barra da Estiva. O relevo apresenta-se fortemente ondulado a norte – E associado a Serra do Sincorá. A oeste o relevo é predominantemente plano, apresentando algumas dissecações na porção sul. O uso dominante é o cerrado (RNGE) com fitofisionomia gramíneo-lenhosa que ocupa o relevo plano associado aos Latossolos LAd. Os latossolos possuem elevada aptidão para agricultura irrigada na área, devido a sua estrutura (solos profundos, permeáveis) e também a disponibilidade de recursos hídricos como a Barragem de Apertado na sub-bacia. Por esse motivo, associada a essa área de cerrado está o Agropolo Ibicoara-Mucugê, grande produtor de várias culturas irrigadas no estado, dentre elas o tomate (TOMATO) que ocupa área de 519,01 km² na sub-bacia. Ao Sul no relevo dissecado, associado aos Argissolos PVAEd profundos e distróficos está o cultivo de café (COFFEE) do município de Barra da Estiva, que ocupa área de 39,46 km². Os Neossolos RLd ocupam a Serra do Sincorá na porção norte-E, associados a caatinga (RNGB) com área de 279,27 km² e as florestas (FRSD) com 89,88 km².

A sub-bacia 14 está localizada a sul-E da bacia e abrange área de 5259,08 km². É drenada pelos rios Una, Santo Antônio e Paraguaçu, e possui 54 HRUs. O relevo é plano na borda leste associado ao Pediplano do Médio Paraguaçu, na parte central apresenta-se plano a suave ondulado com formas associadas ao Patamar do Médio Paraguaçu, na parte leste o relevo mais

fortemente ondulado associa-se a Serra do Sincorá. Os Neossolos RLe ocupam os topos e encostas da Serra do Sincorá a oeste; os Latossolos LAd predominam na sub-bacia ocupando todo o relevo plano; os Latossolos vermelhos LVe e Cambissolos Cxbe eutróficos ocorrem associados ao relevo cárstico na parte centro-E. O uso dominante é a pastagem (PAST) com área de 2659,03 km², associada as áreas planas de Latossolos LAd. As florestas (FRSD) ocupam área de 912,07 km² com maior concentração ao Norte e Sul permeando a Serra e próxima das drenagens. Os campos (RNGE) com área de 879,86 km² ocupam os topos da Serra; a caatinga (RNGB) ocupa uma área de 274,25 km² em alguns pontos permeando a Serra e na parte leste da sub-bacia próxima a drenagem. Ao Sul em meio aos campos existem algumas culturas de tomate (TOMATO) do Agropolo Ibicora-Mucugê. Os brejos (WETL) localizados a norte-W nas planícies aluviais, correspondem aos Marimbus, uma zona formada por ambientes lânticos alimentados pelos rios Utinga e Santo Antônio que é uma área de proteção ambiental devido a sua biodiversidade.

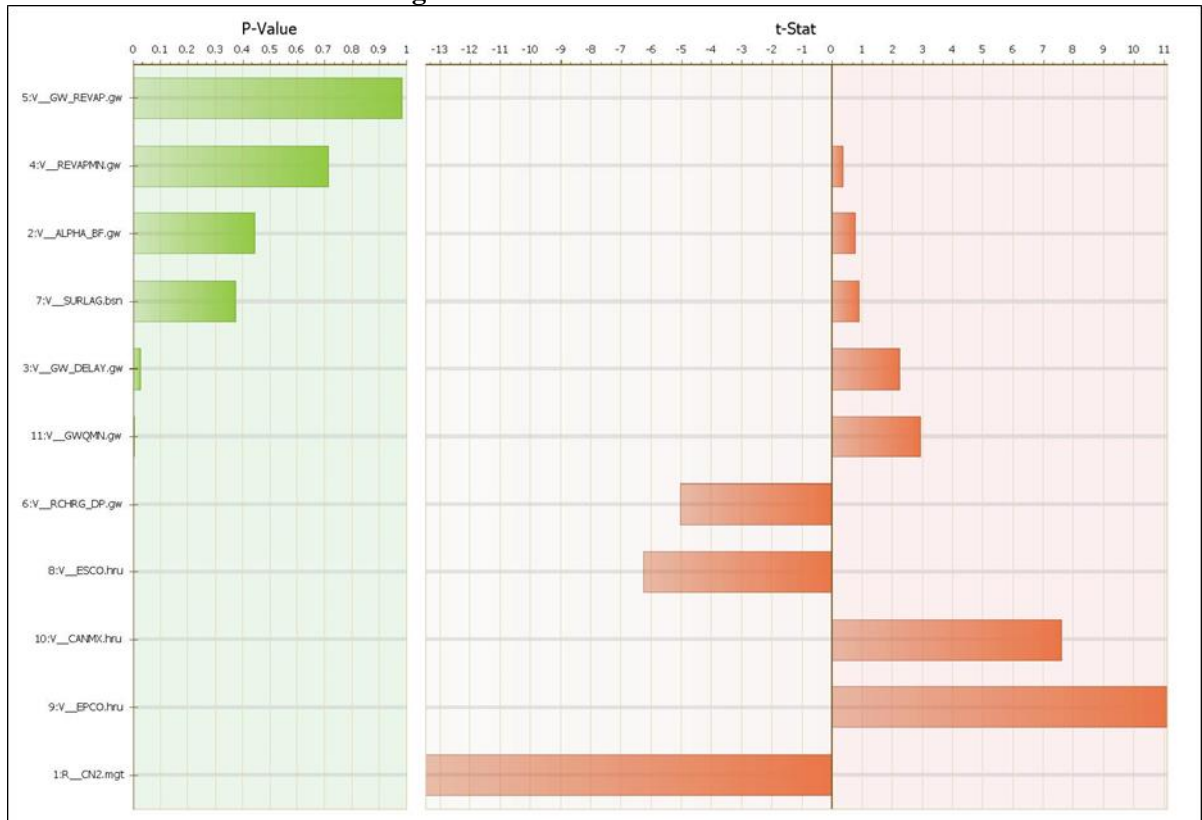
De modo geral, compreende-se que a definição das HRUs é uma etapa de grande importância para utilização do modelo SWAT, pois através dessa divisão em unidades se espera que seja possível identificar comportamentos hidrológicos similares em ambientes distintos da bacia, a partir delas serão realizados todos os cálculos para simulação dos processos no modelo.

Segundo Tucci et al. (1997) a maior dificuldade em melhor representar os processos hidrológicos, é a grande heterogeneidade dos sistemas envolvidos, ou seja, a grande variabilidade do solo e cobertura vegetal, além da própria ação do homem. Nesse sentido os processos realizados pelo SWAT de divisão da bacia em sub-bacias e criação das HRUs podem dar suporte para entender e discutir os resultados futuros após a realização das simulações.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO

A partir da análise de sensibilidade foram identificados os parâmetros que mais influenciam a vazão na bacia e que posteriormente foram utilizados no processo de calibração e validação do modelo. Nesse sentido, dos 17 parâmetros identificados na análise de sensibilidade, 11 mostraram-se mais sensíveis, ou seja, aqueles que apresentaram maior valor absoluto de t-Stat e menor valor de P-value, conforme mostra a figura 24.

Figura 24: Análise de sensibilidade



Fonte: SWAT-CUP

Na análise de sensibilidade percebeu-se que os parâmetros mais sensíveis são aqueles relacionados as propriedades físicas do solo, que possuem relação direta com a quantidade de água que infiltra e se transforma em escoamento superficial (CN2 e EPCO), sendo o CN2, o parâmetro de maior sensibilidade da bacia do rio Paraguaçu. Resultado também evidenciado por outros trabalhos com o uso do modelo em bacias do semiárido (Aragão, et al., 2013; Nascimento et al., 2018; Brouziyne et al., 2017; Aidi Huo *et al.*, 2020; Mengistua et al., 2019; Sujeet Desai et al., 2021). Destaca-se também que o escoamento superficial (CN2) é calculado para cada HRU, ou seja, para cada tipo de uso, solo e declividade, diferente de outros parâmetros, o que denota a importância da calibração desse parâmetro.

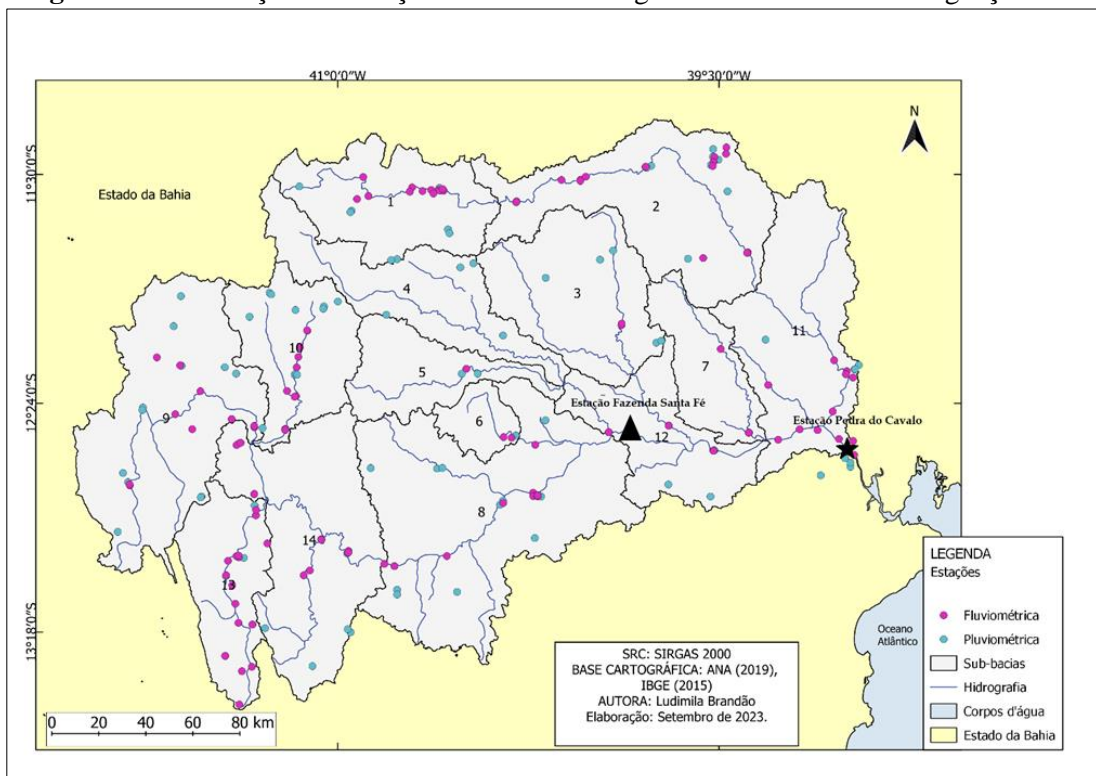
Além disso, destacam-se os parâmetros relacionados com as propriedades dos aquíferos rasos e profundos, que estão associados principalmente com os fluxos de retorno e de base, e consequentemente a quantidade de água que retorna para os canais, tais como: ALPHA, GW_DELAY, REVAPMN, GW_REVAP, RCHARD e GWQMIN. A influência desses parâmetros pode ter relação com a presença de solos mais profundos como Latossolos na bacia. De modo geral, esses parâmetros relacionados as águas subterrâneas, solos e uso, possuem maior influência no ciclo hidrológico (Martins et al., 2020).

A calibração do modelo foi iniciada com dados climáticos de reanálise de 2012 a 2019 (precipitação e temperatura), desse período, 3 anos foram para o aquecimento do modelo (2012-2014), mais 3 anos foram utilizados para a calibração (2015-2017) e 2 anos foram utilizados para validação. Para a comparação das vazões simuladas e observadas foram utilizados os dados da estação fluviométrica Fazenda Santa Fé (sub-bacia 12).

Um dos grandes problemas relatados na maioria dos trabalhos realizados com o modelo SWAT em regiões áridas e semiáridas, é a falta de dados completos e de qualidade, situação que também foi verificada durante a realização desse estudo. Inicialmente seria realizada a validação da vazão com os dados fluviométricos da estação Pedra do Cavalo (sub-bacia 11), localizada no exutório, ponto estratégico que abrange a vazão de toda a bacia. Todavia, os dados disponibilizados pelos órgãos oficiais estavam inconsistentes e geravam insegurança em relação aos resultados da pesquisa, o que fez com que o ponto escolhido para a validação fosse o da sub-bacia 12, onde a estação apresentava dados mais completos para o período (Figura 25).

O mesmo problema foi encontrado para obtenção dos dados de precipitação, havia muitos dados incompletos e inconsistentes, o que influenciou na escolha da utilização dos dados de reanálise.

Figura 25:Localização das estações hidrometeorológicas da bacia do Rio Paraguaçu-Ba.



Fonte: A autora

No primeiro momento, após a organização dos dados simulados e observados de vazão, observou-se que o valor acumulado estava de acordo, porém os picos de vazão estavam altos e a base estava muito baixa. Após calibrar os parâmetros mais sensíveis, principalmente os relacionados ao fluxo de base, os resultados ficaram mais consistentes. Logo, depois de 300 iterações, a análise de desempenho indicou valores de $R^2=0,83$ e $Nash=0,7$, considerados bons.

No que tange ao comportamento hidrológico da bacia, foi observado ao longo da pesquisa a influência da sazonalidade climática da bacia nos processos hidrológicos, sobretudo a relação entre a precipitação e os componentes hidrológicos, sendo maiores os valores de evapotranspiração, infiltração e escoamento nos períodos chuvosos e menores ou nulos nos períodos de seca. Logo, compreende-se que o comportamento da vazão na área de estudo também acompanha a precipitação (Figuras 26,27,28,29 e 30). Resultado parecido foi observado no trabalho de Silva (2020) em estudo de modelagem dos componentes do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica no bioma Caatinga.

Figura 26: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2015

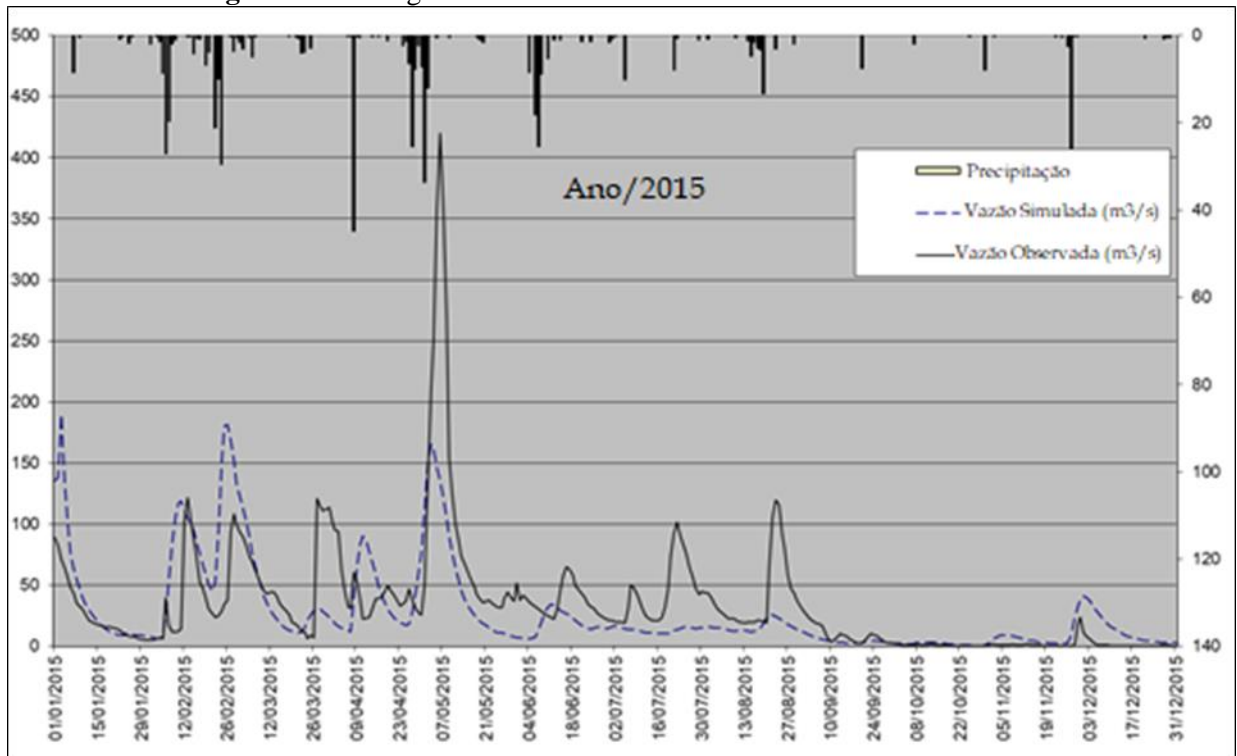


Figura 27: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2016

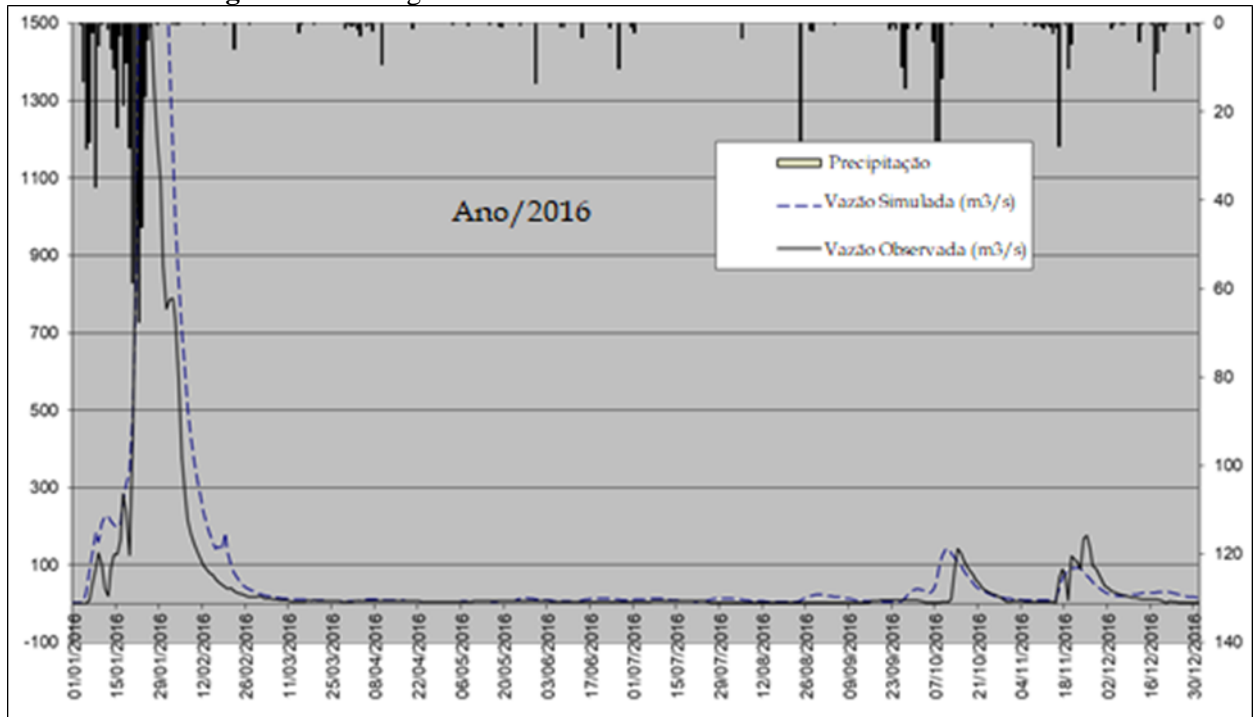


Figura 28: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2017

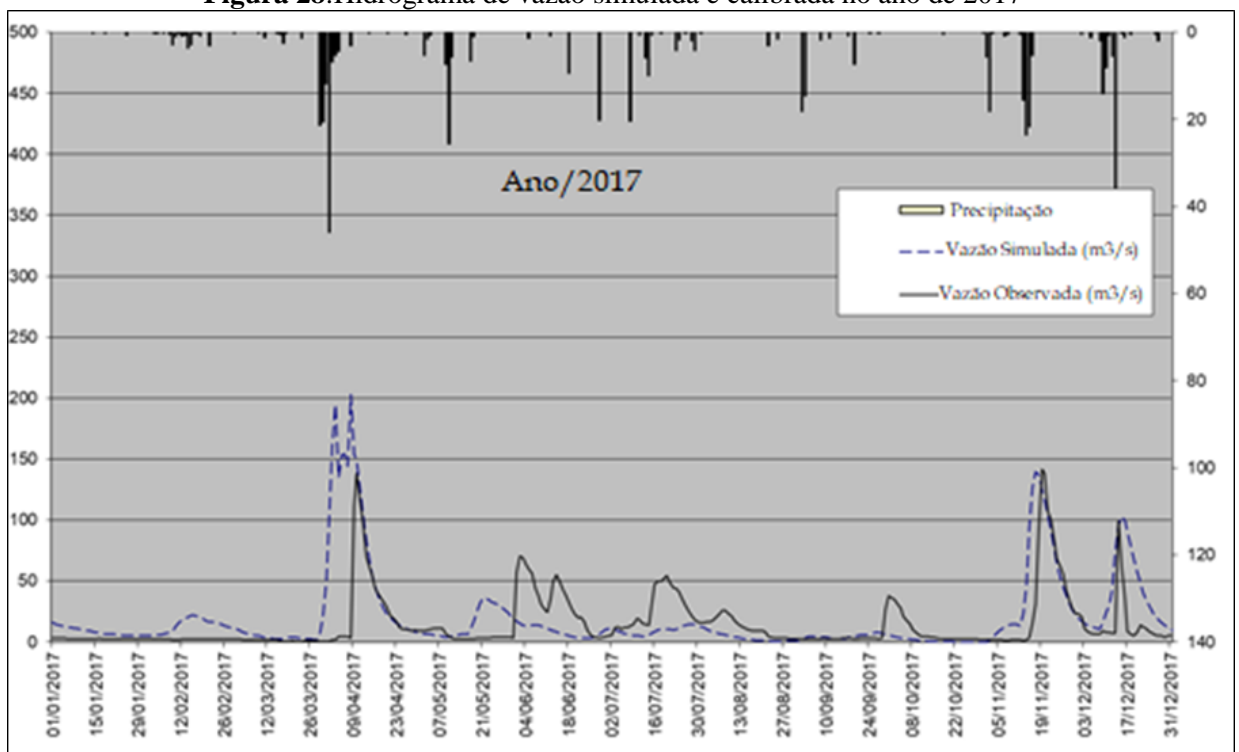
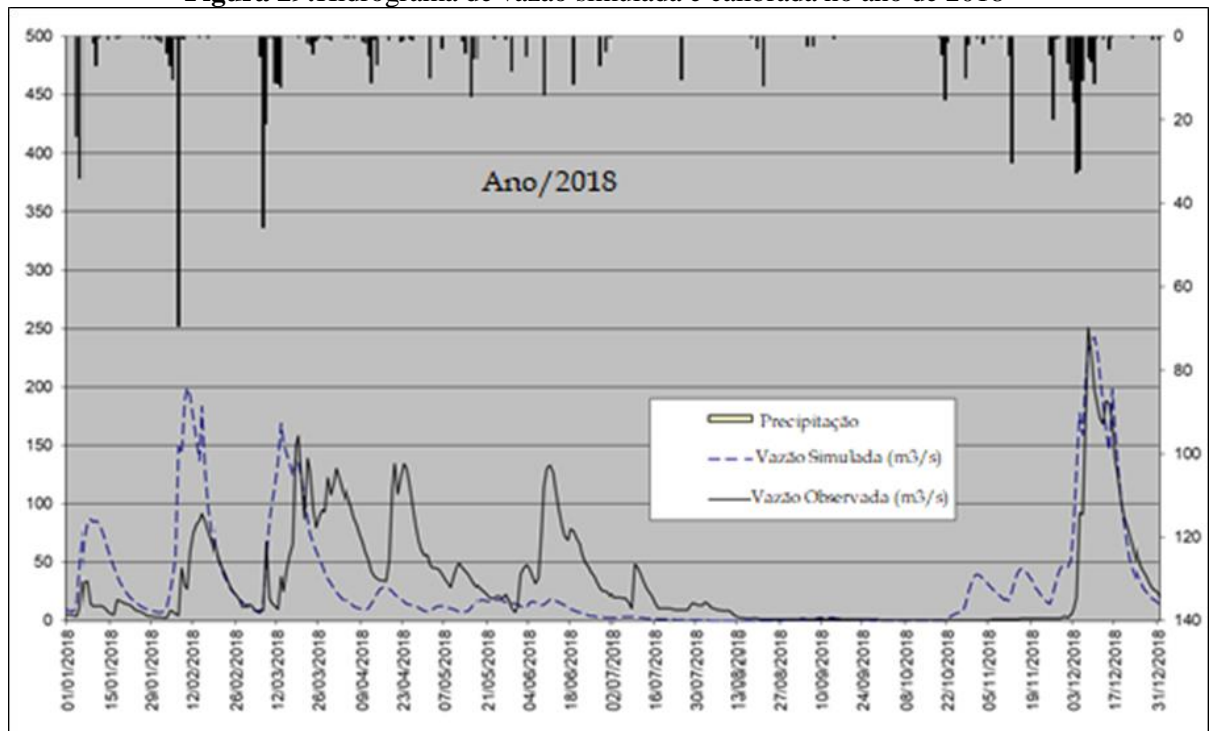
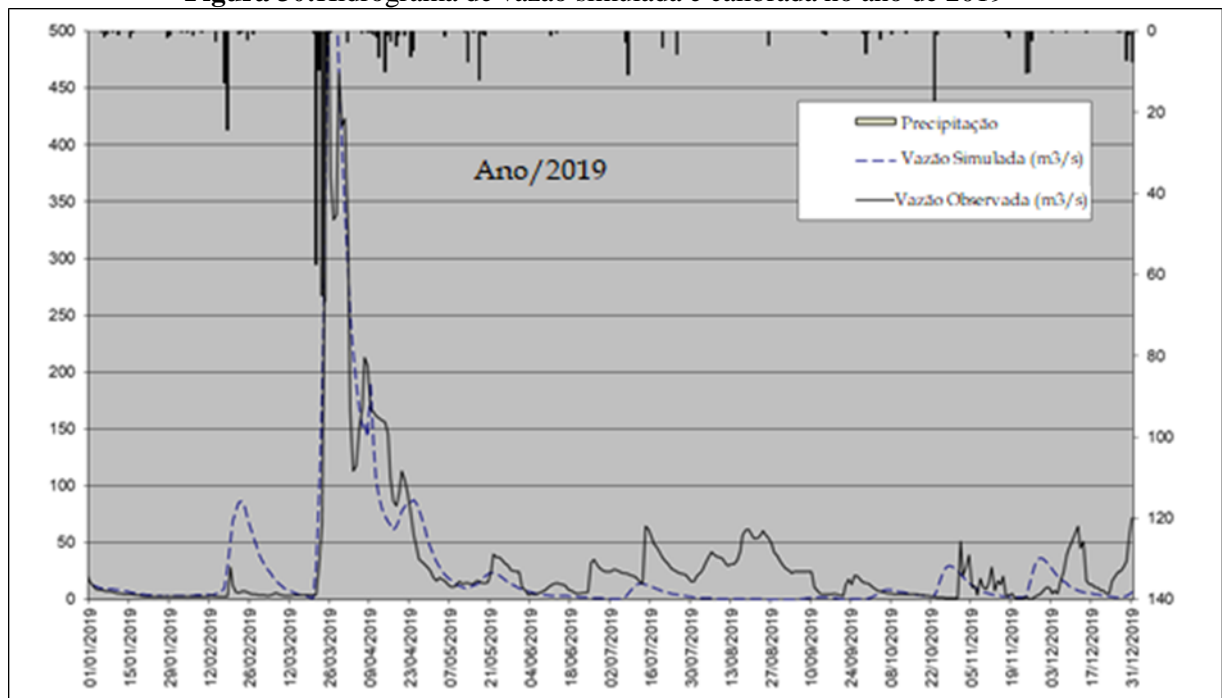


Figura 29: Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2018**Figura 30:** Hidrograma de vazão simulada e calibrada no ano de 2019

A partir da análise dos hidrogramas da vazão observada e simulada para os anos de 2015 a 2019, é possível perceber um comportamento semelhante entre a vazão simulada e a vazão observada, ficando evidente a relação entre o comportamento da vazão e os valores de precipitação. Conforme é ilustrado, de modo geral os picos de vazão ocorrem associados aos períodos mais chuvosos, e nos períodos mais secos a vazão apresenta valores menores e quase

nulos. É válido ressaltar que os anos de 2016 e 2018 foram considerados mais chuvosos e os anos de 2015, 2017 e 2019 menos chuvosos.

É possível perceber que de modo geral há um bom ajuste dos valores simulados e observados em todos os anos, porém é possível verificar que em alguns meses chuvosos o modelo superestimou os valores de vazão e em alguns meses secos o modelo subestimou os valores. Tal comportamento pode ter relação com a variação espacial e distribuição temporal das chuvas na bacia, que ocorre de forma irregular, o que é uma das principais características do clima da região, e também em razão da influência de diversos sistemas frontais na bacia.

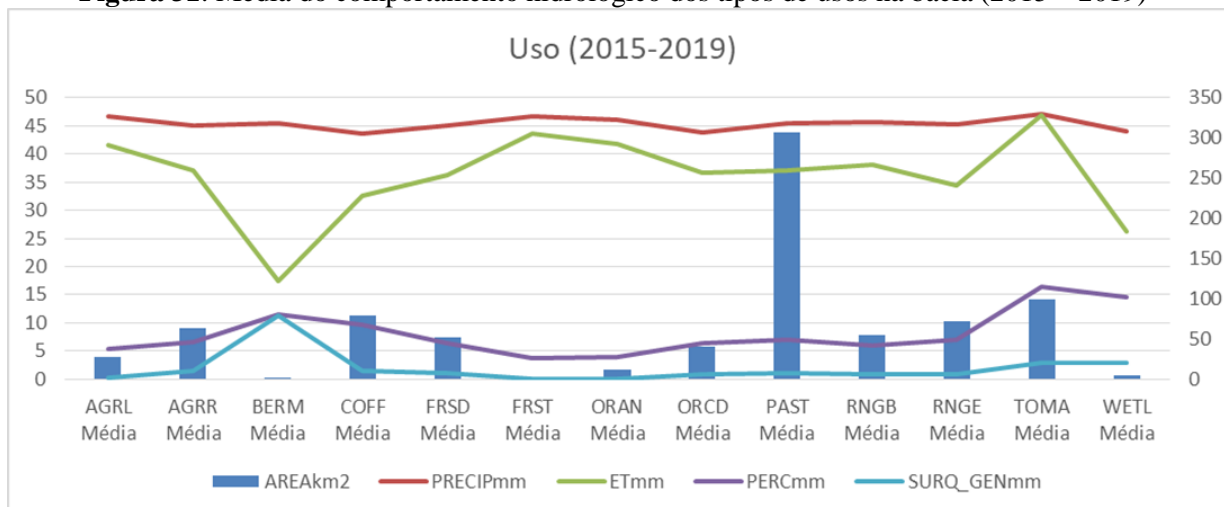
Esses fatores podem provocar algumas mudanças no padrão de precipitação, logo em alguns períodos o comportamento da precipitação pode ser diferente do esperado, a exemplo de valores menores do que é esperado nos meses chuvosos e valores maiores no período seco (chuvas concentradas). Alguns trabalhos realizados com o modelo SWAT que identificaram comportamento semelhante, ressaltam que um dos motivos para a má representação e distribuição dos picos de vazão podem estar associados a escassez de estações pluviométricas com dados de qualidade na área da bacia (Martins et al, 2020; Pereira et al.,2016; Viana et al., 2018).

Outro aspecto que foi observado na bacia do rio Paraguaçu, são os valores nulos de escoamento superficial nos meses mais secos e que podem ser observados através do comportamento da vazão nos hidrogramas. Tal comportamento também foi observado por Silva (2020) na região do bioma Caatinga. Isso está associado a solos arenosos e a necessidade de captação da precipitação pelas plantas, segundo a autora isso ocorre devido as características ambientais da área de estudo, como os tipos de solos, nível de compactação e principalmente as características da vegetação.

5.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO PARAGUAÇU- SÉRIE HISTÓRICA (2015-2019)

5.3.1 Comportamento Hidrológico em diferentes tipos de uso e solos

A partir da aplicação do modelo SWAT na Bacia do Rio Paraguaçu, foi feita a análise do comportamento hidrológico da bacia através dos principais componentes do balanço hídrico (precipitação, evapotranspiração, escoamento e infiltração) em relação aos diferentes tipos de uso (figura 31), solos (figura 32) e sua respectiva área, no período de cinco anos (2015 -2019).

Figura 31: Média do comportamento hidrológico dos tipos de usos na bacia (2015 – 2019)

Fonte: A autora.

Na figura 31 são apresentadas as estimativas do comportamento hidrológico em relação ao uso no período de 2015 a 2019. É possível observar na análise do gráfico a área (km²) ocupada por cada tipo de uso na bacia, podendo-se inferir que há um predomínio da pastagem ocupando maior parte da área (PAST-37,7 %), seguido do cultivo de tomate (TOMA - 12 %) e café (COFF-9,67%) na região do alto Paraguaiçu.

Em relação aos componentes do balanço hídrico pode-se observar as variações de acordo com o tipo de uso. A evapotranspiração (ET/mm) apresentou maiores valores associados as áreas de cultivo de tomate (TOMA) e menores valores associados a área urbana (BERM). A evapotranspiração é a perda de água em forma de vapor para a atmosfera, através dos processos de evaporação direta da superfície e transpiração das plantas. Esse processo é influenciado por características ligadas ao tipo e idade da vegetação, solo e clima da região. É através dela também que se estima a exigência de água pelas culturas para a irrigação agrícola.

O tomateiro é uma hortaliça exigente em água, no seu fruto maduro a água participa com 93% a 95% de sua constituição. O seu cultivo possui uma necessidade hídrica total de 300 a 600 mm de água após o transplante (EMBRAPA, 2003). Logo, os maiores valores de evapotranspiração associados as áreas de cultivo de tomate demonstram a demanda hídrica dessa cultura, tendo em vista que a evapotranspiração também é um indicativo do consumo de água pela cobertura vegetal.

Em relação a área urbana (BERM), nota-se que houve uma diminuição da evapotranspiração, que pode estar associada ao desmatamento e consequente impermeabilização dos solos urbanos, devido ao calçamento de ruas e construção de casas e

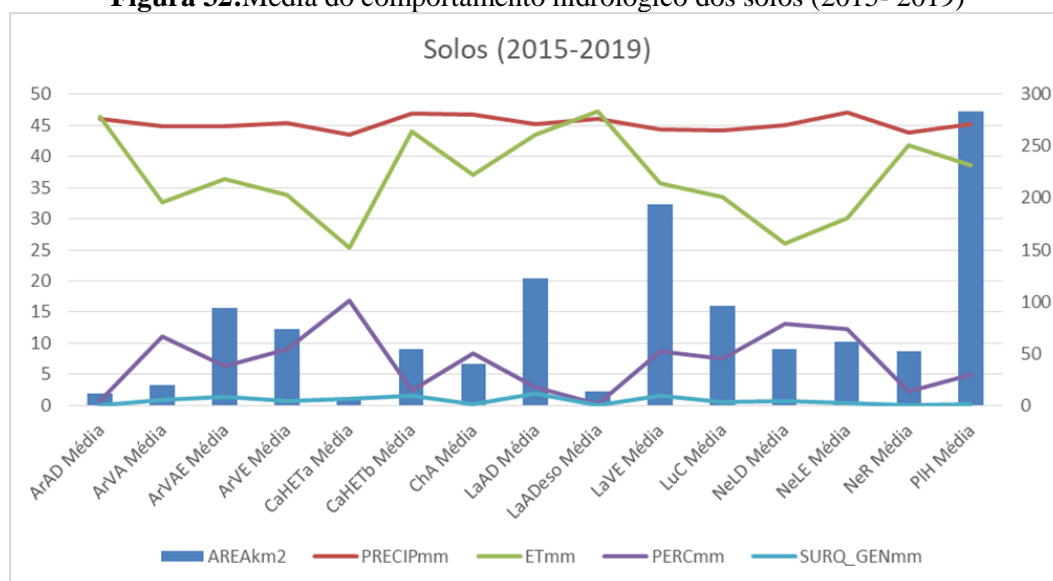
edifícios, o que conseqüentemente também aumenta o escoamento superficial, como é possível perceber no gráfico.

Outro aspecto interessante é observar a área ocupada pela pastagem (31,72%) e a área ocupada pelas florestas FRST (0,07%) e FRSD (6,47%) na bacia. Ao comparar os valores de evapotranspiração dos dois tipos de uso, podemos perceber que embora as áreas ocupadas pelas florestas sejam menores, a evapotranspiração é maior em relação as áreas de pastagem. O mesmo acontece com as áreas de vegetação de Caatinga (RNGB, 6,74%) e Cerrado (8,88%), que quando comparada com a pastagem apresentam uma área bem menor, porém valores de evapotranspiração semelhantes.

A evapotranspiração nas florestas normalmente é superior à da vegetação de menor porte, como no caso das gramíneas em áreas de pastagens. Nas estações úmidas, a evapotranspiração das florestas é maior em função do aumento do transporte do vapor d'água devido a superfície aerodinâmica mais rugosa de suas copas; e nas estações secas devido ao sistema radicular maior e melhor desenvolvido (Calder, 1998).

Em relação a pastagem, a maior perda para evapotranspiração na época úmida está associada a produtividade da gramínea. Porém, durante a estação seca é reduzida drasticamente sua área verde, devido à sensibilidade dos estômatos das gramíneas ao gradiente de pressão de vapor entre a superfície transpirante, logo a evapotranspiração diminui (Baruch & Fernandes, 1993). Além desses fatores, outro aspecto é a questão da degradação da pastagem, na maioria dos casos em razão da falta de manejo adequado e pisoteio do gado, aumentando problemas relacionados à compactação e erosão dos solos.

Na (figura 32) pode-se observar a média do comportamento hidrológico dos solos na bacia durante o período de 2015 a 2019. Através do gráfico pode-se observar que há um predomínio de Planossolos Háplicos (PIH-24,04%) na bacia, seguido de Latossolos Vermelhos eutróficos (LaVE-16,44%) e Latossolos Amarelos distróficos (LaAD-10,35%).

Figura 32:Média do comportamento hidrológico dos solos (2015- 2019)

Fonte: A autora.

Pode-se inferir que os valores de precipitação e escoamento apresentaram comportamento semelhante ao longo da série histórica, sendo maior a variação nos valores de evapotranspiração e de percolação em relação aos diferentes tipos de solos. De modo geral, o comportamento da evapotranspiração e percolação apresentaram valores inversamente proporcionais, ou seja, quando há um aumento nos valores de evapotranspiração ocorre uma diminuição nos valores de percolação e vice-versa, sendo possível observar essa tendência no gráfico.

O comportamento desses componentes no solo vai variar de acordo com as características tais como a textura, porosidade e estrutura, além de outros fatores como a declividade, cobertura e as condições climáticas. Sendo importante salientar que em regiões semiáridas do Nordeste a maior parte do fluxo de água do balanço hídrico está associado a evapotranspiração (Marengo, et al, 2007). Ainda segundo Miranda et al. (2017) na Caatinga 85,03% da água da chuva é evapotranspiração contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação, e apenas 0.41% para fluxo de base.

No que concerne aos solos, os Planossolos háplicos eutróficos (PIH) que ocupam maior área na bacia, possuem o horizonte superficial mais arenoso e o horizonte subsuperficial B plânico caracterizado por maior teor de argila, plasticidade e pegajosidade, tornando-se um horizonte extremamente duro (camada de impedimento). Tais condições acabam limitando a drenagem interna desses solos, principalmente quando em solos pouco profundos, criando um ambiente redutor sujeitos a períodos de encharcamento, alternados com períodos secos no ambiente semiárido. Os Planossolos estão associados em sua maioria a relevos planos,

apresentando profundidade de até 120 cm em alguns trechos, o que confere a esses solos maiores valores de evapotranspiração e percolação em relação ao escoamento.

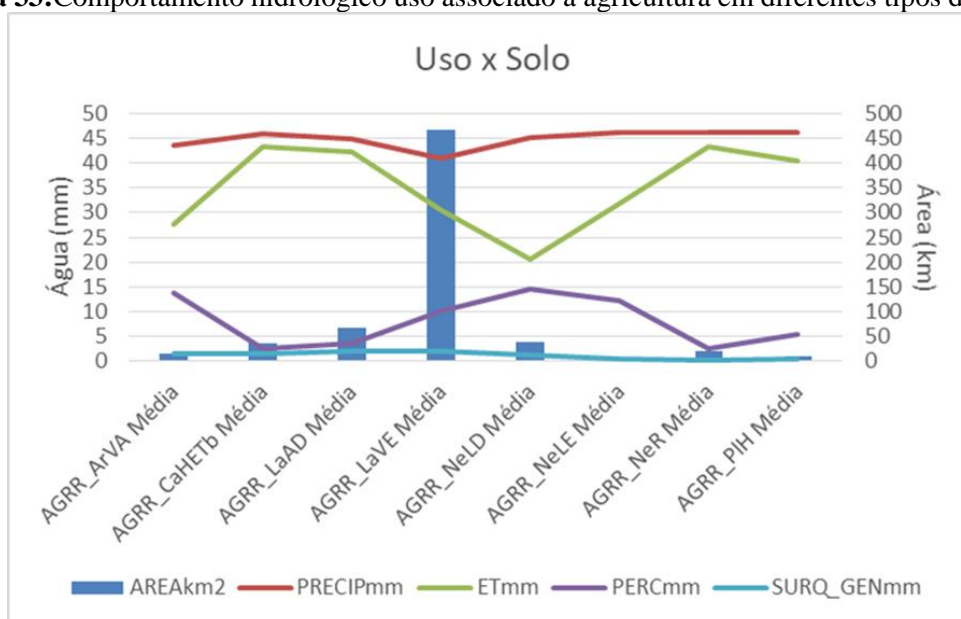
Os Latossolos vermelhos eutróficos (LaVE) que também ocupam grande área na bacia, são solos evoluídos, bem desenvolvidos, normalmente muito profundos que variam de fortemente a bem drenados. Na região da bacia esses solos estão associados ao relevo plano e suave ondulados de cobertura argilo-arenosa sobre calcário. São solos que possuem baixo potencial de escoamento e apresentam boa drenagem, conforme pode ser observado no gráfico.

Os valores de evapotranspiração nos Latossolos amarelos distróficos coesos (LaADeso) foram maiores que os de precipitação, e conseqüentemente os valores de percolação e escoamento foram quase nulos. Isso pode ter ocorrido em função da estrutura desses solos, de textura argilosa e muito argilosa, que apresentam horizonte subsuperficial coeso com grande volume de microporos e poucos macroporos, dificultando a drenagem e infiltração de água e aumentando os eventuais fluxos de ascensão capilar para as camadas superficiais, contribuindo assim para maiores valores de evapotranspiração.

Em relação a percolação é possível observar um pico associado aos Cambissolos Háplicos eutróficos com argila de alta atividade (CaHETa), solos de textura franco-argilosa, rasos a moderadamente profundos, bem drenados e que favorecem a infiltração de água, esses solos correspondem a área de substrato calcário do Grupo Una (Formação Bebedouro e Salitre).

5.3.2 Relação Uso x Solo

A partir dos dados foi feita análise dos diferentes tipos de uso associados aos solos, sendo possível dessa forma observar o comportamento dos componentes hidrológicos em cada um desses cenários. Nesse sentido, a figura 33 ilustra o comportamento dos componentes do balanço hídrico na bacia, em diferentes tipos de solos com o uso associado à agricultura.

Figura 33:Comportamento hidrológico uso associado a agricultura em diferentes tipos de solos

Fonte: A autora

De modo geral, devido a sua textura mais arenosa e reduzido volume de solo para enraizamento das plantas e retenção de umidade, os Neossolos litólicos apresentam limitações ao uso agrícola. No caso da bacia, esses Neossolos litólicos estão associados aos Latossolos amarelos distróficos, numa topossequência, sendo os Neossolos encontrados nas encostas em parte do relevo moderado a forte ondulado e os Latossolos nas áreas de sopé de relevo plano a suave ondulado.

Os Neossolos por serem solos mais arenosos apresentam maiores valores de infiltração de água, embora a capacidade de retenção seja baixa. No caso dos Neossolos Regolíticos, pode-se perceber que a infiltração de água foi menor e os valores de evapotranspiração foram maiores, isso ocorre porque esses Neossolos apresentam um horizonte fragipânico (horizonte endurecido em alguma parte do C) o que pode dificultar a infiltração de água e desenvolvimento de raízes. Segundo Cunha (2008) como a drenagem interna é menos acentuada, isso pode ser um ponto positivo na região semiárida, uma vez que favorece a presença de água no perfil do solo por mais tempo. Consequentemente a camada superficial tem mais água disponível para a evapotranspiração.

Pode-se também observar um pico de evapotranspiração associado ao Cambissolo Háplico Tb Eutrófico, solo que ocupa uma área de relevo plano e suave ondulado na região e possui seu uso associado ao cultivo de mandioca, feijão, milho e tomate. Os Cambissolos nessas condições de relevo, apresentam profundidade que variam de 50 a 100 cm e boas condições de drenagem, possuindo um bom potencial agrícola.

Os altos valores de evapotranspiração podem ter ligação com o consumo de água das culturas ali estabelecidas. Conforme disposto anteriormente, o tomate é uma cultura que tem grande demanda hídrica, um dos fatores que está intrinsecamente associado à evapotranspiração, uma vez que a quantidade de água necessária a uma cultura é equivalente à sua evapotranspiração.

Além disso, o milho é considerado uma cultura que demanda muita água, segundo Albuquerque e Rezende (2007) o milho de variedade de ciclo médio cultivado para a produção de grãos secos consome de 400 a 700 mm de água em seu ciclo completo, dependendo das condições climáticas.

Em relação ao feijão, sua demanda hídrica é influenciada por diversos fatores tais como local, época do plantio, condições edafoclimáticas e fase de desenvolvimento (Moreira et al, 1996), sendo que segundo Doorenbos & Kassam (1979), a quantidade de água requerida pela cultura, para obtenção de máxima produtividade, varia entre 300 e 500 mm.

Quando em comparação com as outras culturas, a mandioca apresenta boa tolerância à seca ou falta de água no solo, sendo essa uma das razões para ausência de dados que indiquem a demanda hídrica da cultura. Segundo Schwengber et al. (2005) a mandioca cresce e se desenvolve em regimes pluviométricos que variam de 500mm a 3000mm anuais.

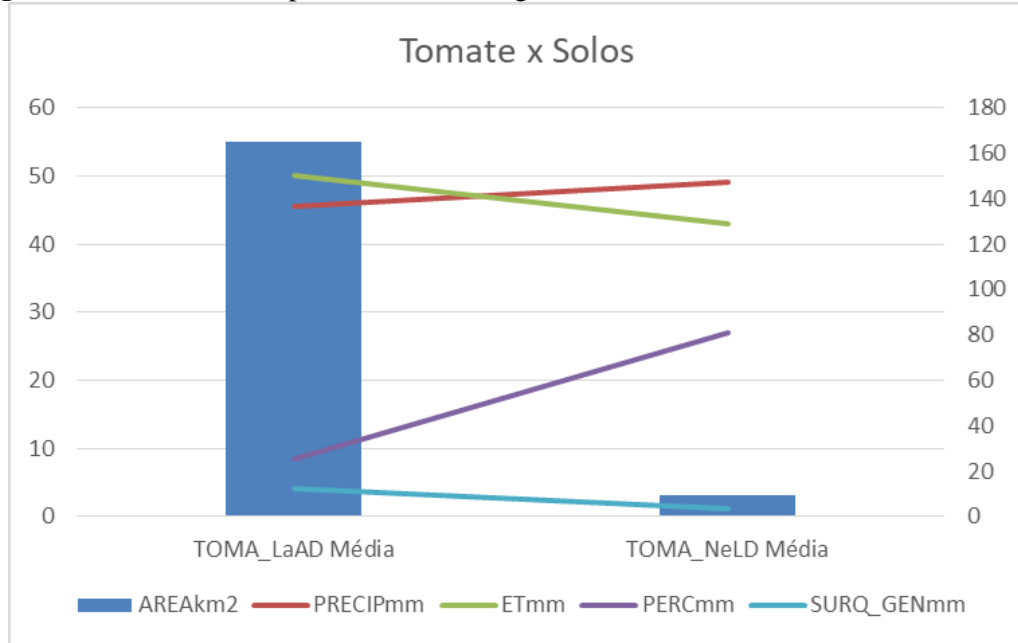
Os Latossolos Vermelho Eutrófico e Amarelo Distrófico, apresentam o mesmo tipo de cultivo agrícola: Mandioca, feijão, tomate e milho, culturas que possuem uma boa demanda hídrica. Embora o Latossolo vermelho ocupe uma área bem maior, a sua evapotranspiração é menor em relação ao Latossolo amarelo distrófico, isso pode ocorrer por causa da diferença textural desses solos.

O Latossolo amarelo possui textura argilosa, relevo plano e suave ondulado, o que torna esse solo mais suscetível a compactação, a depender das formas de manejo e uso de máquinas agrícolas, o que diminui a infiltração de água no solo e aumenta a água disponível para evapotranspiração e escoamento. Já os Latossolos vermelhos eutróficos apresentam textura média, com maior porcentagem de areia no perfil, o que acaba favorecendo a infiltração de água e menores valores de evapotranspiração em relação ao Latossolo Amarelo.

Os Argissolos Vermelhos Amarelos apresentam textura arenosa/média e média/argilosa, ocupam um relevo suave ondulado e ondulado e conseqüentemente acabam sendo solos mais suscetíveis a erosão. São eutróficos o que indica boas condições para enraizamento de raízes e nessa região são intermediários para Latossolos, o que confere a eles uma boa profundidade e drenagem ao longo do perfil, conforme pode ser observado no gráfico.

Em relação ao cultivo de tomate, a figura 34 ilustra o comportamento hidrológico dos dois tipos de solos da bacia associados a essa cultura.

Figura 34:Gráfico do comportamento hidrológico dos solos associados ao cultivo de tomate

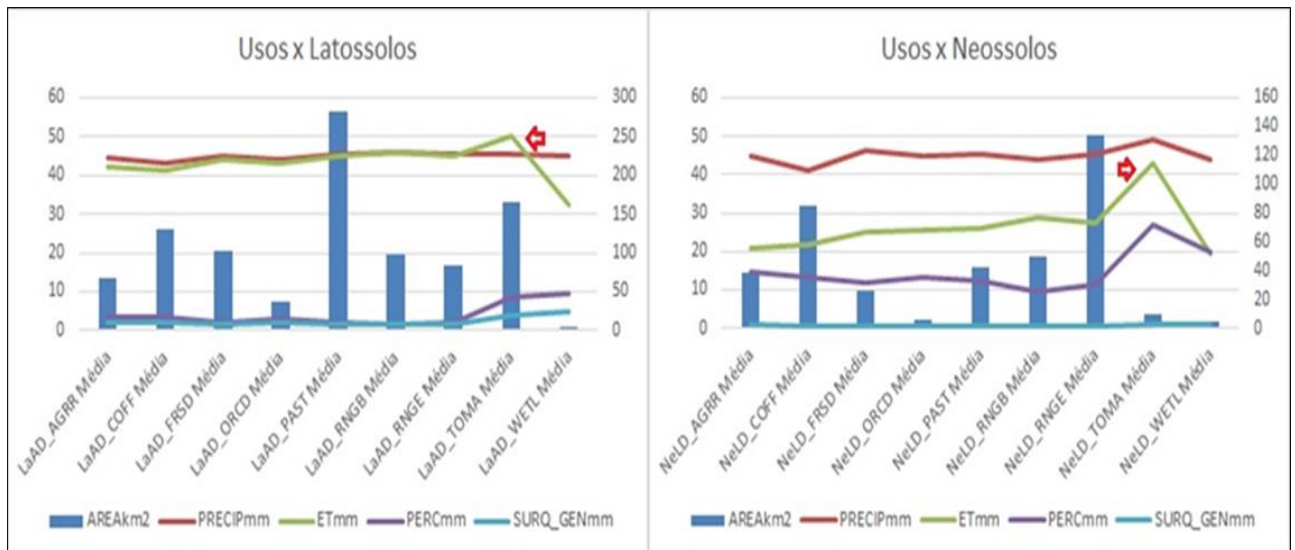


Fonte: A autora

Conforme disposto anteriormente, é perceptível a demanda hídrica do tomate através dos valores de evapotranspiração, tanto nos Latossolos amarelos que possuem maior área ocupada por essa cultura, como nos Neossolos que possuem área bem menor.

Em comparativo com todos os outros tipos de uso associados aos Latossolos e aos Neossolos na bacia, é possível ver a diferença em relação aos valores de evapotranspiração do tomate (figura 35).

Figura 35:Comportamento hidrológico dos diferentes tipos de usos nos Latossolos e Neossolos



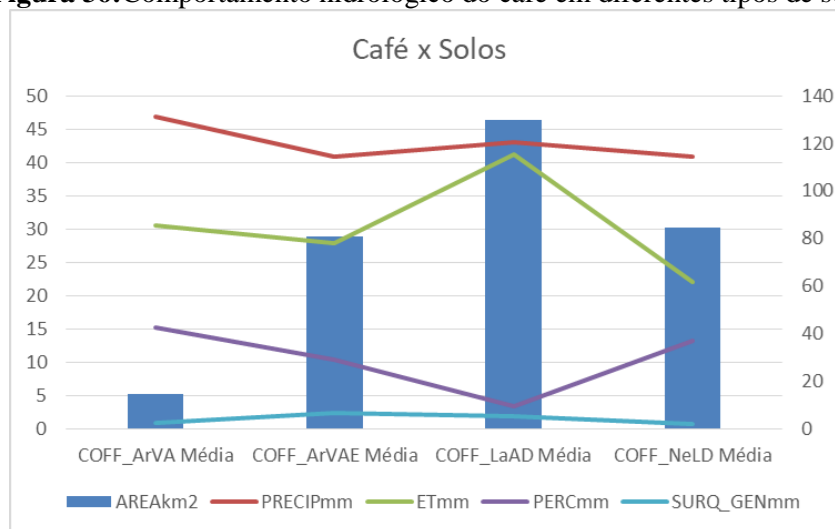
Fonte: A autora.

É importante salientar que os Latossolos amarelos distróficos da área da bacia, apresentam textura argilosa e muito argilosa, sendo descrito com alguns horizontes superficiais (profundidades 0-30 cm) com aspecto ligeiramente duro, pegajoso e plástico (Pronassolos, 2022).

Características que conferem a esses solos maior suscetibilidade a compactação quando é feito o manejo inadequado e principalmente quando esses possuem altos teores de areia fina (Cunha, 2008), como é o caso desses Latossolos. Tais fatores podem influenciar os menores valores de infiltração desses solos, e em contrapartida corroborar com os maiores valores de evapotranspiração e também aumento dos valores de escoamento.

Em relação ao cultivo de café na região da Chapada Diamantina, na parte central do estado da Bahia, pode-se observar na figura 36 o comportamento dos componentes hidrológicos nos diferentes tipos de solos.

Figura 36: Comportamento hidrológico do café em diferentes tipos de solo



Fonte: A autora.

Segundo Bernardo (2002) a demanda hídrica do café em condições normais de desenvolvimento encontra-se em torno de 800 a 1200 mm/ciclo de produção. A Chapada Diamantina apresenta a altitude mais elevada da Caatinga variando entre 200 m a 1.800 m e condições de clima específicos característicos do efeito orográfico na região, que favorecem o plantio de cafés, apresentando valores de precipitação que variam de 1100 mm a 1200 mm anuais (Oliveira e Silva, 2017).

A maior parte da área de cultivo do café é realizada em Latossolos amarelos distróficos, seguidos de Neossolos e Argissolos, conforme pode ser observado na figura. A drenagem interna dos Argissolos varia muito de acordo com o gradiente textural de moderamente a forte

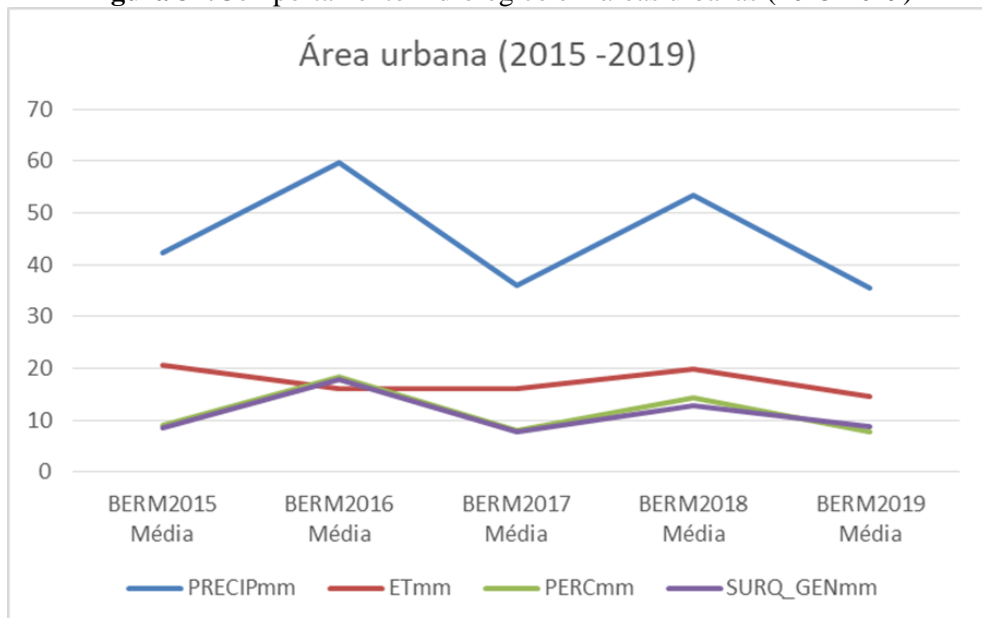
drenados, os argissolos vermelhos amarelos eutróficos dessa área apresentam textura arenosa/média e média argilosa (Pronossolos, 2022) o que indica que possuem um horizonte superficial mais arenoso e conseqüentemente maior capacidade de infiltração/drenagem de água e também suscetibilidade a erosão.

Os valores de precipitação, evapotranspiração e infiltração foram maiores nos Argissolos Vermelho Amarelos distróficos (ArVA) do que nos Argissolos Vermelhos Amarelos eutróficos (ArVAE) que ocupam uma área bem maior. Isso pode ter ocorrido em função da diferença de relevo, os cultivos de café nos Argissolos amarelos distróficos estão localizados nas áreas mais altas de relevo ondulado e forte ondulado (declividade 15-99%), ponto situado a barlavento, fator que influencia no volume de precipitação e conseqüentemente na evapotranspiração.

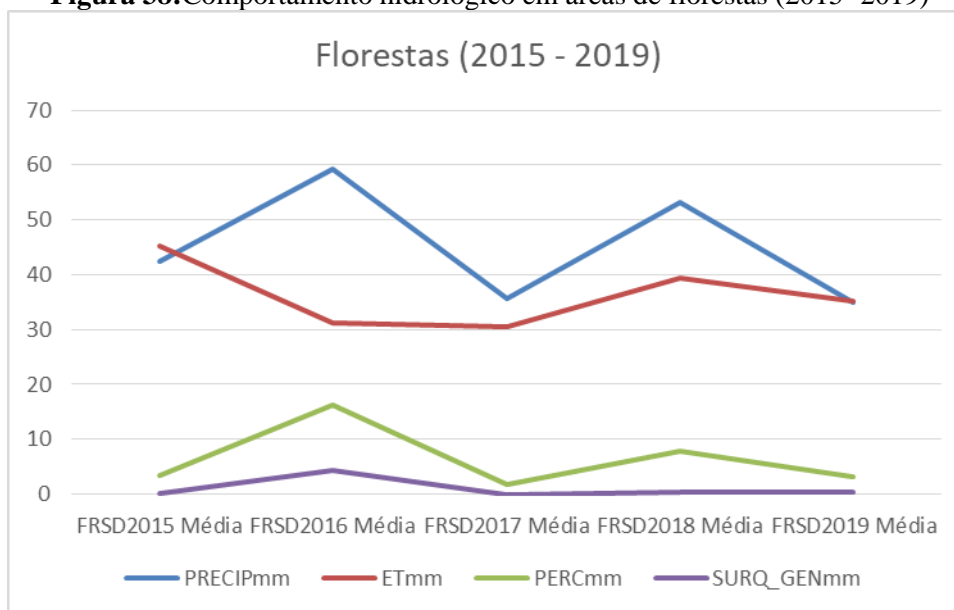
5.3.3 Relação Uso x 5 anos

Através da análise do comportamento hidrológico em diferentes tipos de usos entre os anos de 2015 a 2019, foi possível perceber que de modo geral os gráficos mostram comportamentos semelhantes sem alterações significativas. Todavia é importante ressaltar as diferenças entre os valores de evapotranspiração, escoamento e infiltração nos usos associados as florestas e área urbana (figura 37).

Figura 37: Comportamento hidrológico em áreas urbanas (2015-2019)



Fonte: A autora

Figura 38:Comportamento hidrológico em áreas de florestas (2015- 2019)

Fonte: A autora

Conforme disposto os anos de 2016 e 2018 foram considerados mais chuvosos e os anos de 2015, 2017 e 2019 os anos menos chuvosos. A partir dos gráficos é possível perceber a diferença de comportamento da evapotranspiração e escoamento na bacia nas áreas de florestas e nas áreas urbanas.

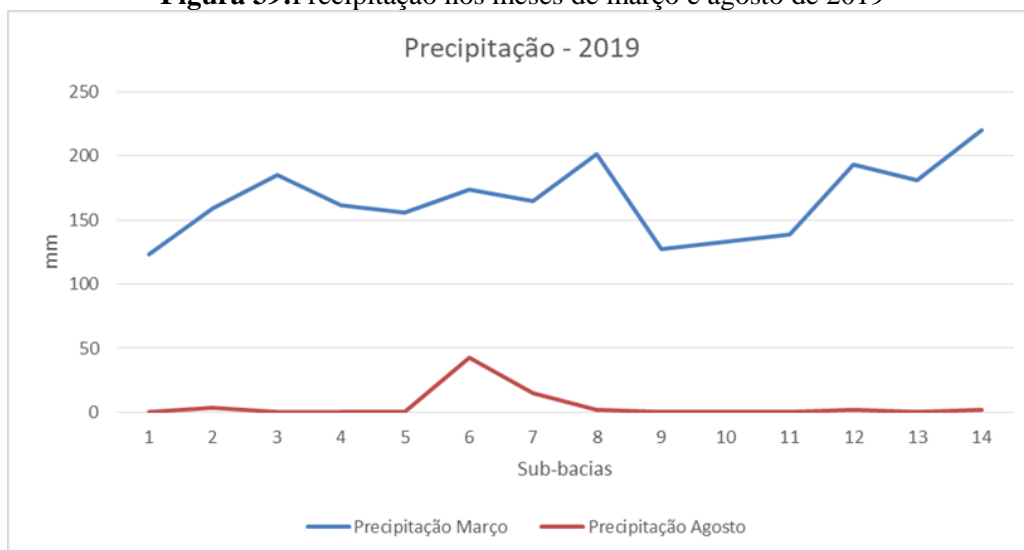
As florestas apresentaram maiores valores de evapotranspiração (30 mm a 45mm) e percolação (1,83 mm a 16 mm), e conseqüentemente menores valores de escoamento (0,01 mm a 4 mm). Já a área urbana apresentou menores valores de evapotranspiração (14 mm a 20 mm) e maiores valores de escoamento (8 mm a 17 mm).

Esse comportamento hidrológico evidencia a maior capacidade de evapotranspiração da floresta de maior porte em relação a uma área desmatada ou urbanizada. Tais dados podem ser indicativos dos impactos ocasionados pela mudança na cobertura e uso da terra no regime hidrológico das bacias hidrográficas.

5.4 COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO NO ANO DE 2019: MESES DE MARÇO E AGOSTO

Com base nos dados foi realizada a análise de variabilidade do comportamento hidrológico da bacia entre os meses de março e agosto, respectivamente entre o mês mais chuvoso e o mês menos chuvoso do ano de 2019 na bacia do Rio Paraguaçu.

Verificou-se o comportamento de cada tipo de uso e de cada uma das sub-bacias em relação aos valores de evapotranspiração, escoamento e infiltração (figura 39).

Figura 39: Precipitação nos meses de março e agosto de 2019

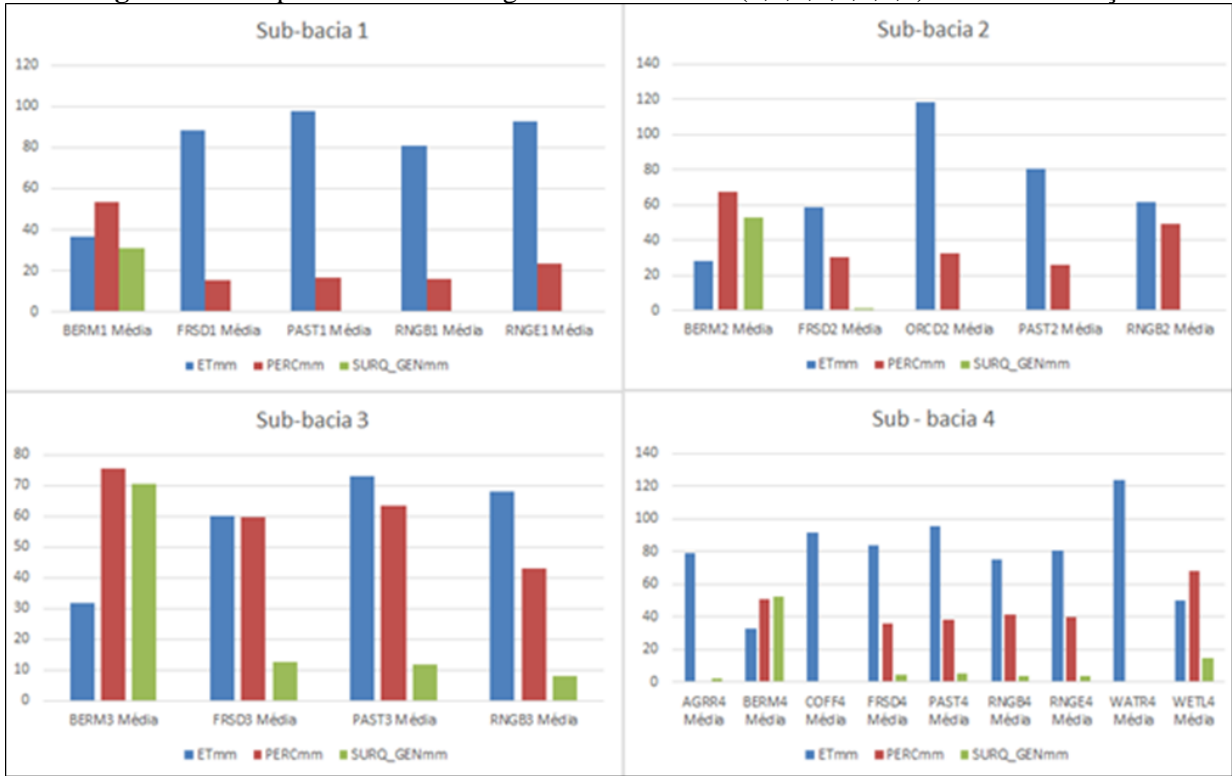
Fonte: A autora

5.4.1 Comportamento hidrológico no mês março (2019)

De modo geral, ao observar os gráficos (figuras 40,41,42 e 43) que apresentam a variação dos valores dos componentes hidrológicos no mês de março, considerado o período mais chuvoso do ano de 2019, pode-se perceber que em todas as sub-bacias os valores de evapotranspiração foram elevados, apresentando variações de acordo com o tipo de uso, chegando até 138 mm. Tais valores demonstram a relação direta entre o regime pluviométrico e a evapotranspiração da bacia, conforme também é observado em estudos realizados com modelos hidrológicos em bacias localizadas no clima semiárido (Silva, 2020; Félix e Paz, 2016; Brito et al.,2021).

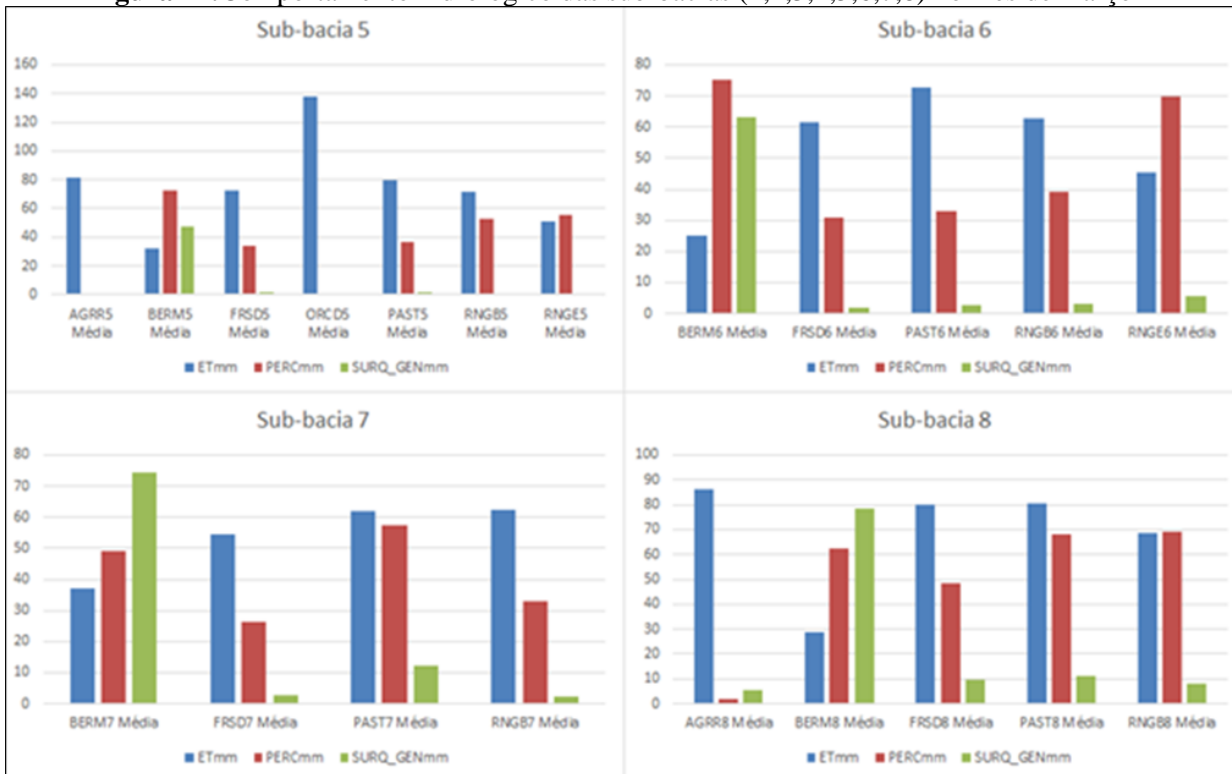
Os menores valores de evapotranspiração nesse período correspondem as áreas de uso associadas ao urbano. As áreas urbanas (BERM) apresentaram valores de evapotranspiração que variaram entre 25 mm e 47 mm, valores considerados menores em relação aos demais tipos de uso como pastagem, agricultura e florestas. Conforme ressalta Tucci (1997) devido à substituição da cobertura natural ocorre uma redução da evapotranspiração, já que a superfície urbana não retém água como a cobertura vegetal e não permite a evapotranspiração das folhagens e do solo.

Figura 40:Comportamento hidrológico das sub-bacias (1,2,3,4,5,6,7,8) no mês de março



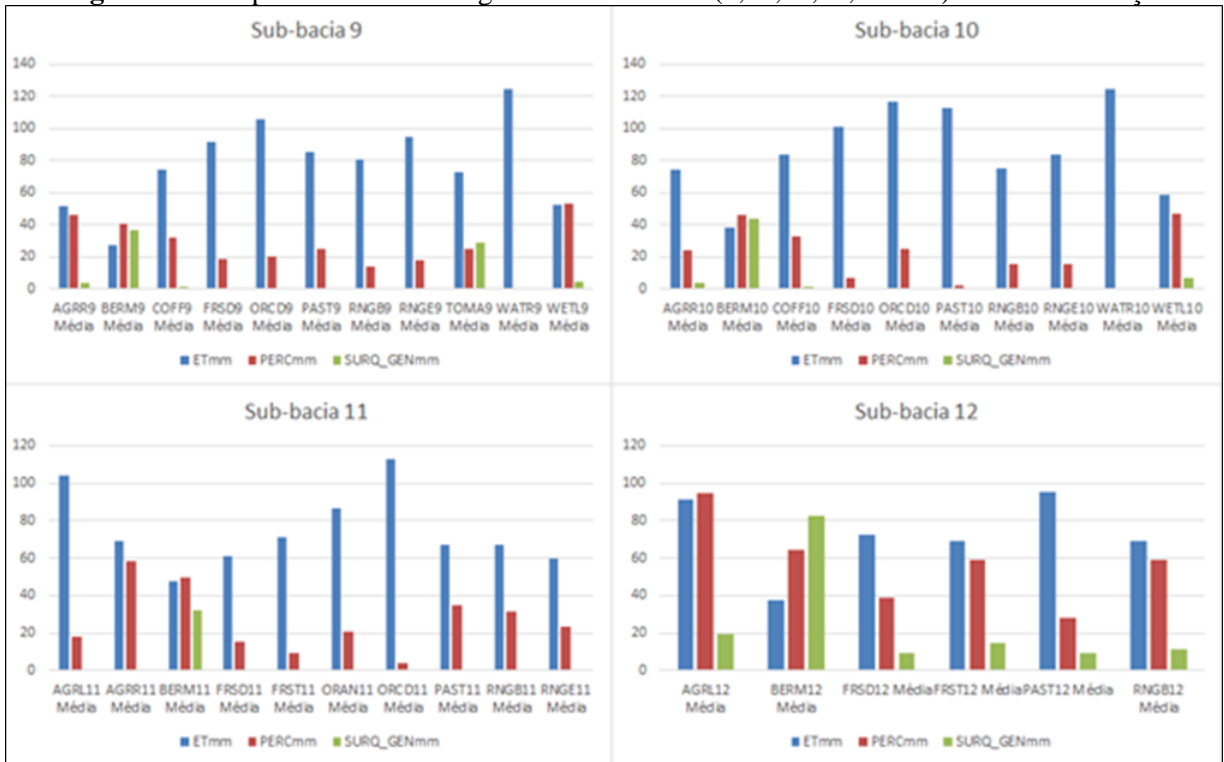
Fonte: A autora

Figura 41:Comportamento hidrológico das sub-bacias (1,2,3,4,5,6,7,8) no mês de março



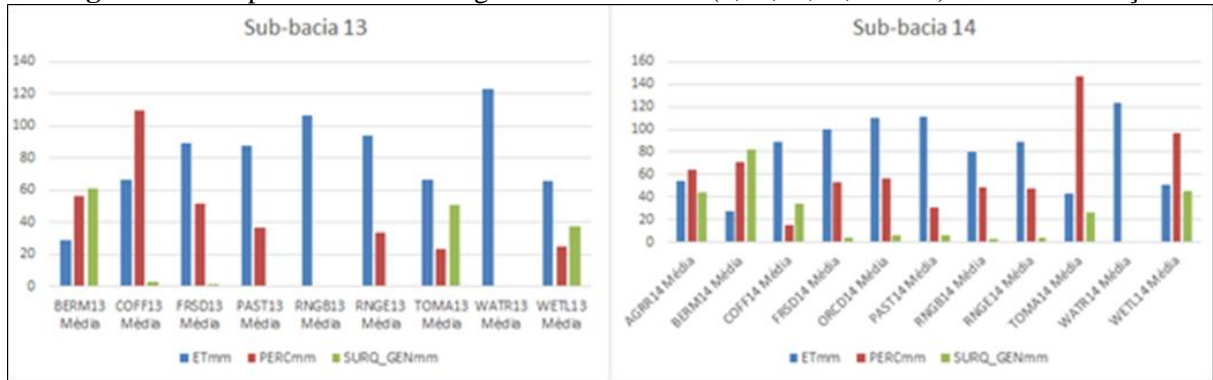
Fonte: A autora

Figura 42:Comportamento hidrológico das sub-bacias (9,10,11,12,13 e 14) no mês de março



Fonte: A autora

Figura 43:Comportamento hidrológico das sub-bacias (9,10,11,12,13 e 14) no mês de março.



Fonte: A autora

Os maiores valores de evapotranspiração durante esse período foram apresentados pelos seguintes usos: Pastagem, pomar, caatinga, florestas, agricultura (cultivo em fileiras) e cerrado.

Nas sub-bacias 1,3,4,6,12 e 14 os maiores valores estão associados ao uso da terra com pastagem, que conforme disposto ocupa a maior área de toda a bacia (37,7%). Normalmente é esperado que a cobertura vegetal original e de maior porte transpire e intercepte mais água no dossel que a vegetação rasteira, em função de suas raízes mais profundas e também em razão da superfície rugosa de suas copas (Calder, 1998; Bacelar, 2005), porém é preciso considerar que a área ocupada pelas pastagens é proporcionalmente maior em relação as áreas das florestas, caatinga e cerrado, o que pode ter contribuído com esses valores, além de outros aspectos como

o tipo do solo (condutividade hidráulica), densidade da vegetação e degradação. Além disso, avaliando a evapotranspiração em uma área de Cerrado e Pastagem, no leste de Brasília, Silva et al., (2003) identificaram uma maior perda de água via evapotranspiração para atmosfera pela pastagem (*Brachiaria*) em épocas de chuvas, os autores associaram esses valores a eficiência de produtividade dessas gramíneas principalmente nas camadas superiores do solo durante o período chuvoso. A *Brachiaria* é o tipo de gramínea predominante na pastagem da bacia do rio Paraguaçu.

Nas sub-bacias 2,5,9, 10 e 11 os maiores valores de evapotranspiração estão relacionados as áreas de uso de pomares (ORCD) regiões em que ocorre a produção de frutas em cultivo irrigado. A sub-bacia 5 apresentou valor de evapotranspiração de 138 mm, relacionado as áreas onde ocorrem o cultivo irrigado de abacaxi, banana e mamão com a água captada do rio Utinga. Em trabalho realizado com SWAT em uma bacia do Bioma Caatinga, Silva (2020) encontrou valores elevados de evapotranspiração nas áreas de agricultura irrigada. Segundo a autora, nas rotinas do modelo SWAT, a quantidade de água necessária para a transpiração das plantas é fornecida de acordo com a quantidade de água presente no solo e nas áreas irrigadas as águas são captadas para suprir as demandas das plantações.

Nesse sentido as áreas irrigadas tendem a apresentar valores elevados de evapotranspiração, como é o caso da sub-bacia 8, onde os maiores valores de evapotranspiração (86,71 mm) ocorreram numa área de agricultura de cultivo em fileiras (AGRR), onde também é feita a captação da água do rio Paraguaçu para a irrigação.

Logo as áreas de uso agrícola (ORCD, AGRR, AGRL, COFF, TOMA) em todas as sub-bacias apresentaram valores altos de evapotranspiração, que podem estar relacionados as áreas de irrigação existentes, ou também ao tipo de cultura, conforme discutido anteriormente, a exemplo da grande demanda hídrica do tomate.

Nas sub-bacias 7 e 13 os maiores valores de evapotranspiração estão presentes na área de vegetação de Caatinga (62,46 mm; 106,2mm), que é típica do semiárido e costuma apresentar altos de evapotranspiração, principalmente nos períodos chuvosos, quando a disponibilidade de água no solo é maior.

Outro fator que influencia nos diferentes valores de evapotranspiração são os tipos de solos, suas profundidades e características físico-hídricas relacionadas principalmente a textura, porosidade e densidade, que influenciam na umidade e retenção de água, uma vez que a evapotranspiração é diretamente proporcional a água armazenada no solo (Zhang et al. ,2004; Silva, 2020).

Em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, o fluxo de água nos ambientes é bem maior nos períodos chuvosos, conseqüentemente isso reflete nos componentes hidrológicos do solo, a exemplo dos valores de escoamento superficial. Nesse período é que ocorre grande parte da recarga hidrológica dos canais e também os processos erosivos nas encostas através do escoamento superficial, através de uma dinâmica hidrológica e sedimentológica diferente dos ambientes úmidos e de saturação do solo (Souza e Corrêa, 2019).

Conforme evidenciam os gráficos, em todas as sub-bacias no período chuvoso (março) o escoamento superficial (SURQ_GEN) também foi mais acentuado, sendo maiores os valores de escoamento associados principalmente as áreas urbanas (30 mm a 82 mm). Em algumas sub-bacias o escoamento superficial só ocorreu nas áreas urbanas, apresentando valores quase nulos em outros tipos de uso (sub-bacias 1, 2 e 11).

Além das áreas urbanas, os valores de escoamento ocorreram em proporções bem menores associados a pastagem, caatinga, cerrado e florestas. Esses valores de escoamento podem ter relação com a declividade, tipo de solo (profundidade/textura) ou também com a densidade da vegetação.

A densidade da vegetação influencia na interceptação da água da chuva, sendo maior a capacidade de interceptação nas áreas com vegetação mais densa e conseqüentemente menor onde a vegetação é mais esparsa, o que acarreta maiores valores de escoamento, principalmente nesse período em que as chuvas são mais intensas e concentradas. Trabalhos realizados com o modelo SWAT no semiárido, evidenciaram maiores valores de escoamento superficial associados as áreas de menor densidade da caatinga (Silva, 2020; Miranda et al. (2017)).

É válido destacar que dentre os fatores relacionados com o escoamento, segundo Souza e Corrêa (2019) a vegetação é o mais sensível, por ser o mais passível de sofrer modificações naturais e principalmente antrópicas. Logo, acaba influenciando diretamente no escoamento superficial, sendo que segundo os autores essa é uma variável modificante do escoamento principalmente na escala do tempo histórico.

A sub-bacia 13 apresentou um alto valor de escoamento associado as áreas de cultivo de tomate (50mm). As áreas de cultivo da sub-bacia 13 corresponde ao Agropolo Ibicoara-Mucugê que concentra grandes produções agrícolas na região com o uso de irrigação por aspersão por meio de pivôs centrais (Figura 44).

Figura 44: Pivôs centrais do Agropolo Ibicoara Mucugê na sub-bacia 13



Fonte: Google Maps (2021)

Segundo Tolentino (2022) o maior problema desse tipo de irrigação é a alta intensidade de aplicação na extremidade do pivô, que pode acabar ocasionando escoamento superficial indesejado. Além disso, Brito et al. (2021) encontraram maiores valores de escoamento nas áreas de agropecuária da bacia do Pontal em Pernambuco, segundo os autores esses valores podem ter como causa o fato do solo já estar contido com a quantidade necessária de água vinda da irrigação, a pouca vegetação ou falta dela. Logo, infere-se que esses altos valores de escoamento podem também estar associados a algum desses fatores.

No que tange a percolação da água no solo, são vários os fatores que influenciam esse processo, dentre os quais pode-se destacar: o tipo de solo, a disponibilidade de água, o tipo de relevo, o uso e cobertura e a saturação do solo. Segundo Brady e Weil (2013) tanto o fluxo saturado como o fluxo não saturado são responsáveis pela percolação da água ao longo do perfil. Sendo o fluxo saturado ligado ao período de chuvas intensas ou irrigação e que ocorre associado a gravidade, e o fluxo não saturado associado principalmente as chuvas finas, onde ocorre a atração da água para os poros menores através das forças matriciais.

É possível observar que os mesmos fatores que influenciam a infiltração/percolação da água no solo também influenciam os outros componentes hidrológicos, como o escoamento superficial. Segundo Spohr et al. (2009) de modo geral, sob uma intensidade de chuva constante, a infiltração e o escoamento superficial são processos antagônicos: à medida que um diminui (infiltração) o outro aumenta (escoamento), até atingirem certo equilíbrio dinâmico.

Conforme mostram os gráficos os valores de percolação (PERC) também foram maiores no período chuvoso, visto que dentre outros fatores supracitados, a disponibilidade de água é

primordial para que o fluxo interno descendente no perfil do solo ocorra. Os valores de percolação na bacia do Rio Paraguaçu variaram 2,5 mm a 146,9 mm.

O maior valor de percolação (146,9 mm) ocorreu na sub-bacia 14 associado ao cultivo de tomate, área de irrigação, cujos tipos de solos são os Neossolos. Os Neossolos litólicos são solos rasos, com maior porcentagem de areia, que possuem boa drenagem e baixa capacidade de retenção de água. Nessa área os Neossolos possuem textura franco areno argilosa, o que faz com que a porosidade e retenção de água seja um pouco maior, todavia ainda é muito baixa em relação à proporção areia e argila. Nesse caso, os valores de percolação altos podem estar associados a baixa capacidade de armazenamento de água desses solos, como a retenção é menor e a água disponível excede essa capacidade (período chuvoso + irrigação), pode estar ocorrendo uma perda de água por percolação profunda abaixo da zona da raiz, ou seja, tem mais água disponível do que o solo é capaz de armazenar, segundo o SENAR (2019) isso pode ocorrer caso a quantidade de água aplicada no solo seja maior que a sua capacidade de retenção. Outro aspecto importante relacionado a esse ponto, é que se trata de uma área de domínio geológico de aquíferos fissurais e cársticos, onde destaca-se a elevada permeabilidade superficial dos carstes que promove interação entre as águas superficiais e subterrâneas (Guimarães et al., 2020) podendo ser essa também a causa dos altos valores de percolação na área.

Nas sub-bacias 1,2,3,5 e 6, os maiores valores de percolação estão relacionados a área urbana, respectivamente (53,31mm;67,50mm;75,55mm;72,35mm;72,27mm) o que difere do que normalmente é esperado, visto que geralmente nas áreas urbanas são encontrados os menores valores de infiltração/percolação devido a impermeabilização dos solos. É importante destacar que essas mesmas sub-bacias apresentaram os menores valores de evapotranspiração e altos valores de escoamento na área urbana (30,84mm;53,20mm; 70,80 mm; 47,46mm;63,09mm).

Nas sub-bacias 4,9 e 10, os maiores valores de percolação estão associados as áreas de brejo, locais de ambientes úmidos, saturados, alimentados pelos fluxos dos rios, onde o potencial de infiltração de água no solo é facilmente atingido, principalmente nos períodos chuvosos.

Nas sub-bacias 11, 12, 13 e 14, os maiores valores de percolação estão relacionados as áreas de agricultura (fileira e cultivos variados), café e tomate, conforme discutido anteriormente, essas áreas são irrigadas sobre solos que favorecem a drenagem de água. Na sub-bacia 11, os cultivos em fileira ocorrem sobre Neossolos e Planossolos em área de relevos planos. Na sub-bacia 12, a agricultura ocorre nas margens do rio, em áreas úmidas, associadas

a Chernossolos de textura média a argilosa. Na sub-bacia 13, o cultivo de café, ocorre no entorno do rio, em áreas de Argissolos, com textura arenosa e média argilosa, sobre embasamento cárstico, assim como o cultivo de tomate da sub-bacia 14.

Na sub-bacia 7, o maior valor de percolação ocorre associado a pastagem (57,38mm), que ocupa maior parte da área da sub-bacia (96,12 %), seguido da Caatinga com valores de percolação de 33,05 mm, que ocupa uma área correspondente a 3,37% da sub-bacia. Esses valores podem ser explicados pela área que a pastagem ocupa, que abrange praticamente toda a sub-bacia, associada ao relevo suave ondulado e plano, e solos com textura arenosa e média. As áreas de caatinga ocupam proporções bem menores e estão sobre relevo ondulado, o que dificulta a infiltração de água. Além dos aspectos citados anteriormente, outro motivo que pode ter contribuído com menor percolação na Caatinga pode ser a interceptação da água chuva por parte da vegetação.

Estudos realizados em bacias localizadas na área da Caatinga identificaram valores expressivos de perda por interceptação de parte do total precipitado (Alves, 2015; Medeiros et al, 2009; Marin e Menezes, 2008). Ainda assim, a área de Caatinga apresentou menores valores de escoamento, o que pode ter relação com a densidade, porte da vegetação e retenção de água em relação a pastagem.

Na sub-bacia 8, os valores de percolação da Caatinga e da Pastagem foram bem próximos, respectivamente 69,05 mm e 68,14 mm. Sendo que a pastagem ocupa uma área da sub-bacia que corresponde a 71,41% e a caatinga 16,03%. A pastagem ocupa maior área de Argissolos, que possuem maior capacidade de retenção de água, e a caatinga ocupa área de Neossolos, que possuem melhor drenagem.

Em trabalhos realizados com SWAT por Melo e Montenegro (2015) e Chagas et al. (2022) em uma mesma bacia do semiárido pernambucano, os autores identificaram maiores valores de umidade do solo no período chuvoso, em áreas de pastagem associadas a Argissolos quando comparadas as áreas de vegetação de Caatinga associadas a Neossolos, o que evidencia a influência dos solos argilosos na retenção de umidade quando comparado com os solos arenosos, conforme destacam os autores.

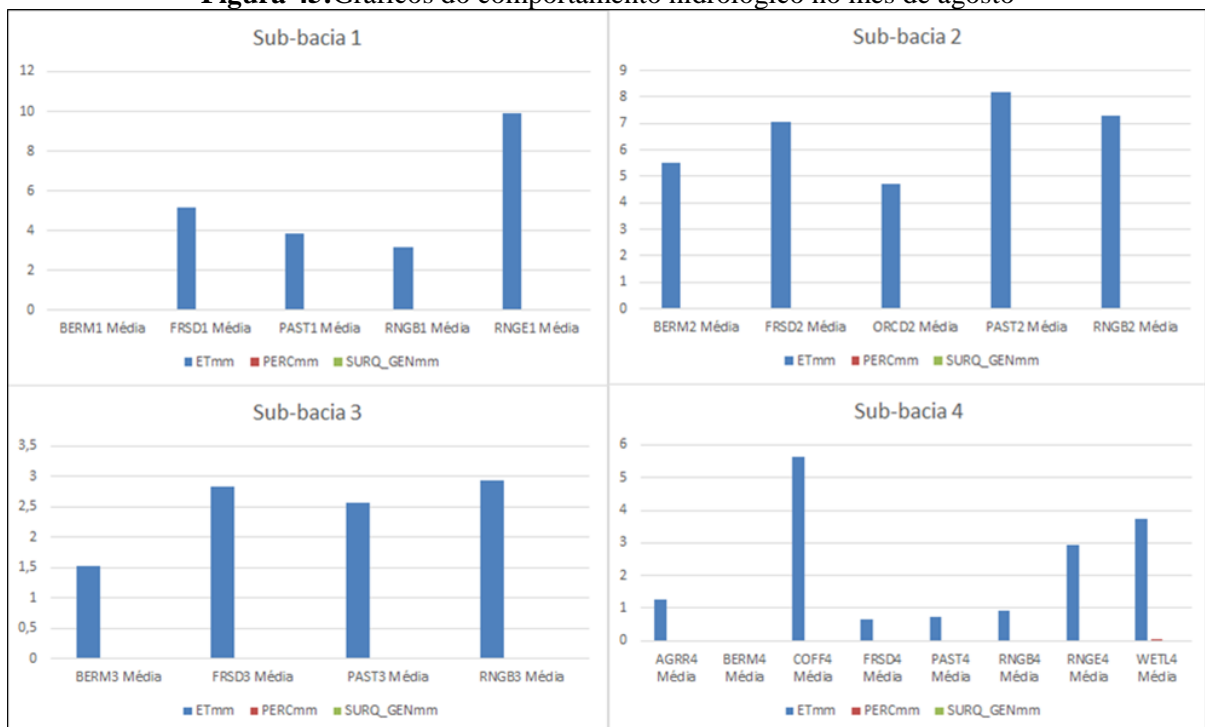
5.4.2 Comportamento hidrológico no mês de agosto 2019

A partir da análise dos gráficos que mostram o comportamento dos componentes hidrológicos das sub-bacias do Rio Paraguaçu no mês de agosto, considerado o mês menos chuvoso do ano de 2019, é possível perceber que em quase todas as sub-bacias os valores de

escoamento e percolação foram nulos (figura 45,46,47 e 48). Isso reflete a relação direta entre os componentes do balanço hídrico no solo e a precipitação, o quanto a variação climática influencia no regime hidrológico da bacia e principalmente a relação de todos os outros fatores nesse processo, tais como os tipos de solos, a vegetação, o tipo de cobertura e uso e a importância da manutenção de um bom manejo do solo e das culturas, da diminuição do desmatamento e preservação da vegetação nativa na bacia hidrográfica.

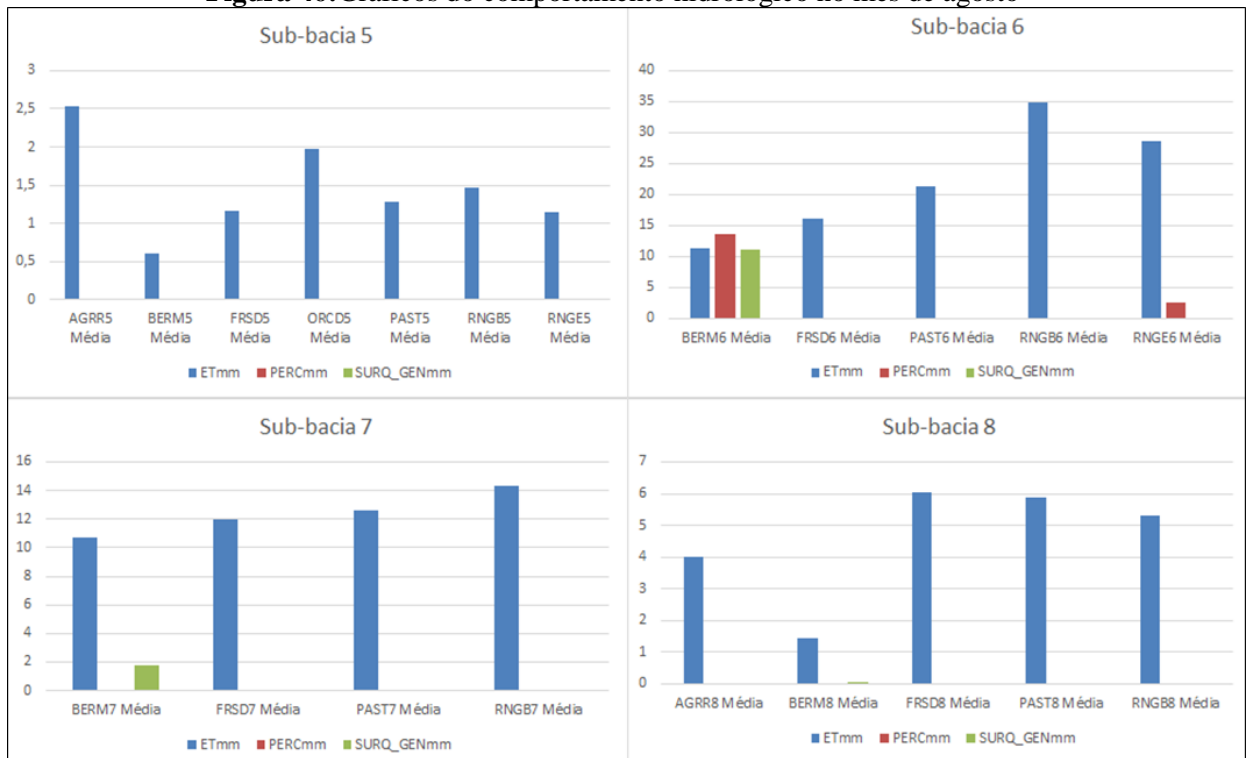
É válido destacar que a região semiárida apresenta altas temperaturas e irregularidade na distribuição das chuvas, sendo também marcada por períodos de estiagem. Nesse sentido, no período mais seco ocorre uma diminuição da precipitação e isso reflete nos valores dos componentes hidrológicos.

Figura 45: Gráficos do comportamento hidrológico no mês de agosto



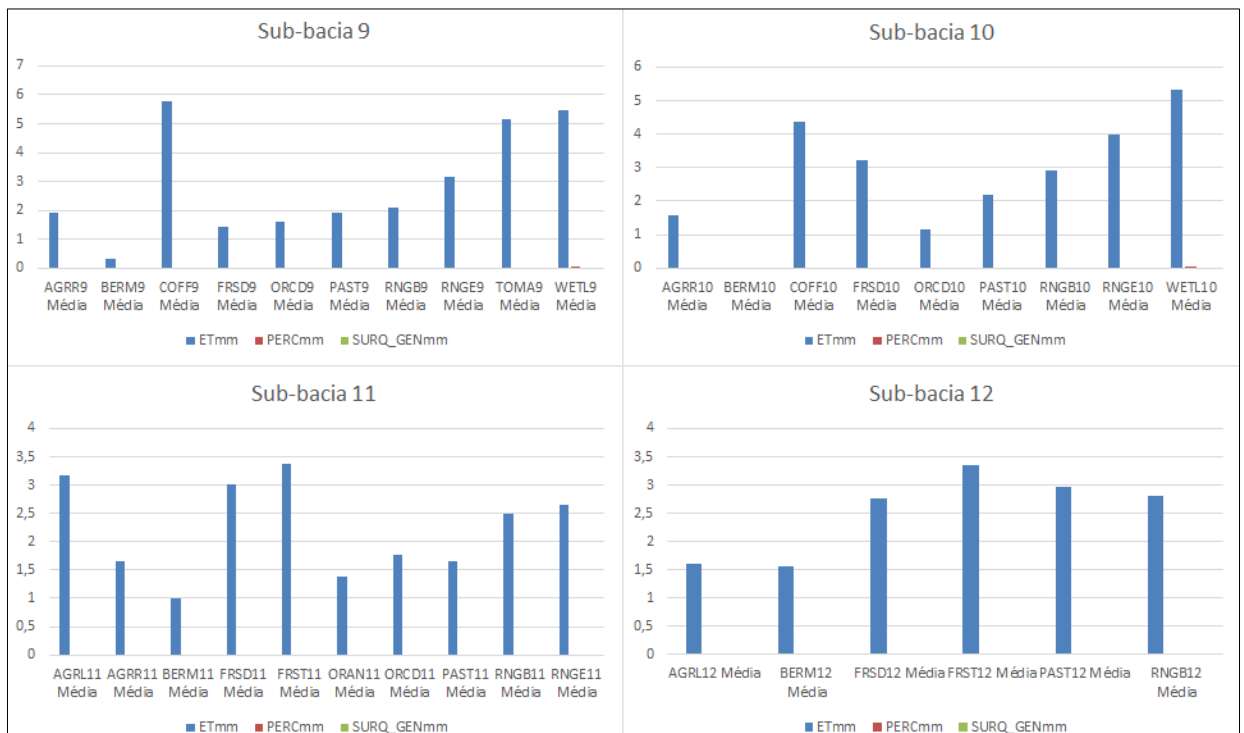
Fonte: A autora

Figura 46: Gráficos do comportamento hidrológico no mês de agosto

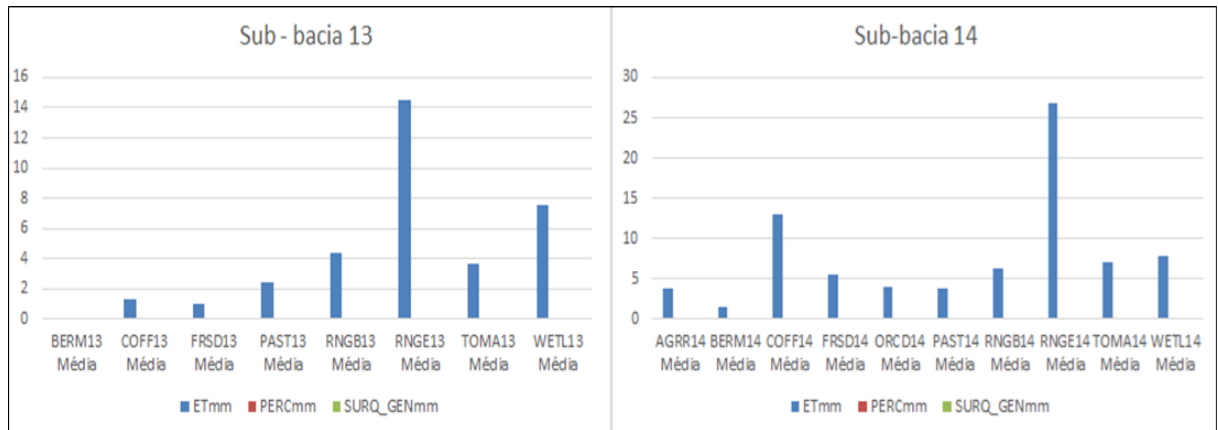


Fonte: A autora

Figura 47: Gráficos dos componentes hidrológicos do solo no mês de agosto/2019



Fonte: A autora

Figura 48: Gráficos dos componentes hidrológicos do solo no mês de agosto/2019

Fonte: A autora

Segundo Silva (2020) pode-se afirmar que boa parte da água que precipita é perdida por evaporação nos períodos mais secos. Além disso, devido às altas temperaturas da região semiárida, o potencial de evapotranspiração é maior do que as precipitações, logo, ocorre uma diminuição no fluxo de água para os processos de percolação e escoamento superficial na bacia hidrográfica, conforme pode ser observados nos gráficos.

Em regiões semiáridas a interceptação pela vegetação pode ser significativa, em razão de muitas espécies serem adaptadas ao baixo potencial hídrico dos solos (Miranda, 2017). Logo, durante o período menos chuvoso na bacia, parte da precipitação é interceptada pela vegetação e retorna para atmosfera através do processo de evaporação, podendo nunca atingir o solo. A água que atinge o solo pode penetrá-lo através do processo de infiltração, se a taxa de infiltração desse solo for excedida, ocorrerá o processo de escoamento superficial. Depois que a água penetra o solo, uma parte dela está sujeita a percolação descendente e saída da zona de enraizamento das plantas através da drenagem. Todavia, nos períodos de baixa pluviosidade em regiões semiáridas, boa parte dessa água retorna para as raízes através da ascensão capilar, ou é movida para superfície do solo e perdida por evaporação, ou após ser utilizada pelas plantas é liberada na forma de vapor através dos estômatos pela evapotranspiração. (Brady e Weil, 2013).

Conforme disposto, houve uma queda brusca dos valores de escoamento e percolação, além disso ocorreu uma diminuição da evapotranspiração em relação ao mês de março (mais chuvoso). Ao observar os gráficos, percebe-se que no mês de agosto só permaneceram os valores de evapotranspiração, que apresentaram variações entre 0,3 mm e 34,8 mm. Os maiores valores de evapotranspiração pertencem as sub-bacias 6 (34,86 mm) e 7 (14,28 mm), justamente as sub-bacias que possuem os maiores valores de precipitação, é válido ressaltar que esses valores são referentes as áreas de Caatinga (RNGB).

A vegetação da Caatinga é adaptada as condições de déficit hídrico, por isso durante os períodos menos chuvosos, as espécies de plantas utilizam diferentes estratégias para a diminuição da perda de água por transpiração, tais como o fechamento dos estômatos, sistema radicular profundo e a perda das folhas (caducifólia). Segundo Fernandes e Queiroz (2018) a partir de precipitações mínimas, as folhas aparecem rapidamente e as plantas completam seus ciclos reprodutivos em um curto espaço de tempo. Logo, os maiores valores de evapotranspiração da Caatinga nas sub-bacias 6 e 7 podem estar relacionados ao comportamento da vegetação frente a precipitação.

Na sub-bacia 2 os maiores valores de evapotranspiração ocorreram na pastagem (8,17 mm), que ocupa 84,65% da área, associada principalmente a Planossolos e Latossolos. Conforme discutido anteriormente a Braquiária, que é o tipo de pastagem utilizada na bacia, possui maior demanda de umidade nas camadas superiores do solo, o que pode favorecer a perda de água por evaporação e evapotranspiração nos períodos menos chuvosos, devido a exposição dessas camadas (Melo e Montenegro, 2015). É importante destacar que os Planossolos que ocupam maior área dessa sub-bacia (76,76 %) são solos que possuem a camada superficial mais arenosa, seguida de uma camada mais argilosa (impedimento), o que favorece o aumento da umidade nas camadas superiores e conseqüentemente, maior perda por evaporação devido as altas temperaturas e diminuição das precipitações.

Nas sub-bacias 1, 13 e 14 os maiores valores de evapotranspiração, respectivamente 9,8 mm, 14,52 mm e 26,89 mm ocorrem nas áreas de vegetação de Cerrado, que nas três sub-bacias ocupam áreas de Neossolos litólicos, solos arenosos com baixa capacidade de retenção. Durante o período de seca, boa parte das espécies de vegetação do Cerrado florescem, renovam as folhas e espalham suas sementes antes que elas germinem no final da estação úmida, o que evidencia a adaptação dessa vegetação aos períodos de seca (Quesada et al., 2008). Logo, nessas áreas a baixa capacidade de retenção de água nos solos associada a adaptação da vegetação de Cerrado aos períodos de escassez de água, podem ter corroborado com esses valores de evapotranspiração.

Nas sub-bacias 8, 11 e 12 os maiores valores de evapotranspiração estão associados as áreas de florestas. Durante os períodos de seca, normalmente os valores de evapotranspiração da floresta é maior em comparação com a vegetação de menor porte, devido ao seu sistema radicular maior e melhor desenvolvido (Calder, 1998).

Nas sub-bacias 4 e 9 os maiores valores ocorreram nas áreas de cultivo de café, que variam na região em sistemas tradicionais com cultivo de sequeiro, como também em áreas com sistemas intensificados, mecanizados e com irrigação, que tem crescido na região. É válido

ressaltar que nos períodos de seca, as culturas de sequeiro também podem ser irrigadas. Na sub-bacia 5, o maior valor de evapotranspiração (2,53mm) também está localizado numa área de cultivo irrigado.

Em estudo realizado com o SWAT por Brito et al. (2021), na bacia do Pontal em Pernambuco, os autores observaram valores de evapotranspiração altos o ano todo na região da bacia onde existiam cultivos irrigados. Isso ocorre porque no SWAT, a quantidade de água necessária para a transpiração das plantas é fornecida de acordo com a quantidade de água presente no solo e nas áreas irrigadas as águas são captadas para suprir as demandas das plantações.

E na sub-bacia 10, os maiores valores de evapotranspiração (5,32 mm) estão relacionados aos ambientes lânticos dos brejos, que fazem parte do Pantanal de Marimbus (figura 49).

Figura 49: Pantanal de Marimbus, Chapada Diamantina –BA



Fonte: Ruy Resende/Site: Marimbus

Uma grande extensão de água doce, formada pelo encontro das águas dos rios Santo Antônio e Utinga, na borda leste da Chapada Diamantina. Essa área brejosa, está situada num local de baixa declividade onde a água foi represada, devido ao assoreamento dos rios Utinga e Santo Antônio, como consequência das atividades de lavras na região (FUNCH, 2002). É um ambiente que se encontra constantemente alagado, sob influência da sazonalidade, podendo atingir a profundidade de 2,6 m nos períodos de seca e 4,0 m nos períodos de cheia (Santos & Caramaschi, 2008).

As sub-bacias 6 e 7 foram as únicas que apresentaram valores de escoamento associados a área urbana, respectivamente 11,17 mm e 1,8 mm. Como essas foram as sub-bacias com os maiores valores de precipitação do período, esses valores corroboram com o fato de que o

escoamento em regiões semiáridas ocorre associado ao período chuvoso ou com eventos isolados de precipitação. Segundo Silva (2020) a produção de escoamento é rapidamente verificada na superfície após eventos extremos, nos quais a capacidade de infiltração do solo é rapidamente excedida (escoamento hortoniano) ou devido a compactação e outros fatores que fazem com que a água escoe.

A sub-bacia 6 também foi a única que apresentou valores de percolação, que variaram entre 2,54 mm e 13,56 mm, que podem ser explicados através dos maiores valores de precipitação que ocorreram somente nessa sub-bacia (42,9 mm). É possível perceber a partir da análise do gráfico que os valores de percolação correspondem a área urbana e Cerrado.

A área urbana refere-se ao município de Itaberaba que está localizado na parte de relevo mais plano da bacia, o que pode ter favorecido o processo de percolação. É importante destacar, que na sub-bacia 6 a área urbana apresentou o menor valor de evapotranspiração (11,32 mm) e os maiores valores de escoamento (11,17), o que normalmente é esperado em razão da retirada da vegetação e impermeabilização dos solos nas cidades. Os valores de percolação associados ao Cerrado na sub-bacia 6 podem ter ocorrido em razão da vegetação de Cerrado ocorrerem associadas aos Neossolos, solos arenosos com maior capacidade de infiltração de água.

Além desse aspecto é importante destacar que a bacia do rio Paraguaçu está localizada numa região complexa e que sofre a influência de diversos sistemas meteorológicos. As principais fontes de umidade locais da bacia, na parte leste são o Oceano Atlântico e as Brisas marítimas, e na parte oeste, ocorre principalmente a influência do relevo e da vegetação (Souza et al., 2016).

A sub-bacia 6 está localizada na região central da bacia, região do Piemonte do Paraguaçu, área que apresenta a maior parte do relevo com declividade de 15-99%, composta por Serras e Patamares do médio Paraguaçu, característica que também pode ter influenciado na ocorrência de precipitações isoladas nesse período, além dos aspectos meteorológicos.

As sub-bacias 9,10 e 14 apresentaram valores mínimos de percolação, respectivamente (0,010 mm;0,005 mm;0,010 mm) relacionados as áreas de brejo (WETL) que representam o Pantanal de Marimbus, área de proteção ambiental composta por um conjunto de ambientes lânticos, situados à leste do Parque Nacional da Chapada Diamantina e alimentados pelos rios Santo Antônio e Utinga, conforme discutido anteriormente. Ademais, todas as outras sub-bacias durante o período menos chuvoso, registraram valores nulos de escoamento e percolação.

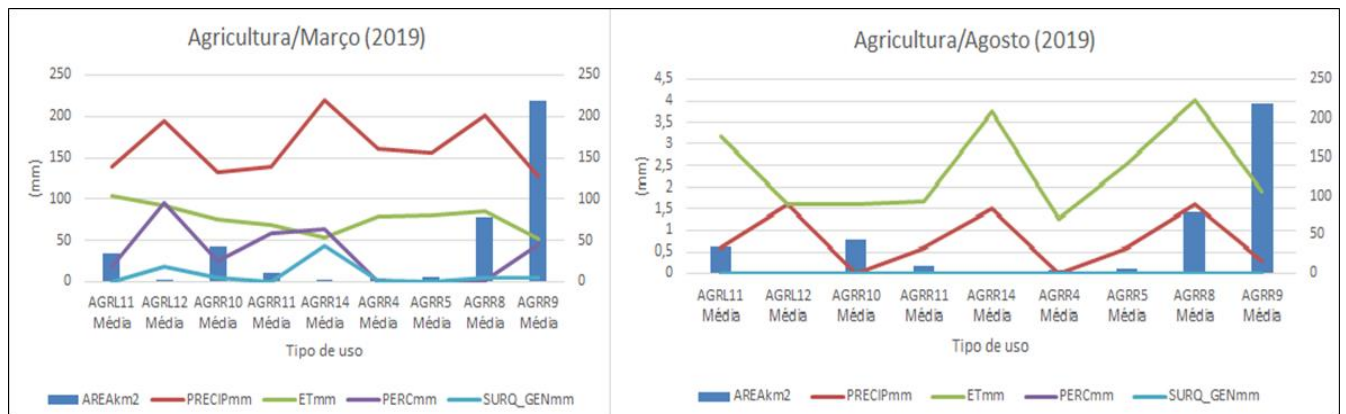
É válido ressaltar que estudos realizados com o SWAT em bacias localizadas na região do semiárido evidenciaram menores valores de escoamento e evapotranspiração no período menos chuvoso ou de estiagem (Silva, 2020; Brito, et al. 2021) o que corrobora com os valores

de escoamento e evapotranspiração encontrados na Bacia do Rio Paraguaçu nesse período, outro aspecto que é ressaltado por Brito et al. 2021 é a tendência de crescimento e decréscimo desses componentes com a sazonalidade da precipitação, fator que também foi observado nesse estudo.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS MESMOS TIPOS DE USO E COBERTURA NAS DIFERENTES SUB-BACIAS: MESES DE MARÇO E AGOSTO DE 2019

A partir dos dados foram gerados gráficos para fazer a análise comparativa entre o mesmo tipo de uso nas diferentes sub-bacias, nos meses de março e agosto de 2019. Com base nesses gráficos foi possível observar a mudança no comportamento dos componentes hidrológicos entre as sub-bacias. A figura 50, mostra a agricultura nas diferentes sub-bacias, nos meses de março e agosto de 2019.

Figura 50: Comportamento hidrológico da agricultura nos meses de março e agosto de 2019



Fonte: A autora

Os valores de evapotranspiração associados à agricultura no mês chuvoso variaram nas sub-bacias de 44 mm a 104,2 mm e no período seco variaram entre 1,25 mm e 4,02 mm, o que evidencia conforme já discutido anteriormente, a relação direta entre a precipitação e a evapotranspiração na bacia, uma vez que os valores de precipitação no mês de março nessas sub-bacias foram superiores a 125 mm e inferiores a 2,0 mm no mês de agosto.

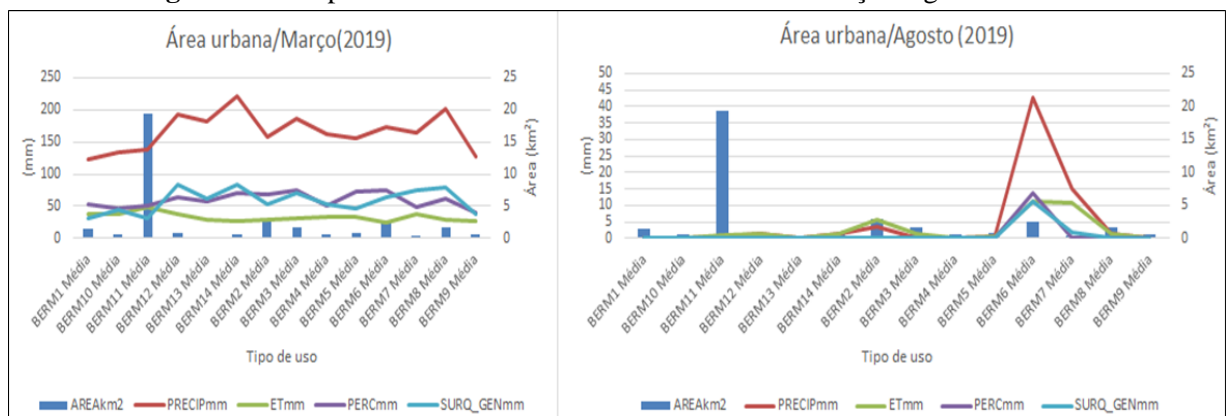
De modo geral nota-se que no mês chuvoso os valores de precipitação foram superiores aos valores de evapotranspiração e relação inversa ocorre no mês seco. No mês de março as áreas de agricultura apresentaram valores de percolação e escoamento associados aos valores de precipitação, pode-se observar que em algumas sub-bacias em que choveu mais (AGRL 12, AGRR14, AGRR 9) os valores de percolação e escoamento foram maiores. Além disso, nessas sub-bacias os valores de percolação foram maiores que a evapotranspiração, o que pode estar

relacionado com os tipos de solos dessas áreas, sua condutividade hidráulica e também o fato de a maioria das áreas de agricultura da bacia serem de cultivo irrigado.

Na AGRL 12 o tipo de solo é Chernossolo, solo pouco profundo, de textura média argilosa e que possui caráter argilúvico (PRONASSOLOS), o que indica que é um solo que apresenta um horizonte B textural com caráter mais argiloso, que possui uma boa capacidade de retenção e também é mais suscetível a erosão (gradiente textural), essa área está localizada próxima as margens do rio, em um ambiente de rápida saturação o que justifica o valor de escoamento da área.

Na AGRR 14 e na AGRR 9 os solos são Latossolos e Neossolos, respectivamente, solos mais desenvolvidos e arenosos, que possuem boa drenagem no perfil. Os valores de escoamento na AGRR 14 podem ter relação com a irrigação, tipo de solo e também com a declividade da sub-bacia. A figura 51, mostra o comportamento das áreas urbanas nas diferentes sub-bacias, no mês de março e agosto de 2019.

Figura 51: Comportamento da área urbana nos meses de março e agosto de 2019



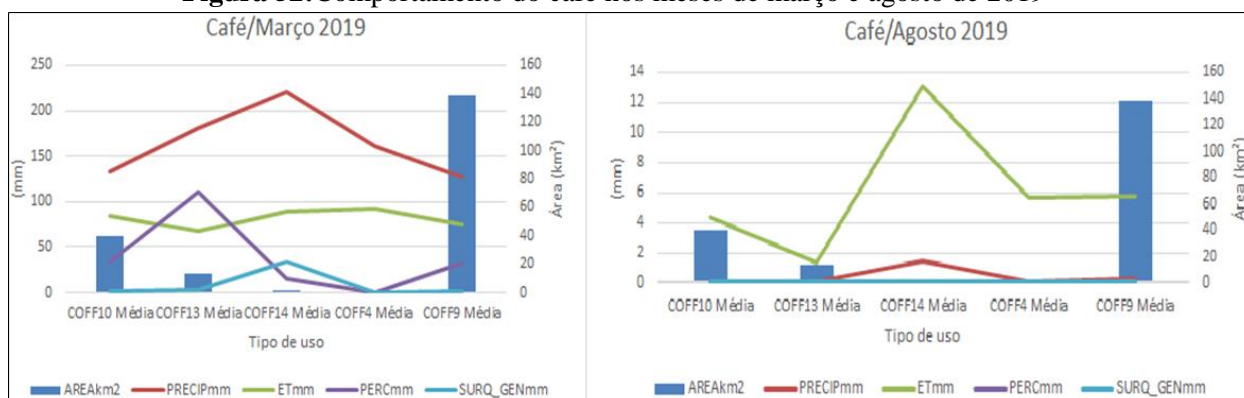
Fonte: A autora

Nas áreas urbanas os valores de evapotranspiração no período chuvoso variaram de 25,13mm a 47,72mm e no período seco de 0,0 mm a 11,32 mm. O que evidencia a relação desse componente com a precipitação nas cidades, onde grande parte da vegetação foi retirada e maior parte dos solos impermeabilizados, o que diminui bastante os valores de evapotranspiração. Os maiores valores ocorreram nos períodos chuvosos e ainda assim bem menores que os valores de percolação e escoamento. No período mais seco é possível observar que os valores de evapotranspiração, escoamento e percolação foram nulos na maioria das sub-bacias, somente aquelas que tiveram alguma precipitação apresentaram valores ínfimos de evapotranspiração e escoamento. A sub-bacia 6 foi a única que no período seco apresentou valores maiores de evapotranspiração, percolação e escoamento, consequentemente por ter sido a sub-bacia com a maior precipitação do período.

A partir da análise dos dados compreende-se que o fluxo de saída de água nas cidades por escoamento direto e sub-superficial é bem maior nos períodos chuvosos e isso tem relação com as áreas impermeáveis das cidades. Ocorre uma aceleração dos escoamentos por meio dos canais e condutos, aumentando a quantidade de água que chega no sistema de drenagem, ocasionando as inundações. O que conseqüentemente eleva o pico da vazão de escoamento superficial (Tucci, 2012).

No SWAT as áreas impermeáveis das áreas urbanas são divididas em dois grupos: as áreas que estão hidraulicamente conectadas ao sistemas de drenagem, ou seja, áreas que contribuem efetivamente para o escoamento superficial direto, não passando por áreas permeáveis e nem infiltrando no solo; e as áreas que não estão conectadas diretamente, a exemplo de áreas em que o escoamento de um telhado que desagua no quintal é capaz de infiltrar no solo, situação que pode ter corroborado com os maiores valores de percolação na área urbana nesse período.

Em estudo realizado por Silva (2018) sobre o efeito da conectividade hidráulica de superfícies impermeáveis na geração do escoamento superficial em áreas urbanas, a autora identificou a influência das áreas permeáveis no controle do escoamento das áreas impermeáveis conectadas a elas. Sob chuvas de menor intensidade, a autora constatou que esse efeito é maior e causa uma atenuação do pico de vazão, porém sobre chuvas de alta intensidade, ocorre a saturação das áreas permeáveis, a influência diminui e o comportamento do escoamento tende a aumentar. Se observarmos o comportamento das áreas urbanas na bacia, é possível perceber que no período chuvoso, nos locais de picos, onde ocorreram as maiores precipitações, os valores de escoamento excederam os de percolação. Todavia, nos locais onde a intensidade da chuva foi menor, os valores de percolação foram maiores que os de escoamento, o que pode ter ocorrido devido a esse efeito das áreas impermeáveis desconectadas, onde o escoamento gerado por ela é direcionado para uma área permeável adjacente. A figura 52, mostra o comportamento do café nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 52: Comportamento do café nos meses de março e agosto de 2019

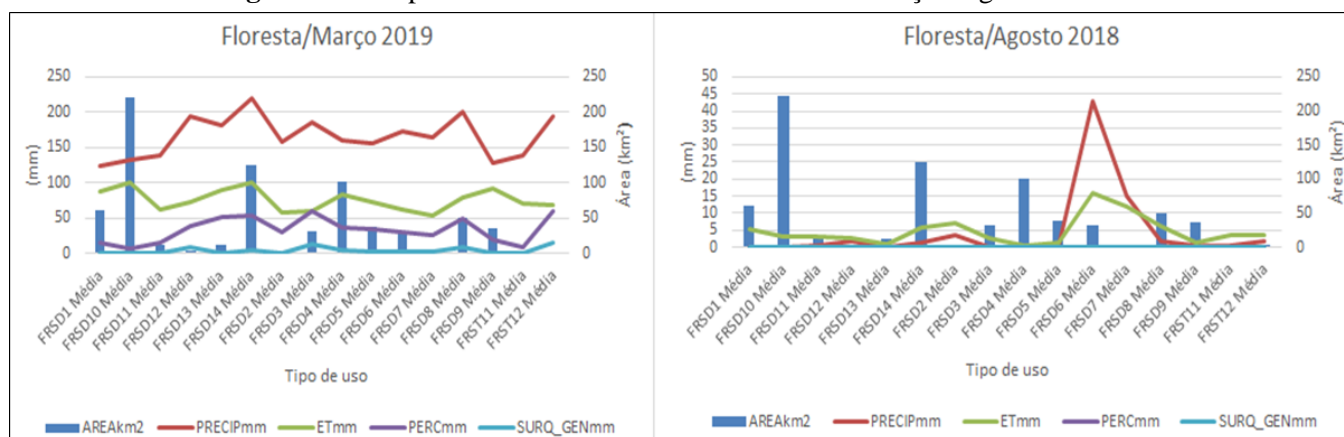
Fonte: A autora

Nas áreas de café os maiores valores de evapotranspiração ocorreram no período chuvoso e variaram de 66,80 mm a 91,55mm, sendo o maior valor da sub-bacia 4, localizada na parte oeste da bacia, região do Morro do Chapéu. Nesse ponto a área de cultivo de café é pequena em relação as outras, porém está em um local de relevo plano (0-5%) sobre Latossolos amarelos bem desenvolvidos e entre florestas mais densas e preservadas, condições que podem ter favorecido a saída de água por evapotranspiração. O escoamento variou entre 1,6 mm e 34,26mm, sendo o maior valor associado a sub-bacia 14, onde ocorreram os maiores valores de precipitação da área.

Os valores de percolação variaram entre 14,74mm e 109,7mm, sendo os maiores valores associados a sub-bacia 13, onde ocorrem os cultivos irrigados do polo Ibiçara-Mucugê, sobre Argissolos vermelhos amarelos eutróficos que apresentam textura arenosa/ média e média argilosa, em áreas de relevo plano suave, condições que podem ter favorecido a drenagem de água.

No período seco com a diminuição das precipitações (0,3mm a 1,5mm) os valores de evapotranspiração também diminuiram bastante e variaram de 1,03 mm a 3,08mm associados as sub-bacias onde as precipitações foram maiores, com exceção da sub-bacia 10 que apresentou valor de evapotranspiração de 4,37 mm, mesmo com a precipitação sendo nula, o que pode ter relação com a água retida no solo. Os valores de percolação e escoamento foram nulos nesse período.

A figura 53, mostra o comportamento das florestas nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 53: Comportamento das florestas nos meses de março e agosto de 2019

Fonte: A autora.

As florestas em toda a bacia apresentaram valores de evapotranspiração que variaram de 54,61 a 101,4 mm, valores normalmente altos e que são esperados nesse período devido rugosidade de suas copas, que auxiliam no aumento da evapotranspiração. Os valores mais altos estão relacionados a sub-bacia 10, na região oeste da bacia, onde a área de vegetação é maior, além desse aspecto os valores maiores também ocorreram nas sub-bacias onde choveu mais.

Os valores de percolação apresentaram variações de 6,91 mm a 59,92 mm, sendo o maior valor associado a sub-bacia 3, localizada numa área de Argissolos vermelhos e Luvisolos. Solos com texturas médias e com baixa capacidade de retenção de água o que pode ter favorecido a drenagem, embora também sejam suscetíveis ao escoamento devido ao relevo mais ondulado em algumas partes. É possível perceber que os valores de percolação seguem a tendência dos picos de precipitação, sendo maiores onde choveu mais.

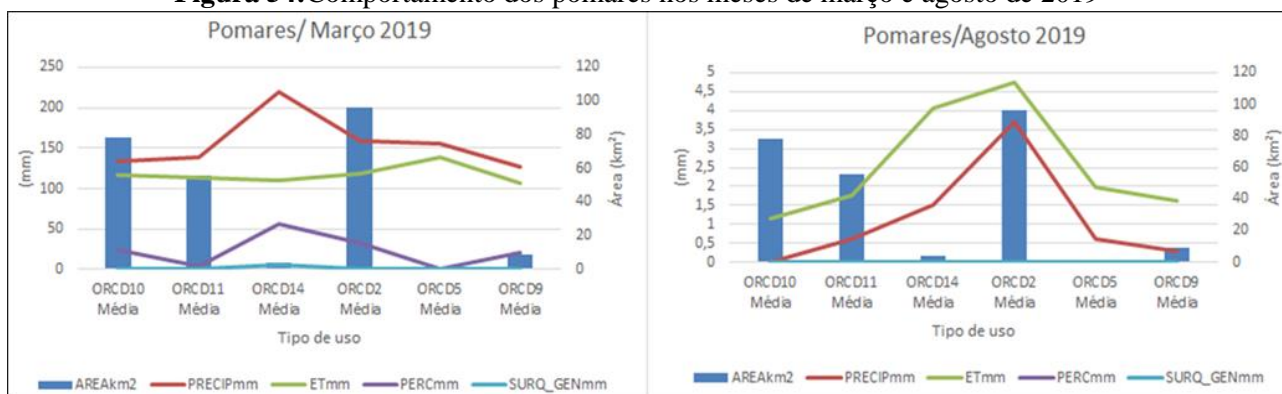
Nas florestas com vegetação de maior porte, a capacidade de infiltração do solo é alta pois mantém a umidade dos solos por mais tempo. Todavia, embora a infiltração seja maior, a recarga do aquífero não ocorre na mesma intensidade, uma vez que grande parte da água retorna a atmosfera através da transpiração (Bacellar, 2005; Best et al., 2003).

Os valores de escoamento nas florestas variaram de 0,0 mm a 14,95mm, sendo os maiores valores encontrados nas sub-bacias 3, 8 e 12, que podem ter ocorrido em razão da declividade dos locais onde essas florestas se encontram nessas sub-bacias.

No mês de agosto, os valores de percolação e escoamento foram nulos em todas as áreas de florestas da bacia. Os valores de evapotranspiração foram superiores aos valores de precipitação e apresentaram variações de 0,64 mm a 16,09, somente na sub-bacia 6, onde choveu mais do que o normal para o período, o volume de precipitação foi maior que o de evapotranspiração. Segundo Bacellar (2005) a evapotranspiração em climas áridos é regulada

pela água disponível, que é em função da precipitação e da capacidade de armazenamento no perfil do solo. Fato evidenciado pelos valores de evapotranspiração no período seco na bacia, que ocorreram mesmo onde os valores de precipitação foram nulos, o que tem relação com a capacidade de retenção de água nos solos e a importância dessa característica no regime hídrico das bacias, principalmente nos períodos secos. A figura 54, mostra o comportamento dos pomares nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 54: Comportamento dos pomares nos meses de março e agosto de 2019

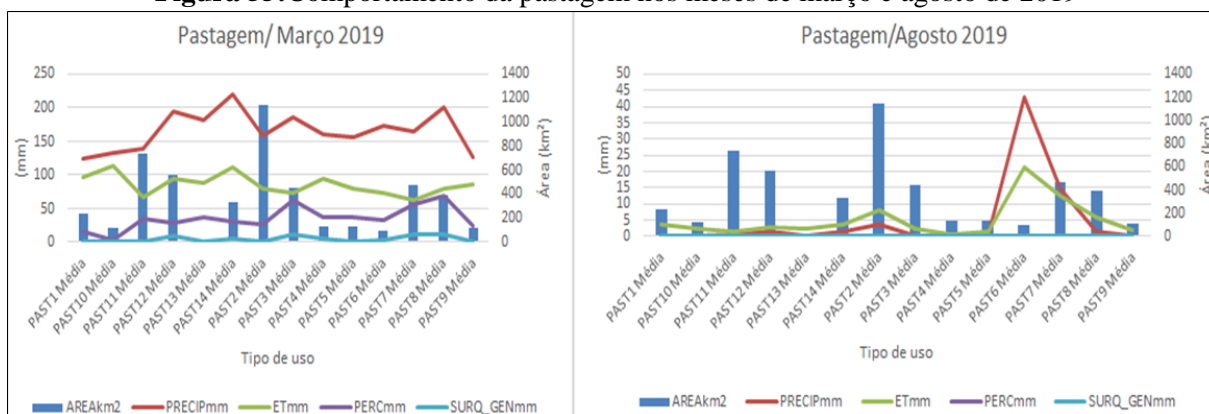


Fonte: A autora

Durante o mês de março os valores de evapotranspiração variaram de 105,94 mm a 138,03mm, valores maiores que os apresentados pelas florestas para o mesmo período. Tais valores podem ter relação com o cultivo irrigado de frutas que ocorre nessa área da bacia, que tem uma grande demanda de água e conseqüentemente de evapotranspiração. Os valores de percolação nas áreas de pomares variaram de 0,0mm a 56,50mm, as sub-bacias que apresentaram valores nulos, podem ter relação com a demanda de água da cultura e a capacidade de retenção de umidade dos solos (Neossolos e Latossolos), que por ser baixa pode favorecer a perda de água por evaporação.

Os valores de escoamento apresentaram variação de 0,0mm a 6,01 mm, sendo o maior valor associado a sub-bacia 14, onde a precipitação e a percolação foram maiores, áreas de cultivos irrigados sobre Neossolos e com o relevo mais ondulado em algumas partes, o que pode ter favorecido esses valores de escoamento na área. Outro aspecto é que como o cultivo é irrigado, a demanda de água do solo pode ter sido excedida e gerado o fluxo de escoamento. No mês de agosto os valores de percolação e escoamento foram nulos, e os valores de evapotranspiração foram maiores que a precipitação em todas as áreas.

A figura 55, mostra o comportamento da pastagem nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 55: Comportamento da pastagem nos meses de março e agosto de 2019

Fonte: A autora.

Os valores de evapotranspiração das áreas de pastagem apresentaram variação de 61,80mm a 112,9mm, em algumas sub-bacias esses valores foram maiores do que os identificados nas áreas de floresta e caatinga. Tal fato pode estar relacionado a eficiência da produtividade da pastagem (*Bracchiaria*) principalmente nas camadas superiores do solo (citar autor), o que reflete em maiores valores de evapotranspiração. Além disso o tipo de solo influencia na quantidade de água disponível para evapotranspiração, como os solos com maior capacidade de retenção de água, ou solos que possuem alguma camada de impedimento que condiciona o acúmulo de água nas camadas superiores, o que consequentemente contribui com as perdas de água para as plantas com zonas radiculares mais curtas como a pastagem e as perdas por evaporação.

Os valores de percolação nas áreas de pastagem da bacia variaram de 2,59 mm a 68,14 mm, de modo geral pode-se perceber que os valores de percolação na pastagem estão relacionados com a evapotranspiração e os tipos de solos da bacia. No gráfico os valores de percolação seguem uma tendência inversa aos picos de evapotranspiração, ou seja, onde os valores de evapotranspiração são maiores os de percolação são menores e assim respectivamente. As sub-bacias que apresentaram os maiores valores de percolação (3,7 e 8) possuem maior parte da área com Planossolos, solos pouco profundos e com drenagem imperfeita, que apresentam horizonte superficial mais arenoso e horizonte B plânico, ou seja, como está no período chuvoso esses solos possuem o lençol freático suspenso e logo atingem o ponto de saturação, consequentemente nessas áreas os valores de escoamento também foram maiores.

Na sub-bacia 8 a pastagem ocorre em solos que favorecem uma boa drenagem, respectivamente, em áreas de Latossolos, solos mais desenvolvidos; Neossolos, solos mais arenosos; e Argissolos vermelhos-amarelos que são profundos e muito profundos e bem

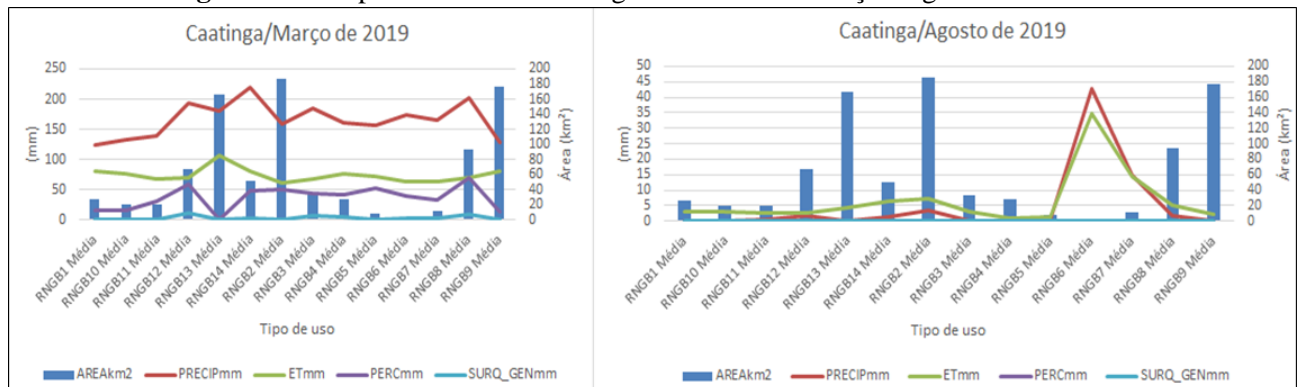
estruturados (Neto e Silva, 2021). Na sub-bacia 10 onde os valores de percolação foram menores, os solos são argilosos e o relevo suavemente ondulado, o que pode ter favorecido a retenção de água e perda por evapotranspiração, já que o valor de evapotranspiração da área foi maior e o valor de escoamento foi nulo.

Os valores de escoamento variaram de 0,0 mm a 12,26 mm, conforme disposto anteriormente, o menor valor ocorreu na sub-bacia 10 e os maiores valores nas sub-bacias 7, onde a pastagem ocorre associada a Planossolos e na 8 onde predominam os Argissolos, Neossolos e Latossolos. Outro aspecto que influencia no comportamento desses componentes é o manejo da pastagem, os locais onde a pastagem está mais degradada ou compactada podem aumentar os valores de escoamento e diminuir a infiltração de água.

No mês de agosto, período menos chuvoso, os valores de percolação e escoamento foram nulos e permaneceram somente os valores de evapotranspiração e precipitação. Na maioria das sub-bacias os valores de evapotranspiração excederam os de precipitação, exceto nas sub-bacias 6 e 7, que apresentaram o maior índice pluviométrico do período.

A figura 56, mostra o comportamento da vegetação de Caatinga nas diferentes sub-bacias no mês de março de agosto de 2019.

Figura 56: Comportamento da Caatinga nos meses de março e agosto de 2019



Fonte: A autora.

Os valores de evapotranspiração das áreas de Caatinga em todas as sub-bacias foram superiores a 60 mm, apresentando variação de 61,93 mm a 106,2 mm. A caatinga é uma vegetação adaptada ao baixo potencial hídrico dos solos, o que faz com que o seu ciclo produtivo apresente valores altos de evapotranspiração nos períodos de chuva, que é quando a planta abre seus estômatos. O maior valor de evapotranspiração foi apresentado pela sub-bacia 13, localizada região oeste da bacia, onde os solos são latossolos que apresentam textura argilosa e muito argilosa, sendo descrito com alguns horizontes superficiais (profundidades 0-30 cm) com aspecto ligeiramente duro, pegajoso e plástico (PRONASSOLOS, 2022).

Característica essa que corrobora com os valores nulos de percolação na área e consequentemente com os maiores valores de evapotranspiração.

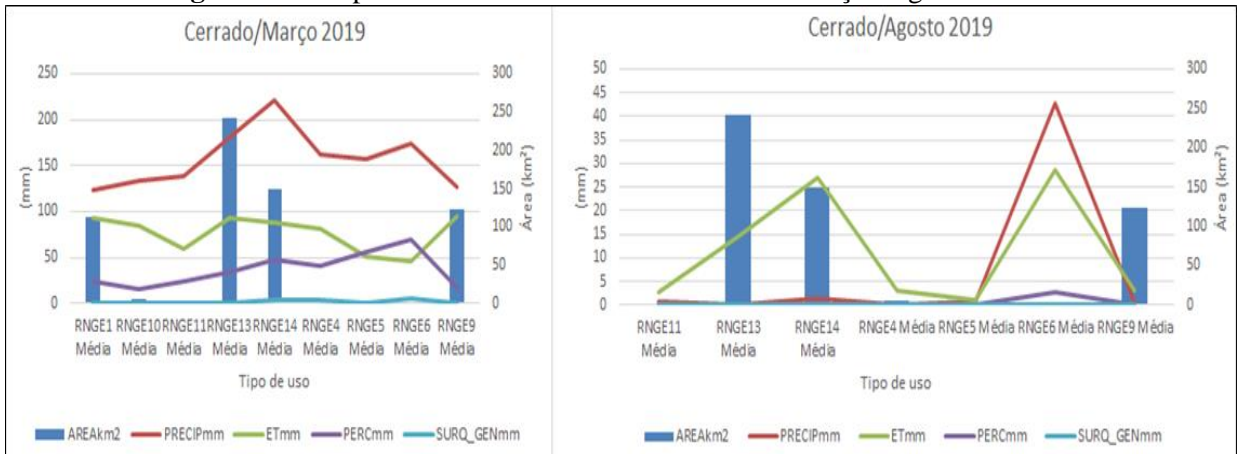
Os valores de percolação variaram de 0,0 mm a 69,05 mm, sendo os valores nulos decorrentes das áreas com Latossolos argilosos, conforme descrito anteriormente. O maior valor de percolação está associado a sub-bacia 8 onde predominam os Latossolos amarelos, os Neossolos e os Argissolos vermelho-amarelos com características que favorecem uma boa drenagem na área.

Os valores de escoamento apresentaram variações de 0,0 mm a 11, 04 mm, sendo os valores nulos associados a sub-bacia 13 conforme discutido anteriormente e os maiores valores relacionados as sub-bacias 3, 8 e 12. Tais valores podem estar relacionados a taxa de retenção de água dos solos, que foi atingida devido ao período chuvoso, o que consequentemente corroborou com a saída do fluxo de água por escoamento. Outros aspectos como a declividade e o espaçamento da vegetação de caatinga também podem ter colaborado com esses valores de escoamento, visto que o avanço das atividades agrícolas e das pastagens sobre as áreas da caatinga é recorrente na bacia e tem se agravado cada vez mais.

No período seco os valores de percolação e escoamento foram nulos e os valores evapotranspiração caíram consideravelmente em relação ao período chuvoso, porém permaneceram maiores que os de precipitação em todas as áreas de caatinga, com exceção da sub-bacia 6 onde os valores de precipitação do período foram os maiores. O que salienta a importância da capacidade de armazenamento de água nos solos, que é o que sustenta a vegetação de caatinga após o período chuvoso.

A figura 57, mostra o comportamento da vegetação de Cerrado nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 57:Comportamento do Cerrado nos meses de março e agosto de 2019



Fonte: A autora

Os valores de evapotranspiração do Cerrado variaram de 59,52mm a 95,00 mm, sendo os maiores valores associados as sub-bacias 9 e 13, na região da Chapada Diamantina, parte oeste da bacia, que concentra a maior área de vegetação de Cerrado. Assim como a Caatinga, a vegetação de Cerrado também é adaptada ao clima semiárido e no período chuvoso apresenta maiores valores de evapotranspiração. Todavia é válido ressaltar que essas áreas de vegetação de Cerrado ocorrem entremeadas com cultivos agrícolas que tem avançado bastante nos últimos anos naquela região, principalmente na sub-bacia 13 que é onde encontra-se o Agropolo Ibicoara-Mucugê.

Na sub-bacia 9 a maior parte da vegetação de Cerrado ocorre associada as áreas de relevo fortemente ondulado, onde os solos são Neossolos. Por esse motivo os valores de percolação são menores (17,93mm) em relação a sub-bacia 13. Na sub-bacia 13 a vegetação de Cerrado ocorre associada ao relevo mais plano sobre Latossolos na área do AGROPOLO, e em relevo mais fortemente ondulado na Serra do Sincorá, sobre Neossolos. A vegetação de cerrado que está na Serra é mais preservada, porém a que está na parte de relevo plano ocorre associada as áreas de cultivo irrigado, o que pode ter contribuído com os maiores valores de percolação dessa sub-bacia (33,97mm).

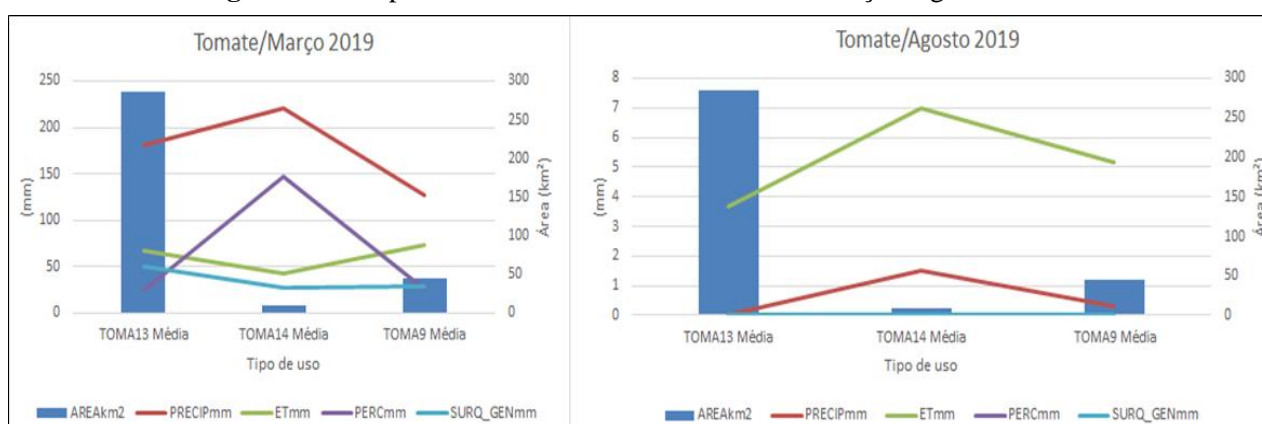
Os valores de percolação da vegetação de cerrado na bacia variaram de 15,67 mm a 69,80mm, a partir da análise do gráfico é possível verificar a relação direta desses valores com a precipitação, e uma relação inversa com os valores de evapotranspiração, ou seja, onde precipitou mais os valores de percolação são maiores e onde a evapotranspiração é maior a percolação é menor e vice-versa. A exemplo disso, a sub-bacia 6 apresentou o maior valor de percolação e o menor valor de evapotranspiração da bacia, tais valores podem ter ocorrido em função da área de cerrado ser menor nessa sub-bacia (0,67 km²), o que pode ter contribuído com menores valores de evapotranspiração, associada a Neossolos, solos que favorecem a drenagem de água.

Na sub-bacia 4, que também possui uma área menor de Cerrado (4,57 km), os valores de evapotranspiração foram maiores do que os valores de percolação, o que pode ter ocorrido devido a área de Cerrado ser proporcionalmente maior em relação a sub-bacia 6, além do tipo de solo da área ser Latossolo. Os valores de escoamento variaram de 0,002 mm a 5,56mm, sendo que o menor valor ocorreu na sub-bacia 1, que possui uma área de cerrado mais preservado na região do Morro do Chapeú, sobre Neossolo em relevo plano, fatores que favoreceram menor escoamento. E o maior valor ocorreu na sub-bacia 6, onde os valores de precipitação foram maiores, associado aos Neossolos que possuem boa drenagem, porém são

solos rasos em área de relevo ondulado, o que pode ter contribuído com o maior fluxo de saída de água por escoamento.

No mês de agosto os valores de percolação e escoamento foram nulos e os valores de evapotranspiração foram maiores que os de precipitação em quase todas as sub-bacias. Exceto na sub-bacia 6 que apresentou a maior precipitação do período (42,9 mm), o que corroborou com valores de evapotranspiração de 28,64mm e valores de percolação de 2,54 mm. A figura 58, mostra o comportamento do tomate, nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 58: Comportamento do tomate nos meses de março e agosto de 2019



Fonte: A autora.

As áreas de cultivo de tomate das sub-bacias (13,14 e 9) no mês de março apresentaram valores de evapotranspiração de 66,55 mm, 43,38 mm e 72, 62 mm, conforme discutido anteriormente, o tomate possui uma alta demanda hídrica, o que reflete nos valores de evapotranspiração. Todavia fatores como tipo de solo e declividade influenciam no balanço hídrico e distribuição do fluxo de água, conforme pode ser visto nos gráficos. As três sub-bacias estão localizadas na região da Chapada Diamantina, região oeste da bacia, onde ocorrem as maiores altitudes e também precipitações da bacia (sub-bacia 14).

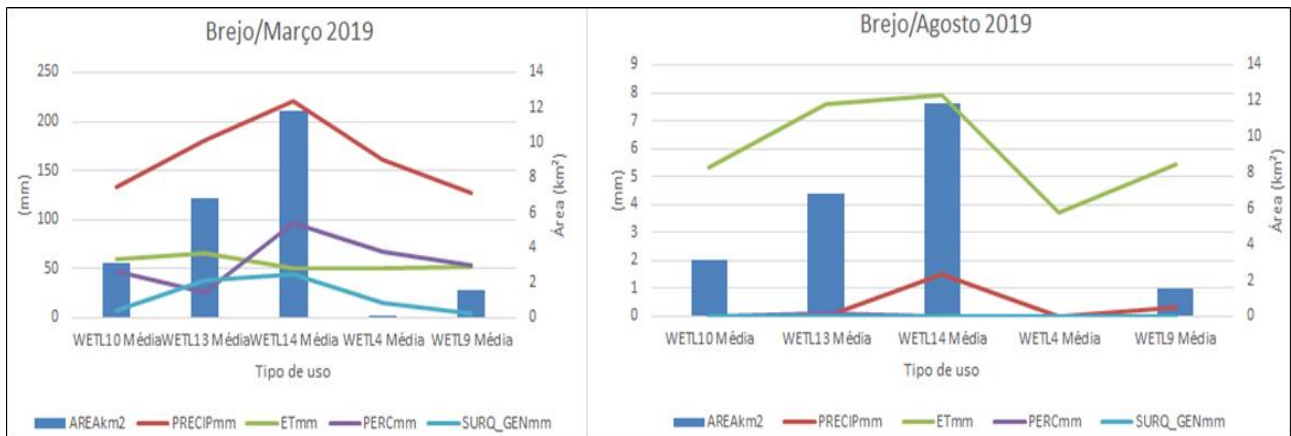
Nos gráficos pode-se observar que nas sub-bacias 9 e 13 ocorreram os maiores valores de evapotranspiração, na sub-bacia 9 os cultivos ocorrem sobre Latossolos em áreas de relevo plano a suave ondulado. É válido ressaltar que os Latossolos dessa área podem apresentar horizonte pegajoso e coeso (de impedimento) o que pode favorecer os maiores valores de evapotranspiração e escoamento.

Na sub-bacia 13 os cultivos também ocorrem sobre o mesmo tipo de Latossolo, porém nessa área o relevo é mais acentuado, o que pode ter contribuído com os maiores valores de evapotranspiração e escoamento. Na sub-bacia 14, os cultivos de tomate ocorrem sobre Neossolos, logo o comportamento é inverso, os maiores valores são os de percolação, que

podem estar ocorrendo em razão da baixa capacidade de retenção dos solos, ou também por se tratar de uma área de relevo cárstico.

No mês de agosto os valores de percolação e escoamento foram nulos e os valores de evapotranspiração foram maiores que os valores de precipitação. A figura 59, mostra o comportamento do brejo, nas diferentes sub-bacias, no mês de março e de agosto de 2019.

Figura 59: Comportamento do brejo nos meses de março e agosto de 2019



Fonte: A autora

Em relação as áreas de brejo, no período chuvoso, pode-se observar que as sub-bacias 4,9 e 14 apresentaram maiores valores de percolação, essas áreas estão relacionadas a Neossolos flúvicos, que são solos profundos, formados por sedimentos aluviais que ocorrem ao longo da linha das drenagens e várzeas nessas sub-bacias e que apresentam boa drenagem, o que pode ter favorecido maior fluxo de percolação.

Nas sub-bacias 10 e 13 os brejos apresentaram maiores valores de evapotranspiração. Na sub-bacia 10 eles ocorrem sobre Latossolos em área de relevo plano a suave ondulado, condições que podem justificar os maiores valores de percolação e menor escoamento. Já na sub-bacia 13 eles ocorrem sobre Latossolos em área de relevo mais acentuada, o que corrobora com os maiores valores de escoamento em relação a percolação.

Durante o período mais seco, esses ambientes permanecem mais úmidos o que contribui com os valores de evapotranspiração, conseqüentemente como já foi observado em todas as áreas, os locais que chovem mais apresentam maiores valores de evapotranspiração, conforme pode ser visualizado no gráfico.

6 CONCLUSÃO

O relevo de toda bacia é predominantemente plano a suave ondulado, principalmente nas sub-bacias 2,3,7,11,12 da porção leste. As sub-bacias 5 e 6 apresentam predominância de declividade com valores entre 5-15%. Embora estejam distribuídas em vários núcleos na bacia, as declividades mais acentuadas predominam nas sub-bacias da porção oeste.

Foi possível observar que o uso predominante na bacia é pastagem, principalmente nas sub-bacias da parte leste, região do semiárido, onde é muito comum a utilização da pastagem no período seco e agricultura de sequeiro nos períodos chuvosos. A principal fonte de economia de muitos municípios é a criação de animais. Nas sub-bacias 9,10 e 13 da porção oeste, os usos predominantes foram respectivamente agricultura, floresta e cerrado. Na sub-bacia 9 predominam os cultivos em fileiras de mandioca, feijão e milho. Na sub-bacia 10 as florestas estacionais conservadas no Planalto do rio Bonito. Na sub-bacia 13, o cerrado antropizado do Pediplano Central e os campos limpos e rupestres da Serra do Sincorá.

Os solos predominantes na bacia foram os Planossolos Háplicos eutróficos (SXE), os Latossolos Amarelos distróficos (LAd) e os Argissolos Vermelhos amarelos (PVAe). Os Planossolos SXE, rasos, com textura arenosa/argilosa e solódicos ocupam as sub-bacias da porção leste, situadas na Depressão do rio Paraguaçu. As características desse solo, associadas ao relevo plano, vegetação esparsa (Caatinga) e má distribuição das chuvas acabam favorecendo o escoamento superficial. Os Latossolos LAd profundos, de textura média e argilosa, distróficos, ocorrem na porção centro-leste, com maior abrangência nas sub-bacias 1,4,5,8,9, 10, 13 e 14. Os Argissolos PVAe, pouco profundos e com textura franco-arenosa, predominam na parte central da bacia sobre os relevos mais movimentados com cobertura de florestas e caatinga.

Em relação ao comportamento dos componentes hidrológicos associados aos tipos de uso e cobertura da bacia do Rio Paraguaçu no período de 2015 a 2019, observou-se que a evapotranspiração apresentou maior variabilidade em detrimento do uso. Todavia deve-se destacar que mediante a complexidade e quantidade de fatores que influenciam no comportamento dos componentes hidrológicos no contexto ambiental de uma bacia hidrográfica, torna-se impossível analisar tais aspectos de forma isolada sem levar em consideração a relação de interdependência entre eles e a contribuição de cada um para o regime hídrico daquele sistema.

No período de 2015 a 2019, as áreas urbanas e de cultivo de tomate apresentaram comportamento hidrológico mais expressivos, sendo os maiores valores de evapotranspiração

e percolação nesse período relacionados aos cultivos de tomates, e os menores valores de evapotranspiração e maiores de escoamento associados as áreas urbanas.

No que tange ao comportamento hidrológico dos solos no período de 2015 a 2019, percebeu-se que os valores de precipitação e escoamento apresentaram comportamento semelhante ao logo da série histórica e a maior variabilidade ocorreu entre os valores de evapotranspiração e percolação, que foram inversamente proporcionais.

Em relação aos solos predominantes da bacia: Os Latossolos Amarelos Distróficos coesos apresentaram os maiores valores de evapotranspiração nesse período, volumes que excederam os valores de precipitação, o que ressalta a influência da camada coesa desses solos no fluxo de água do balanço hídrico dos locais em que ocorrem. Os Planossolos Háplicos apresentaram maiores valores de evapotranspiração, percolação e baixo potencial de escoamento. Os Latossolos Vermelhos Eutróficos apresentaram uma boa drenagem.

Na análise do comportamento do uso associado ao solo, de modo geral percebeu-se que as áreas agrícolas apresentam maior demanda hídrica e conseqüentemente maiores valores de evapotranspiração, além disso o tipo de solo (textura, profundidade, condutividade hidráulica) e relevo vão influenciar nos valores de percolação e escoamento dessas áreas. Nesse contexto, foi observado que mesmo em diferentes tipos de solos o cultivo de tomate apresentou valores altos de evapotranspiração, devido a demanda hídrica da cultura.

Na comparação entre os diferentes tipos de usos no período de 2015 a 2019, foi perceptível a diferença de valores de evapotranspiração e escoamento das áreas urbanas e florestas. Os resultados podem ser indicativos dos impactos ocasionados pela mudança do uso e cobertura da terra no regime hidrológico das bacias.

No período chuvoso a variabilidade dos componentes hidrológicos da bacia possui relação direta com a precipitação, aliado as características do solo e da vegetação. Os valores de evapotranspiração estão totalmente associados a precipitação no período chuvoso, onde chove mais, conseqüentemente evapora mais. Grande parte do que é precipitado na bacia é perdido por evapotranspiração, seja por interceptação da vegetação ou retirada pelas raízes profundas, o que é esperado da vegetação típica do semiárido. A outra parcela da precipitação é perdida respectivamente por percolação e escoamento, a depender das características do solo, tais como a textura e porosidade (conseqüentemente a sua condutividade hidráulica) associadas ao tipo de uso e cobertura, que vão influenciar no grau de compactação, aeração, estrutura e impermeabilização do solo.

No período menos chuvoso os valores de evapotranspiração excederam os valores de precipitação, em razão dos períodos de estiagem e diminuição dos índices de precipitações,

aliado as altas temperaturas, vegetação e aos solos rasos e arenosos, comportamento que é esperado em regiões semiáridas. Assim como valores menores de escoamento e percolação em decorrência da diminuição dos fluxos de entrada de água no solo.

Os resultados obtidos mostram a ampla gama de análises que podem ser realizadas a partir dos dados disponibilizados pelo modelo. Portanto, serve prontamente para analisar os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica a partir do estudo de diversos parâmetros.

Além disso, o modelo calibrado permite trabalhos futuros de simulação de diferentes cenários, onde é possível avaliar os impactos que possam vir a influenciar a quantidade e qualidade da água, promovendo a proteção e o gerenciamento dos recursos hídricos.

No entanto, é preciso destacar que para utilização eficiente do modelo SWAT e sua utilização como ferramenta de auxílio no planejamento e gerenciamento das bacias hidrográficas, é fundamental a obtenção de dados completos e consistentes, uma vez que a base para aquecimento, calibração e validação do modelo é realizada através desses dados. E se tratando da utilização de um modelo de clima temperado em um clima semiárido, todo esse processo é primordial para eficiência da adaptação e das informações que serão geradas através do modelo. Nesse sentido, é importante que os órgãos públicos e empresas privadas tenham a responsabilidade de disponibilizar esses dados completos e com qualidade, para viabilizar a realização de estudos futuros e garantir a confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 2015. 105 p.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV I.; SIBER R.; BOGNER K.; MIELEITNER J.; ZOBRIST J.; SRINIVASAN R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, 333, 2007. p. 413-430.
- ACHAMYELEH, G. MENGISTU, Yali E. WOYESSA, Leon D. VAN RENSBURG, Weldemichael A. Tesfahuney, **Analysis of the spatio-temporal variability of soil water dynamics in an arid catchment in South Africa**, Geoderma Regional, Volume 25, 2021, e00395, ISSN 2352-0094, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00395>. Acesso em: 16 out. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Unidades de planejamento hídrico. *In: Catálogo de Metadados da ANA*. Brasília, 2016. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/df48de18-753b-4789-964d-7f0967c53d08>. Acesso em: 16 nov. 2022
- ALANSI, A.W.; AMIN, M.S.M.; ABDUL HALIM, G.; SHAFRI, H.Z.M. & AIMRUN, W. **Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia**. Hydrol. Earth System Sci. Discuss., 6:7581-7609, 2009.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; Resende, M. **Embrapa Milho e Sorgo: Sistemas de Produção**. 2 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 3ª edição Set. 2007.
- ALVES, E. M. **Fluxos de energia, vapor d'água e co2 entre a vegetação e a atmosfera no agreste meridional de Pernambuco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. CTG. Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- ANDRADE, C. V. L. et al. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da Região Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.10, n.2 (2017) 440-453.
- ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do alto canoas através do modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, 2015.
- ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH S. L. **Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012.
- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. **Journal of the American water resources association**. v. 34, n. 1, p. 73 - 89. 1998.

ARROIO JR, P. P. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros de processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool- SWAT**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BACELLAR, L. A. P. **O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas**. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.39 p.

BALLESTEROS, A. L.; APARICIO, J. S.; SRINIVASAN, R.; SÁNCHEZ, J. P. Assessing the Impact of Best Management Practices in a Highly Anthropogenic and Ungauged Watershed Using the SWAT Model: A Case Study in the El Beal Watershed (Southeast Spain). **Agronomy**, 9, 576, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy9100576>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BARUCH, Z., Fernández, D.S. Water relations of native and introduced C4 grasses in a neotropical savanna. **Oecologia** 96, 179–185 (1993). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00317730>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 2.ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355p.

BEST A., Z., L., MCMAHOM T., WESTERN, A.; VERTESSY R. 2003. **A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability**. Australia, CSIRO Land and Water Technical. MDBC Publication 56 p. (Technical Report 25/03).

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil**. Tese (Doutorado Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFSM, Santa Maria, 2011.

BRITO, L.; SILVA, A.; MACIEL, J.; et al., 1989. Barragem Subterrânea I. **Construção e Manejo**. Petrolina, PE, EMBRAPA-CPATSA.

BROUZIYNE, Y., ABOUABDILLAH, A., BOUABID, R. et al. **SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco**. Arab J Geosci 10, 427 (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3220-9>. Acesso em: 22 jun.2022.

BUDIMAN, M. *et al.* **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p.

BUENO, E. de O. et al. Desempenho do modelo swat para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Revista scientia agraria**. SA vol. 18 n°. 2 Curitiba Abr/Jun. 2017 p. 114-125. Versão On-line ISSN 1983-2443. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/download/50371/32866> . Acesso em: 22 jun.2022

CALDER, I. R. **Water-resources and land-use issues Sri Lanka**. Sri Lanka International Water Management Institute. 33, p1998.

CARELLI, L.; SANTO, S. M. **Bacia Hidrográfica do Paraguaçu: Da Chapada Diamantina até à Baía de Todos os Santos.** *In: Semeando Águas do Paraguaçu.* Universidade Federal de Feira de Santana-UEFS, 2016.

CARVALHO NETO, J. G. de. **Simulação hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT.** 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande — Campina Grande, 2011.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**, 2ª Ed. Revisada e Ampliada. Editora Interciência, 559 p. 2008.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada.** Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências Aplicada, Universidade de Brasília-DF. 2013.

CHAGAS, A. M. S. das et al. **Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT.** *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.30, e026993, 2022. ISSN 2526-7043.

CHAGAS, A.M.S. das. Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.30, e026993, 2022. ISSN 2526-7043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v30.e026993>. Acesso em: 16/jun. 2023.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-39, jul. /set. 2003. Disponível em : https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/35/105d22f1b90dd6e2f7e0464fb9996726_447f7ba4c53bfe949202501ed0e31335.pdf . Acesso em: 16 nov. 2022

CORRÊA, A. C. B; SOUZA, J. O. P. **Escoamento superficial e balanço hídrico em ambientes secos com topografia complexa – Bacia do Riacho do Saco – Pernambuco.** Universidade Federal Fluminense, *GEOgraphia*, vol: 21, n.46, 2019: mai./ago. ISSN: 2674-8126.

CUNHA, T. J.F. **Solos do Submédio do Vale do São Francisco:** potencialidades e limitações para uso agrícola/Tony Jarbas Ferreira Cunha, Flávio Hugo Barreto Batista da Silva, Maria Sonia Lopes da Silva, Vanderlise Giongo Petrere , Iedo Bezerra S., Manoel Batista de Oliveira Neto , Antonio Cabral Cavalcanti. Petrolina, PE: Embrapa Semi-árido, 2008. 60 p.; 21 cm. (Embrapa Semi-árido. Documentos, 211). ISSN 1808-9992.

DANTAS, J. C. et al. Simulação vazão–erosão usando o modelo Swat para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 34, n. 4, p.816-827, 2015. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/10580> Acesso em: 22 jun.2022.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Rome, FAO – Food and Agriculture Organization, 1979, 193p. (Irrigation and Drainage Paper 33).

DURAES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

DURAES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/853M.PDF>. Acesso em: 16 jun.2022.

EMBRAPA. Argissolos. *In: Sistema brasileiro de classificação de solos*.2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.Cap 5, p.102-118.

EMBRAPA. Cambissolos. *In: Árvore do conhecimento: Bioma Caatinga*. Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g798rt3o02wx5ok0wtedt3n5subswf.html# .Acesso em: 15 ago. 2021.

FARIAS, C. W. L. de A. et al. Impactos das mudanças climáticas e de uso do solo sobre a hidrologia de uma bacia hidrográfica do alto mundaú. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos –ABRHidro, Belo Horizonte, 2021. (ISSN 2318-0358).

FAYEZ A., A. W. Al-Shurafat, **Rainfall-Runoff modeling for Semi-arid and trans-boundary Yarmouk River Basin, Procedia Manufacturing**, Volume 44, 2020, Pages 180-188, ISSN 2351-9789, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.220>. Acesso em: 22 jun.2022

FÉLIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação de processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.3, p.556–569, 2016.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. de. Vegetação e flora da Caatinga. **Cienc. Cult.** [online]. 2018, vol.70, n.4, pp.51-56. ISSN 0009-6725. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602018000400014>. Acesso em: 16 jun. 2022.

FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H.; KOIDE, S. (2013) Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. *In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2013, Bento Gonçalves, Brasil, 8 p.

FIGUEIREDO, E. E. de.; SRINIVASAN, V. S. **Avaliação dos impactos do uso do solo e da influência dos açudes sobre o escoamento para o açude sumé – PB**. Universidade Federal da Paraíba-UFPB.XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999.

FRANCO, A. C. L; OLIVEIRA, D. Y; BONUMÁ, N. B. **Transferência Espaço-temporal de Parâmetros no Modelo SWAT**. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC. 2017.

FUNCH, L., FUNCH, R., HARLEY, R., GIULIETTI, A.M., QUEIROZ, L.P., FRANÇA, F., MELO, E., GONÇALVES, C.N. & Santos, T. 2005. Florestas Estacionais semidecíduais. *In*: F.A. Juncá, L. Funch & W. Rocha (eds). **Biodiversidade e Conservação da Chapada Diamantina**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.

GALATA, A., DEMISSEI, T., LETA, M. Watershed Hydrological Responses to Changes in Land Use and Land Cover at Hangar Watershed, Ethiopia', **Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment**, *11*(1), pp. 1-7, 2020.doi: 10.5829/ijee.2020.11.01.01. Disponível em: https://www.ijee.net/article_104799.html Acesso em: 22 jun. 2023.

GARBOSSA, L.H.P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BRAINSKI, E. & PINHEIRO, A. The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. *In*: **International Swat Conference & Workshops**, 2011, Proceedings... Toledo, Texas A&M University, 2011. p.1- 27. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/conferences/2011>. Acesso em: 22 jun.2022

GONÇALVES, M. J. S. **Gestão quantitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu no Estado da Bahia-Brasil**. Tese (Doutorado Ciências-Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Brasília. Salvador, 2014.

GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA. Elaboração do plano estadual de manejo de águas pluviais e esgotamento sanitário – PEMAPES. Chapada Diamantina: **Revista Geohidro**, 01, volume 12, RDS 3, 165p. 2011. Disponível em: http://www.ceama.mp.ba.gov.br/boletim-informativo/doc_view/3461-elaboracao-do-plano-estadual-de-manejo-de-aguas-pluviais Acesso em: 16 nov. 2022.

GREHS, S. A. **Efeitos da espacialização de propriedades físicas nas respostas hidrológicas da bacia do rio Ibirapuitã**. Porto Alegre, 2003. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HENRIQUES, I. G. N. **Mudança da cobertura da terra e avaliação dos processos hidrossedimentalógicos da bacia representativa de Sumé – João Pessoa**. Monografia (Bacharelado em Geografia) Universidade Federal da Paraíba – UFPB. João Pessoa, 2017.

HUO, A.; HUANG, Z.; CHENG, Y.; LIEW, M. W. V. Comparison of two different approaches for sensitivity analysis in Heihe River basin (China). **Water Supply** 1 February 2020; 20 (1): 319–327. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2019.159>. Acesso em: 16 jun. 2023.

IBGE. **Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil- escala de 1:250.000**. Diretoria de geociências: Coordenação de recursos naturais e estudos ambientais. Rio de Janeiro, 2018.

J. Qi, S.T. Brantley, S.W. Golladay. Simulated irrigation reduction improves low flow in streams—A case study in the Lower Flint River Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Volume 28, 2020, ISSN 2214-5818. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100665>. Acesso em: 16 jun. 2023.

JESUS, T. M. et al. Avaliação temporal do uso e ocupação da terra no alto trecho da bacia do Rio Paraguaçu, Ba. *In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais eletrônicos...* São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/avaliacao-temporal-do-uso-e-ocupacao-da-terra-no-alto-trecho-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraguacu--ba>_Acesso em: 16 jun. 2023.

KUWAJIMA, J.I. **Análise do modelo SWAT como ferramentas de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP).** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LELIS, T. A. et al. Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:623-634, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wPWL3QGcPFb8WNXVc496gRx/>Acesso em: 16 nov. 2022.

LELIS, T.A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, na Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT.** Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa, MG. 2011.178p.

LIMA, A.C.P.; FRANÇA, F.; JESUS, T.B. **Metais pesados no pantanal dos Marimbus, Bahia, Brasil.** Eng Sanit Ambient | v.23 n.3 | maio/jun 2018 | 591-598.

LINHARES, F. M.; VIANNA, p. C. G.; SILVA, a. M.; FERREIRA, t. K. O. Modelagem hidrológica em uma típica bacia da região semiárida do Brasil. João pessoa, PB, dgeoc/ccen/ufpb. **Revista Okara: Geografia em Debate**, v.16, n.2, p. 421-444, 2022. ISSN: 1982-3878. Disponível em: <http://www.okara.ufpb.br> Acesso em: 21 jun.2022.

LINO, J.F.L.; CORSEUIL, C.W.; KOBIYAMA, M.; MALUTTA, S.; UDA, P.K.; BORTOLOTO, N.L. & SANTOS, I. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. *In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 18., Campo Grande, 2009. Anais... Campo Grande, 2009. 20p.

MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho – SC com o modelo SWAT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/96212/302405.pdf> >. Acesso em: 16 jun.22.

MARCON, I. R. **Modelagem e Cenários hidrológicos em bacia representativa da Mata Atlântica no Sul do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2013.

MARIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. Z. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidia sepium*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2573 - 2579, 2008.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; BORNSTERT, A., Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 165-174, 2009

MELO, R. O.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n.2, p. 430-441, 2015. DOI: 10.21168/rbrh.v.20 n.2.p430-441.

MIRANDA, R. de Q.; GALVÍNIO, J. D.; MOURA, M. S. B. de; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Análise espacial do balanço hídrico na Caatinga da Bacia do Rio Pontal. *In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, 20; Simpósio de mudanças climáticas e desertificação no semiárido brasileiro, 5., 2017, Juazeiro, BA. A agrometeorologia na solução de problemas multiescala: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido; Juazeiro: UNIVASF; Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2017.

MIRANDA, R. Q. **Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na caatinga**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Pernambuco- UFP: Recife, 2017.

MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Irrigação. *In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. (Ed.). Cultura do feijoeiro comum no Brasil*. Piracicaba: Potafos, 1996. p.465-522.

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. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2022.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. ESALQ/USP: Piracicaba, 2005.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2005**. Agricultural Research Service. Texas. 476p. 2005.

NETO, M. B. de O; SILVA, M. S. L. **Argissolos Vermelho-Amarelos**. Embrapa Solos. Embrapa 50 anos-Território Mata Sul Pernambucana, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/caracteristicas-do-territorio/recursos-naturais/solos/argissolos-vermelho-amarelos>. Acesso em: 12 ago. 2023.

OLIVEIRA, M. C. S.; SILVA, M.F.O. **Dinâmica Recente da Cafeicultura na BAHIA**: um estudo sobre a produção de cafés especiais na Chapada Diamantina, Bahia. XVI Semana de Economia e II Encontro de Egressos de Economia da Universidade Estadual do Sudoeste Baiano-UESB. Vitória da Conquista, Bahia, 2017.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica**: Aplicação a Bacias Hidrográficas. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE. São José dos Campos, 2003, 158 p.

REZENDE, R. **Fazenda Marimbus**. Disponível em: <https://marimbus.com.br/>. Acesso em: 22 set. 2023.

ROCHA, A. J. D.; COSTA, I. V. G. **Projeto Mapas Municipais - Município de Morro do Chapéu (Ba)**: informações básicas para o planejamento e administração do meio físico. Antônio José Dourado Rocha e Ivanaldo Vieira Gomes da Costa. (Orgs.) — Salvador: CPRM, 1995.

ROCHA, A.K.P., de SOUZA, L.S.B., DE ASSUNÇÃO Montenegro, A.A. et al. Revisiting the application of the SWAT model in arid and semi-arid regions: a selection from 2009 to 2022. **Theor Appl Climatol** (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04546-6>. Acesso em: 22 jun. 2022.

RODRIGUES, T.; TOMMASELLI, J. T. G.; ARROIO JUNIOR, P. P. Mapeamento da vulnerabilidade aos processos erosivos a partir de métodos multicriteriais: um estudo sobre as condições ambientais da Bacia Hidrográfica da Represa Laranja Doce, Martinópolis (SP). **Revista Formação**, v. 25, n. 45, p. 67-91, 2018. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/5310> Acesso em: 16 nov. 2022.

ROQUETTE, J. G. **Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono**. Ci. Fl., v. 28, n. 3, jul. - set., 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/98ZtkfBCVL78S3RqqTc7wGw/abstract/?lang=pt> ? Acesso em: 16 jun. 2022

SALLES, L. de A. **Calibração e validação do modelo Swat para a predição de vazões na Bacia do Ribeirão Pipiripau**. 2012. XV, 114 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SANTOS, A.C. & Caramaschi, E.P. 2008. Os peixes dos Marimbus. In: L. Funch, R. Funch & L. Queiroz (eds.). **Serra do Sincorá: Parque Nacional da Chapada Diamantina**. Radami, Feira de Santana, pp. 129-141.

SANTOS, E.S.; CUNHA, A. C. Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP- Brasil. **Biota Amazônia Open Journal System**: Macapá, v. 5, n. 3, p. 88-97, 2015. ISSN 2179-5746. Disponível em: <https://periodicos.unifap.br/index.php/biota/article/download/1723/v5n3p88-97.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

SANTOS, J.T.S. et al. **O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA**. REGA, Porto Alegre, v. 15, e3, 2018.

SANTOS, J.T.S. et al. **O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos**. REGA, Porto Alegre, v. 15, e3, 2018.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos –Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. RBGF- **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife-PE, Vol.2, n.03, set-dez, 2009, 01-19. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/viewFile/232624/26638> Acesso em: 06 nov.22.

SANTOS, M. C. dos. Solos do semiárido do Brasil. **Cadernos do Semiárido: riquezas & oportunidades** / Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco. Recife: EDUFRPE. v. 10, n. 10 (mar. /abr. 2017).

SARTORI, A. et al. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 10 n.4 Out/Dez 2005, p. 05-18. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=440> Acesso em: 16 nov. 2022.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**, 70: 1569-1578, 2006. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2005.0117> Acesso em: 16 jun. 2022.

SCHWENGBER, D. R. et al. **Mandioca**: Recomendações para o plantio em Roraima. EMBRAPA Circular Técnica, N. 05, V. 30, 2005.

SCOTT-SHAW, B.C.; HILL, T.R.; GILLHAM, J.S. **Calibration of a modelling approach for sediment yield in a wattle plantation, KwaZulu-Natal, South Africa**. *Water SA*, v.46 (2 April), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17159/wsa/2020.v46.i2.8232> Acesso em: 17 jun. 2022.

SILVA, A. M. **Análise de múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do rio salgado, semiárido nordestino**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba- UFPB, Paraíba, 2019.

SILVA, C. de M. **Efeito da condutividade hidráulica de superfícies impermeáveis na geração de escoamento superficial em área urbana**. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) Campus UFPB- Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2018.

SILVA, G. J. F. da. **Modelagem dos componentes do balanço hídrico e monitoramento da seca em bacia hidrográfica no bioma Caatinga**. 2020. 180 f.il. Tese (Doutorado em: Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal da Paraíba-UFPB, João Pessoa, UFPB/CT.

SILVA, L. B. P. et al. **Evapotranspiração de um cerrado denso e uma pastagem plantada**. Embrapa Cerrados,2003. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/24326/1/p2003_12.pdf . Acesso em: 02 mar. 2023.

SILVA, L. P. E. 2007. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal da Paraíba- UFPB/CT, 114p.

SIQUEIRA, M. da S. et al. Impactos das alterações de uso e ocupação do solo considerando a variabilidade climática e hidrológica na região do semiárido. **Rev.Bra.de Gestão Ambiental** (Pombal -PB -Brasil), v. 11, n.01, p.139-149, jan-dez, 2017.

SOUZA, A. L et al. Estrutura fitossociológica, estoques de volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em floresta estacional semidecidual. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.1, p.169-179, 2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rarv/a/rjDk9BNNHz6tMRX3GTLWsGG/> Acesso em: 16 jun. 2022.

SOUZA, F. A. S. et al. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). **Ambiência-Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. Guarapuava (PR) v.12 n.2 p. 707 - 719 Maio/Ago. 2016 ISSN 2175 – 9405 DOI:10.5935/ambiencia.2016.02.14.

SOUZA, W. F. L. et al. Impactos de Barragens sobre os Fluxos de Materiais na Interface Continente-Oceano. **Rev. Virtual Quim.** Volume 3, n. 2, pp. 116-128, 2011. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/viewFile/144/171> Acesso em: 17 jun. 2022.

STRAUCH, M.; BAKKER, F. I.; ARAUJO, A.; LIMA, J. E. F. W.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Assessing the hydrologic impact of conservation management practices for the Pípiripau River basin, Central Brazil, using SWAT. *In: International Specialized Conference on Watershed and River Basin Management*, 12., 2011, Recife. Proceedings [...]. Recife: IWA, 2011. p. 1-12.

SUJEET DESAI, D.K. SINGH, Adlul Islam, A. Sarangi. **Multi-site calibration of hydrological model and assessment of water balance in a semi-arid river basin of India, Quaternary International**, Volume 571,2021, Pages 136-149, ISSN 1040-6182, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.11.032>. Acesso em: 23 jun. 2022.

TEIXEIRA, L. F. C. **Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo hidrológico SWAT em função de diferentes características de bacias hidrográficas**. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

TIBÚRCIO, I. M.; SILVEIRA, N. T.; SANTOS, T.O.; MIRANDA, R.Q.; GALVÍNCIO, J.D. Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.16, n.03 (2023) 1657-1670.

TOLENTINO JR, J. B. **Irrigação Pressurizada** – Disciplina Curso de Agronomia. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Centro de Ciências Rurais (CCR), 2022. Disponível em: <https://irrigacao.tolentino.pro.br/> . Acesso em: 31 mar. 2023.

TRENTIN, R., LAURENT, F., & ROBAINA, L. E. DE S. (2023). **Vazão e Balanço Hídrico Relacionado a Mudanças no Uso da Terra em uma Bacia Hidrográfica de Médio Porte no Bioma Pampa do Brasil**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), 873–893. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p873-893>.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 4ª Edição. ABRH: Porto Alegre, 943 p., 2009.

TUCCI, C.E. M. **Gestão da Drenagem Urbana. Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL)**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 2012. 54 f. Brasília, 2012.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ABRH: Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos matemáticos em hidrologia e hidráulica**. 1. ed. Rio de Janeiro: RBE - Revista Brasileira de Engenharia, 1986. v. 3. 600p.

VALE, R. M. C; RIOS, I. Q. Relevo e produção do espaço na depressão sertaneja meridional-Bahia. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 6, número especial (3), p. 203 - 216, fevereiro. 2016.

VALÉRIO, E. L. S. **Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, Ba**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, 2014.

VALÉRIO, e. L. S. **Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, Ba**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, 2014.

VEIGA, A. M. **Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do Córrego Samambaia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Programa de Pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás. 2014. 125p.

VIANA, Jussara F. de S. **Impactos das mudanças do uso da terra sobre o balanço hidrossedimentológico: bases para gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia do Rio Pirapama**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco – Recife, 2019.

VILLAMIZAR S. R.; PINEDA S.M.; CARRILLO G.A. **The Effects of Land Use and Climate Change on the Water Yield of a Watershed in Colombia**. *Water*. 2019; 11(2):285. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11020285>. Acesso em: 23 abr, 2022.

VIRGENS, A. P. et al. Biomassa de espécies florestais em área de caatinga arbórea. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 37, n. 92, p. 555-561, out./dez. 2017, out./dez. 2016. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1465> Acesso em: 16 jun. 2022.