



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

**ANÁLISE DE MÚLTIPLOS CENÁRIOS FUTUROS CLIMÁTICOS
E DE USO E COBERTURA DA TERRA NA ESTIMATIVA DE
VAZÕES NA BACIA DO RIO SALGADO, SEMIÁRIDO
NORDESTINO**

Por

Alexandro Medeiros Silva

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Novembro de 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

Alexandro Medeiros Silva

**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 submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa – Paraíba
Novembro de 2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Alexandro Medeiros.

ANÁLISE DE MÚLTIPLOS CENÁRIOS FUTUROS CLIMÁTICOS E DE
USO E COBERTURA DA TERRA NA ESTIMATIVA DE VAZÕES NA
BACIA DO RIO SALGADO, SEMIÁRIDO NORDESTINO / Alexandro
Medeiros Silva. - João Pessoa, 2019.

113 f.

Orientação: Richarde Marques da Silva Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Modelagem hidrológica. 2. LCM. 3. MCA. 4. SWAT. I.
Silva, Richarde Marques da Silva. II. Título.

UFPB/BC

“Análise de Múltiplos Cenários Futuros Climáticos e de Uso e Cobertura da Terra na Estimativa de Vazões na Bacia do Rio Salgado, Semiárido Nordestino.”

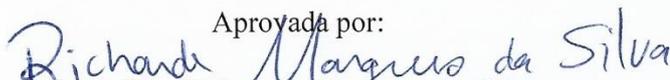
por

Alexandro Medeiros Silva

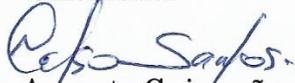
Tese apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN-UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente.

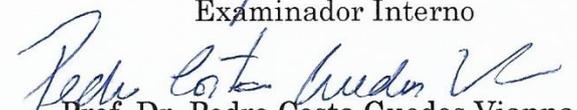
Aprovada por:


Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

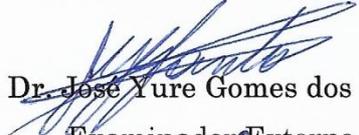
Orientador


Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

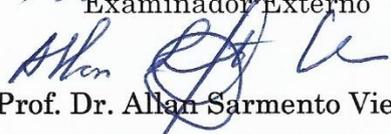
Examinador Interno


Prof. Dr. Pedro Costa Guedes Vianna

Examinador Interno


Prof. Dr. José Yure Gomes dos Santos

Examinador Externo


Prof. Dr. Allan Sarmiento Vieira

Examinador Externo

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Curso de Mestrado e Doutorado em Geografia**

Novembro/2019

Dedico a minha família e aos meus amigos que estiveram ao meu lado quando mais precisei. Sem vocês nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial aos meus pais, Maria Saete Medeiros Silva e Sérgio Antônio da Silva, e ao meu irmão, Leandro Medeiros que sempre me ajudaram e apoiaram ao longo da minha jornada desde a graduação, prestando sempre todo o suporte que estava ao seu alcance e que sem dúvidas não teria conseguido concluir mais essa etapa da minha vida sem a ajuda deles.

Agradeço ao amigo e orientador, o Prof. Dr. Richarde Marques da Silva, que acompanha a minha formação desde a minha graduação por ter confiado e acreditado neste trabalho. Sem dúvidas eu não teria chegado até aqui a sua ajuda e dedicação, muito obrigado por tudo.

Ao amigo Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos, que sempre esteve presente na minha trajetória acadêmica, sempre me ajudando e me ensinando em cada conversa que tivemos ao longo desses anos, muito obrigado.

Agradeço também a todos os amigos que estiveram comigo ao longo dessa jornada, em especial a Jorge Casé, Franklin Linhares, Victor Hugo, João Filadelfo e José Yure que sempre estiveram comigo em todos os momentos. Agradeço também a todos os amigos que o LEPPAN me deu, Ana Paula, Glauciene, Leonardo, Tatiane e todos os outros que passaram por lá.

Aos membros da banca professores Celso, Pedro, José Yure e Allan Sarmiento, pelas valorosas contribuições para a melhoria desta Tese de Doutorado.

Agradeço a CAPES pela a bolsa concedida ao longo do doutorado.

A FUNCEME, ANA, CPRM, UFPB, pelo o apoio à realização desta pesquisa.

A todos que me ajudaram direta ou indiretamente na realização desse trabalho. De forma geral, a todos que sempre estiveram ao longo da minha vida ao meu lado.

RESUMO

Entender as mudanças no comportamento da vazão causada pelas mudanças climáticas e pelas alterações do uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas é vital, sobretudo, para as bacias localizadas em ambiente semiárido. Face ao exposto, esse trabalho tem por objetivo utilizar de forma conjunta a modelagem hidrológica, modelagem de cenários futuros de uso e cobertura do solo e as previsões climáticas para identificar as possíveis vulnerabilidades hídricas futuras na bacia hidrográfica do Rio Salgado - BHRS. Para alcançar esse objetivo foram realizadas as seguintes etapas metodológicas: (a) análise das alterações no uso e cobertura da terra na BHRS entre os anos de 1985–2018; (b) predição do uso e cobertura da terra futuro utilizando o modelo LCM para o ano de 2050; (c) análise dos múltiplos cenários dos modelos de circulação atmosférica; (d) calibração e validação do modelo SWAT para o período de 1986–2017; (e) estimativa da vazão futura para a BHRS utilizando o acoplamento entre esses modelos para os anos de 2030 a 2060. Os resultados obtidos durante a etapa de calibração e validação do modelo SWAT foram considerados bons pelos índices R^2 , Nash, mostrando que o modelo possui um bom ajuste as características da bacia. Com relação ao modelo de predição de uso e cobertura da terra, o LCM a validação também foi considerada como satisfatória com um valor de Kappa na ordem de 0,77. A predição para o ano de 2050 apontou um aumento significativo nas áreas de pastagem e agricultura quando comparados ao ano de 2018, com 78% e 38%, respectivamente. Também foram identificadas diminuições nas áreas de vegetação com -19% nas áreas de formação florestal e -33% nas de formação savânica. Foram selecionados dois modelos de circulação atmosférica que apresentaram os comportamentos mais distintos dos dados históricos, o modelo IPSL-CM5A-LR e o modelo NoerESM1-m. Por fim, a modelagem hidrológica futura da bacia foi realizada para oito cenários unindo as predições do uso e cobertura da terra, bem como os cenários dos modelos climáticos. Para o modelo NoerESM1-m identificou-se na maioria dos cenários uma diminuição na vazão média mensal que pode chegar aos 41%, impactando consideravelmente a disponibilidade hídrica da bacia. Em contrapartida, utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR houve uma previsão de aumento na vazão média mensal na entre 167% a 1045%.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, LCM, MCA, SWAT.

ABSTRACT

Understanding the changes in flow behavior caused by climate change and changes in land use and cover in watersheds is vital, especially for watersheds located in a semi-arid environment. Given the above, this work aims to use together the hydrological modeling, modeling future scenarios of land use and cover and climate forecasts to identify possible future water vulnerabilities in the Rio Salgado River Basin - BHRS. To achieve this objective, the following methodological steps were performed: (a) analysis of changes in land use and land cover in the BHRS between 1985 - 2018; (b) prediction of future land use and land cover using the LCM model for the year 2050; (c) analysis of the multiple scenarios of atmospheric circulation models; (d) calibration and validation of the SWAT model for the period 1986–2017; (e) estimation of future flow to BHRS using the coupling between these models for the years 2030 to 2060. The results obtained during the calibration and validation stage of the SWAT model were considered good by the R^2 , Nash indices, showing that the model has a good fit to the basin characteristics. Regarding the land use prediction model, the LCM validation was also considered satisfactory with a Kappa value of 0.77. The prediction for the year 2050 pointed to a significant increase in pasture and agriculture when compared to 2018, with 78% and 38%, respectively. Decreases were also identified in vegetation areas with -19% in forested areas and -33% in savannah areas. Two models of atmospheric circulation that presented the most distinct behaviors from historical data were selected, the IPSL-CM5A-LR model and the NoerESM1-m model. Finally, future hydrological modeling of the basin was performed for eight scenarios linking land use and land cover predictions as well as climate model scenarios. For the NoerESM1-m model, in most scenarios, a decrease in the average monthly outflow that could reach 41% was identified, considerably impacting the water availability of the basin. In contrast, using the IPSL-CM5A-LR model, there was a forecast of increase in monthly average flow between 167% and 1045%

Keywords: Hydrological modeling, LCM, MCA, SWAT.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.2. Objetivos..... | 19 |
| 1.2.1. Gerais..... | 19 |
| 1.2.2. Específicos..... | 19 |
| 1.3 Hipótese..... | 19 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 20 |
| 2.1 Paisagem como categoria de análise geográfica..... | 20 |
| 2.2 Semiárido brasileiro: vulnerabilidade hídrica e a importância dos reservatórios. | 21 |
| 2.3 Modelos de previsão Climática..... | 25 |
| 2.4 Predição de mudanças no uso e cobertura do solo..... | 27 |
| 2.5 Modelagem hidrológica na estimativa da vazão..... | 31 |
| 3. A ÁREA DE ESTUDO..... | 33 |
| 3.1 Localização Geográfica..... | 33 |
| 3.2 Geologia e Clima..... | 34 |
| 3.3 Solos e Relevo..... | 36 |
| 3.4 Uso e cobertura da terra..... | 36 |
| 3.6 Águas Superficiais..... | 37 |
| 3.7 Águas subterrâneas..... | 39 |
| 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 41 |
| 4.1 Obtenção dos dados de precipitação e vazão..... | 41 |
| 4.2 Geração de Imagens Classificadas e Predição da Mudança do Uso e Ocupação da terra pelo <i>Land Change Modeler</i> (LCM)..... | 43 |
| 4.2.1 Previsão do potencial de transição..... | 46 |
| 4.2.2 Análise da mudança na cobertura do solo e definição das transições..... | 46 |
| 4.2.3 Teste e seleção das variáveis explanatórias..... | 46 |
| 4.3 Cenários Climáticos Futuros..... | 48 |

| | |
|--|-----|
| 4.4 Modelos de mudanças climáticas | 48 |
| 4.5 Cálculo do balanço hídrico | 49 |
| 4.5.1 Construção do banco de dados | 49 |
| 4.6 Módulos do SWAT..... | 55 |
| 4.7 Calibração de parâmetros do modelo SWAT | 61 |
| 4.8 Índices de desempenho para avaliação do desempenho do modelo SWAT..... | 64 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 65 |
| 6.1 Análise das alterações no uso e cobertura do solo para a BHRS | 65 |
| 6.2 Modelagem futura do uso e cobertura da terra | 71 |
| 6.3 Análise dos cenários de mudanças climáticas | 78 |
| 6.4 Calibração e validação da vazão utilizando o modelo SWAT | 87 |
| 6.5 Modelagem futura da vazão | 92 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 101 |
| 7. RECOMENDAÇÕES..... | 102 |
| REFERÊNCIAS | 103 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Distribuição do Semiárido no território brasileiro..... | 23 |
| Figura 2 - Procedimentos metodológicos utilizados na predição dos cenários de uso do solo. | 30 |
| Figura 3 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Salgado..... | 33 |
| Figura 4 - Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Salgado. | 35 |
| Figura 5 - Classes de vegetação existentes na bacia hidrográfica do Rio Salgado. | 37 |
| Figura 6 - Principais reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Salgado. | 38 |
| Figura 7 - Localização dos principais sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Salgado. | 40 |
| Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos da pesquisa. | 41 |
| Figura 9 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste estudo..... | 43 |
| Figura 10 - Metodologia para predição do uso e ocupação do solo para t4 (2050) para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa usando o LCM do Idrisi TerrSet..... | 45 |
| Figura 11 - Espacialização da declividade na bacia do Rio Salgado. | 51 |
| Figura 12 - Espacialização dos tipos de solo presentes na bacia do Rio Salgado. | 52 |
| Figura 13 - Espacialização dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado. | 54 |
| Figura 14 - Evolução do uso e cobertura do solo da BHRS..... | 66 |
| Figura 15 - Áreas de uso e cobertura do solo inalteradas entre 1985 e 2018 na BHRS. | 70 |
| Figura 16 - Ganhos e perdas de área em km ² para cada tipo de uso e cobertura da terra. | 72 |
| Figura 17 - Transições em km ² dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra na BHRS. | 73 |
| Figura 18 - Mapas de uso e cobertura da terra utilizados pelo modelo LCM – (a) Mapa base 1985 (t1); (b) Mapa base 2000 (t2); Mapa de referência 2015 (t3); (d) Mapa simulado para validação 2015. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 19 - Cenário de uso e cobertura da terra para o ano de 2050. | 77 |
| Figura 20 - Espacialização da malha de pontos dos modelos climáticos globais. | 79 |
| Figura 21 – Variabilidade anual da precipitação prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRS | 80 |
| Figura 22 - Variabilidade anual da temperatura máxima prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRS | 84 |
| Figura 23 - Variabilidade anual da temperatura mínima prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRS | 86 |
| Figura 24 - Estimativa das vazões para o posto Icó (calibração e validação do modelo SWAT). | 88 |
| Figura 25 - Estimativa da vazão para o posto Lapinha (calibração e validação do modelo SWAT). | 90 |
| Figura 26 - Estimativa da vazão para o posto Podimirim (calibração e validação do modelo SWAT). | 92 |
| Figura 27 – Estimativa da vazão futura utilizando o modelo NoerESM1-m para os postos (a) Icó, (b) Lapinha e (c) Podimirim..... | 93 |
| Figura 28 - Estimativa da vazão futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para os postos (a) Icó, (b) Lapinha e (c) Podimirim | 95 |
| Figura 29 - Produtividade de água anual média para o período histórico | 98 |
| Figura 30 - Produtividade de água anual média futura utilizando o modelo NoerESM1-m para diferentes cenários – (a) RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0 e (d) RCP 8.5..... | 99 |
| Figura 31 - Produtividade de água anual média futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para diferentes cenários – (a) RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0 e (d) RCP 8.5.. | 100 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Principais modelos de previsão do uso e cobertura da terra..... | 29 |
| Tabela 2 - Principais reservatórios da bacia do Rio Salgado e sua capacidade de acumulação | 39 |
| Tabela 3 - Lista de postos pluviométricos utilizados | 42 |
| Tabela 4 - Informações dos postos fluviométricos utilizados | 42 |
| Tabela 5 - Descrição dos modelos de circulação atmosféricos utilizados..... | 49 |
| Tabela 6 - Estações climatológicas utilizadas | 50 |
| Tabela 7 - Distribuição das classes de declividade na bacia do rio Salgado | 51 |
| Tabela 8 - Distribuição dos tipos de solo na bacia do rio Salgado..... | 53 |
| Tabela 9 - Distribuição dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado . | 54 |
| Tabela 10 - Lista dos parâmetros calibrados pelo SWAT-CUP | 63 |
| Tabela 11 – Classificação do desempenho do modelo SWAT..... | 64 |
| Tabela 12 - Variação anual do uso e cobertura do solo na BHRS..... | 68 |
| Tabela 13 - Área da BHRS que não foram alteradas entre 1985 e 2018..... | 71 |
| Tabela 14 - Lista das variáveis exploratórias utilizadas para a modelagem do LCM.... | 74 |
| Tabela 15 - Diferenças das áreas de uso e cobertura da terra para a validação do modelo LCM. | 76 |
| Tabela 16 - Áreas das classes de uso e cobertura da terra simuladas para 2050..... | 78 |
| Tabela 17 – Precipitação média anual para diferentes cenários e modelos climáticos .. | 81 |
| Tabela 18 – Diferença entre a precipitação média mensal do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários | 82 |
| Tabela 19 – Diferença entre a média mensal da temperatura máxima do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários | 84 |
| Tabela 20 - Diferença entre a média mensal da temperatura mínima do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários | 85 |
| Tabela 21 - Resultado da calibração dos parâmetros no SWAT-CUP | 87 |

| | |
|---|----|
| Tabela 22 - Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Icó | 89 |
| Tabela 23- Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Lapinha | 90 |
| Tabela 24 - Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Podimirim | 91 |
| Tabela 25 - Média da vazão simulada futura utilizando o modelo NoerESM1-m para a BHRS..... | 94 |
| Tabela 26 - Diferença entre a média da vazão futura simulada utilizando o modelo NoerESM1-m com os dados históricos | 94 |
| Tabela 27 - Vazão média futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para a BHRS .. | 96 |
| Tabela 28 - Diferença entre a média da vazão futura simulada utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR com os dados históricos | 97 |

1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica na região semiárida é o principal problema a ser enfrentado pela população e o gerenciamento dos recursos hídricos durante os períodos de seca é o maior desafio para os tomadores de decisão. Esse problema é ainda mais sentido nas áreas do Nordeste que possuem o embasamento cristalino, que prejudicam o armazenamento e a produção de água na região, pois a Geologia e o clima são os fatores controladores que interagem com a vegetação e os solos.

Assim, entender os impactos futuros do uso e ocupação da terra e cenários climáticos são vitais para o conhecimento da produtividade de água em regiões sedimentares e cristalinas, que são úteis para a tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos. Segundo Wang et al. (2014), as mudanças climáticas e no uso e cobertura da terra são os dois fatores ambientais que mais impactam na hidrologia de uma bacia hidrográfica. O principal problema que este estudo se propõe a estudar é o comportamento futuro das vazões em uma bacia do semiárido do Nordeste brasileiro decorrentes de estimativas de cenários climáticos estimados por modelos de circulação atmosférica (MCA) e de predição de uso e cobertura da terra.

As constantes interações entre a variabilidade do clima e as modificações no uso e cobertura da terra desempenham um papel importante no controle da precipitação, infiltração do solo, evapotranspiração e outras variáveis hidrológicas que atuam na produtividade de água em uma bacia hidrográfica (JIN et al., 2019). Mais especificamente, as mudanças climáticas afetam as vazões sazonais e anuais (quantidade e disponibilidade), as características hidrológicas de uma bacia (secas e enchentes), fluxo de sedimentos, a morfologia dos rios, e, conseqüentemente, os ecossistemas fluviais (SHRESTHA et al., 2018).

A região semiárida do Nordeste do Brasil se caracteriza por uma grande variabilidade espacial e temporal da precipitação. Essa característica implica em vários problemas, ambientais e socioeconômicos. Dentre os problemas ambientais estão os eventos extremos de seca, que acarretam sérios problemas nos recursos hídricos. No que tange as questões socioeconômicas, mais recentemente, a baixa disponibilidade de água nos reservatórios da região semiárida, vem causando graves conseqüências para a população local.

Nesse sentido, entender as mudanças nas vazões causada pelas mudanças climáticas e alterações do uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas é vital (ZHOU et al., 2013), sobretudo, para as bacias hidrográficas localizadas em ambiente semiárido, como é o caso da bacia hidrográfica do Rio Salgado, localizada no estado do Ceará, que historicamente apresenta problemas de estiagem prolongada, e com isso, possui a necessidade de uma gestão da água e do uso e cobertura da terra para o futuro.

Atualmente, poucos estudos são realizados para a predição de vazão, recarga de aquíferos, evapotranspiração, produção de sedimentos em bacias da região semiárida do Nordeste do Brasil (PILZ et al., 2018). Essa problemática deve-se ao fato do clima da região semiárida brasileira apresentar grande variabilidade em todas as escalas de tempo (anuais, mensais, sazonais, e multi-decadais) (TORRES et al., 2017), e também pela necessidade de altos investimentos financeiros para montar os sistemas de monitoramento em campo e de previsão na maioria das bacias hidrográficas do mundo. Milewski et al. (2009) explicam que essa situação ocorre por conta da grande quantidade de recursos que são necessários para construir e manter esses sistemas. Com isso, caracterizar e monitorar bacias e reservatórios torna-se uma tarefa ainda mais difícil.

Para isso, a utilização de dados dos MCAs inseridos em modelos hidrológicos são métodos valiosíssimos para a predição do comportamento da hidrologia futura de uma bacia, pois oferecem informações e dão suporte para o gerenciamento dos recursos hídricos na tomada de decisão (DUAN et al., 2019). Assim, o acoplamento desse conjunto de dados e ferramentas acoplados ao Sistemas de Informações Geográficas, são meios valiosos para se estimar variáveis hidrológicas posteriores no tempo e no espaço.

Deve-se destacar ainda que, mais recentemente, para uma análise integrada de uma bacia hidrográfica de maneira mais ampla sobre o comportamento da hidrologia, além do acoplamento unidirecional entre modelos hidrológicos e MCAs, um outro tipo de modelo vem sendo utilizado, que são os de predição do uso e cobertura da terra. Esses modelos de predição de alterações de uso e cobertura da terra possuem a função de gerar cenários da disposição futura dos tipos de cobertura e uso da terra, devido as alterações realizadas pelo ser humano na bacia hidrográfica (GHUZA et al., 2018).

Nos últimos anos, diversos estudos vêm utilizando modelos hidrológicos, de mudanças de uso e cobertura do solo e cenários climáticos para prever as condições hidrológicas de várias partes do mundo (CORBARI et al., 2019; KIM et al., 2018; MUHAMMAD et al., 2019; VOROGUSHYN et al., 2019). Dentre os modelos hidrológicos mais utilizados para essa finalidade está o *Soil and Water Assessment Tool*

(SWAT) (Arnold et al., 1998), que vem sendo aplicado para simular todos os componentes do balanço hídrico no solo, produção de sedimentos e mensurar a qualidade da água em bacias não instrumentadas (BONUMÁ et al., 2013).

Recentemente, diversas aplicações do SWAT foram realizadas em vários países, como na China (ZHANG et al., 2019), Índia (PATI et al., 2018), Estados Unidos (GUO et al., 2018; KANNAN et al., 2019; PARAJULI et al., 2018), oeste da África (POMÉON et al., 2018), Camboja (ANG e OEURNG, 2018), Etiópia (DUAN et al., 2019) e Colômbia (HOYOS et al., 2019). No Brasil, vários estudos foram realizados utilizando o SWAT nos últimos anos (BRIGHENTI et al., 2019; HERNANDES et al., 2018; MEIRA NETO et al., 2018; SANTOS et al., 2018). Para o Nordeste, as aplicações são voltadas principalmente para a estimativa de vazão e produção de sedimentos (ANDRADE et al., 2017; DANTAS et al., 2015; MAGALHÃES et al., 2018; SANTOS et al., 2015). Entretanto, ainda são poucos os trabalhos que buscam elaborar cenários de uso e cobertura do solo que otimizem a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, se utilizando da integração de modelos hidrológicos, os modelos de previsão de uso do solo e as projeções climáticas.

Dentre os modelos existentes para a estimativa das alterações no uso e cobertura do solo, destaca-se o *Land Change Modeler* – LCM (EASTMAN et al., 2006) como um dos modelos mais utilizados mundialmente nas pesquisas ambientais, com estudos realizados na Índia (MISHRA et al., 2014, nos Estados Unidos (CHENG e DING, 2016) e na Jordânia (KHAWALDAH, 2016). No Brasil o LCM foi utilizado em áreas contrastantes, na Amazônia (DEUS, 2013), em São Paulo (ZANATA, 2014), Minas Gerais (LUIZ, 2014), Pernambuco (XAVIER e SILVA, 2018) e Paraíba (Silva et al., 2020).

Um dos principais pontos positivos do LCM é que além de ser um modelo completamente integrado em um sistema de informações geográficas, o TerrSET, ele disponibiliza três metodologias distintas para a estimativa dos cenários futuros de uso e cobertura da terra, a saber: (a) Rede Neural *Multi-Layer Perceptron* (RNMLP), (b) Algoritmo de aprendizagem baseado em instâncias ponderadas por similaridade (*Similarity Weighted Instance Based Machine Learning Algorithm* – *SimWeight*), e (c) Regressão Logística (RL).

Com relação as aplicações utilizando o modelo SWAT acoplado a modelos de mudança de uso e cobertura do solo e cenários climáticos são encontrados em número muito menor quando comparado com as aplicações isoladas do modelo SWAT

(LAMPARTER et al., 2018; PEREIRA et al., 2016; SILVA et al., 2017), principalmente para a região Nordeste do Brasil (OLIVEIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2019).

Face ao exposto, esse trabalho tem por objetivo utilizar de forma conjunta a modelagem hidrológica, modelagem de cenários futuros de uso e cobertura do solo e as previsões climáticas para identificar as possíveis vulnerabilidades hídricas futuras da bacia do rio Salgado no estado do Ceará.

A escolha dessa bacia, deve-se ao fato de ser uma das sub-bacias da bacia do rio Jaguaribe, responsável por abastecer toda a região metropolitana de Fortaleza, capital do Estado. Além disso, a bacia do rio Salgado possui uma característica geológica distinta da maioria das bacias do semiárido nordestino, pois apresenta grandes depósitos sedimentares que representam 43% de toda a bacia.

Essa característica que permite uma análise mais efetiva de como as modificações futuras no uso e cobertura da terra, associadas as previsões climáticas de MCAs afetarão a disponibilidades hídrica da bacia, tendo em vista, que será possível analisar esses efeitos, tanto nas porções de embasamento cristalino (mais comum na região semiárida) quanto as áreas sedimentares da bacia.

Além de predizer os efeitos das mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra, a utilização em conjuntos desses três tipos de modelos, permite a propor e avaliar cenários ótimos de uso e cobertura do solo para a bacia, tendo em vista, propiciar um aumento da disponibilidade hídrica da região em estudo. Desta forma, avaliar de forma conjunta a influência dos cenários de mudanças climáticas e de uso e cobertura do solo utilizando a modelagem hidrológica fornecerá uma importante ferramenta que auxiliará no manejo de bacias hidrográficas na região semiárida do Brasil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Gerais

Desenvolver cenários de vazão considerando as mudanças climáticas e no uso e cobertura da terra para a bacia do Rio Salgado - CE.

1.2.2. Específicos

- Avaliar as mudanças no uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado para o período de 1985 a 2018.
- Estimar o uso e cobertura da terra futura para a bacia do Rio Salgado para o ano de 2050.
- Analisar os cenários climáticos de diferentes modelos de circulação atmosférica para a região da bacia do Rio Salgado.
- Estimar a vazão para a bacia do Rio Salgado no período de 2030 a 2060 utilizando cenários futuros de uso e cobertura do solo e climáticos utilizando o SWAT.

1.3 Hipótese

A disponibilidade de recursos hídricos para usos múltiplos, com ênfase na disponibilidade de água na região semiárida, é questão de mais alta relevância e depende de aspectos edáficos, hidrológicos, ambientais e de gestão. As alterações no uso e cobertura do solo são fatores determinantes para a disponibilidade hídrica de uma região, bem como, com relação aos processos erosivos de uma bacia, sobretudo em ambientes semiáridos com formações litológicas distintas.

Nesse sentido, a hipótese norteadora desse estudo está pautada em que o acoplamento entre modelos hidrológico, estimativa de cenários de uso da terra e de circulação atmosférica podem ser utilizados para a identificação das potencialidades hídricas de águas superficiais em áreas geológicas contrastantes na porção semiárida do Nordeste do Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Paisagem como categoria de análise geográfica

Todo estudo geográfico deve ser pautado sob a ótica de umas das categorias de análise da Geografia, sendo a categoria definida de acordo com o propósito e o objeto de cada pesquisa. Nesse sentido, a análise espacial necessita de um entendimento detalhado das categorias espaciais de análise, no que diz respeito a seus significados, bem como das possibilidades de uso de cada uma delas (LOPES, 2012).

Para Cabral (2007), a Geografia possui duas formas emblemáticas de análise espacial: de um lado situa-se a maior parte dos estudos, onde a análise consiste na descrição das formas físicas (morfologias) e/ou ambientais de uma determinada região; de outro as análises são pautadas no espaço como elemento ativo na organização social. Com isso, cada vez mais é necessário promover a interpretação dos fenômenos através de uma renovada análise espacial.

O conceito de paisagem para Geografia possui dois momentos distintos ao longo do tempo: em certo momento foi visto como o conceito capaz de fornecer a identidade à Geografia; em outro foi sendo deixado de lado, assumindo uma posição secundária, graças a ênfase dada as categorias como espaço, região, território e lugar (CABRAL, 2002).

A categoria paisagem, em linhas gerais, esteve e ainda está muito ligada a ideia das formas visíveis. Mas, a partir das décadas de 60 e 70 os estudos da paisagem voltam a ganhar força sob duas perspectivas: a cultural e a sistêmica. Para a perspectiva cultural, a paisagem está referenciada para o sentido de percepção espacial, sendo o entremeio do mundo das coisas e o da subjetividade humana. Já para a perspectiva sistêmica, a paisagem pode ser entendida como sendo o resultado de uma combinação dinâmica e instável, de elementos físicos, biológicos e humanos (LOPES, 2012).

Sob essa ótica Rosolém e Archela (2010) apontam que a pesquisa ambiental em Geografia tem por objetivo entender as relações entre a sociedade e a natureza, no qual deve ser analisada a partir do método sistêmico, por meio dos elementos que compõem a paisagem geográfica, resultando em uma unidade dinâmica e em suas interrelações dos elementos físicos, biológicos e antrópicos.

É sob essa perspectiva que esse estudo se utilizará dessa categoria geográfica como base nas análises das alterações ocorridas no uso e cobertura da terra. Evidenciando

essas alterações como sendo o resultado entre as relações sociedade e natureza. Além disso, partindo da análise sistêmica e integrada dos elementos que compõem a paisagem é possível prever as alterações futuras da paisagem, equacionando tantos os interesses culturais, sociais, econômicos, bem como, os interesses ecológicos, com base nos modelos preditivos de uso e cobertura da terra.

2.2 Semiárido brasileiro: vulnerabilidade hídrica e a importância dos reservatórios

A região Semiárida do Brasil abrange nove Estados da região Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) e o norte do Estado de Minas Gerais (Figura 1). A região semiárida brasileira é a maior do mundo, possui uma área de 969.589,4 km², que corresponde a cerca de 18% do território nacional, abrangendo o total de 1.133 municípios, no Nordeste o semiárido abrange 53% de toda a sua extensão. Essa região geográfica inclui as localidades que atendem a pelo menos um destes critérios: a) precipitação média anual inferior a 800 milímetros; b) índice de aridez de até 0,5 e; c) risco de seca maior que 60% (SUDENE, 2017).

Segundo Rebouças (1997), o balanço hídrico no semiárido brasileiro é similar ao observado em outras regiões isoclimáticas do planeta, como Israel, que tem uma pluviometria média variando entre 800 mm/ano no Norte e 30 mm/ano no Sul. Todavia, o semiárido brasileiro diferencia-se dos demais por possuir uma concentração populacional maior do que outras regiões similares. De acordo com Brasil (2019), a população do semiárido é de aproximadamente 22 milhões de habitantes, concentrando a maior parte da população rural do país. O Estado do Ceará, onde se localiza a bacia hidrográfica do rio Salgado, uma das sub-bacias do rio Jaguaribe, o maior rio do estado, tem uma área de 148.826 km², com uma população total de 8, 84 milhões habitantes, sendo que 86,2% desse território estão inseridos na região semiárida (MEDEIROS et al., 2012).

Além disso, Baptista e Campos (2014), destacam a região semiárida é produto do modo de exploração da terra, aliado a escassez de chuva e ao limitado sistema de armazenamento de água. Mesmo o semiárido brasileiro sendo mais chuvoso do mundo, com pluviosidade média de 750 mm/ano, sendo 70% das chuvas concentradas entre os meses de janeiro a abril, mais de 90% do volume anual da chuva não são aproveitados, principalmente pela dificuldade na formação de mananciais subterrâneos, causado pelo

subsolo formado em 70% por rochas cristalinas (MALVEZZI, 2007). Além disso, as percas com evaporação intensificam esse problema, apresentando uma evaporação potencial anual média variando entre 2.100 e 2.600 mm, e evaporação real média variando entre 450 e 700mm ao ano (FRISCHKORN et al., 2003; GÜNTNER e BRONSTERT, 2004).

Com isso, faz-se necessária uma gestão mais eficiente e ainda mais relevante já que o uso não planejado dos recursos hídricos disponíveis, as baixas precipitações e secas periódicas afetam social e economicamente a população. Nesse sentido, os reservatórios hídricos ganham um destaque na gestão hídrica do semiárido desde o final do século XIX com a criação da comissão da seca (GUERRA, 1981).

Os reservatórios hídricos ou popularmente chamados de açudes, podem ser enquadrados em duas classes principais, os açudes de grande e médio porte, que possuem capacidade de armazenamento de bilhões de metros cúbicos e os de pequeno porte, chegando a armazenar milhares de metros cúbicos (CIRILO, 2008).

Por ser fundamental para a disponibilidade de água no semiárido o açude não pode deixar de ser levado em consideração no momento do planejamento e gestão dos recursos hídricos na região. De acordo com os planos estaduais de recursos hídricos dos Estados que compõem o semiárido podemos notar a presença, e em alguns casos a relevância, dos açudes quando do diagnóstico da disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas existentes nos respectivos Estados. Assim, o reservatório desempenha um papel preponderante para o gerenciamento dos recursos hídricos na região devido a sua capacidade de armazenamento e distribuição em articulação com outras políticas hídricas.

Entretanto, as medidas de gestão desses corpos hídricos são muitas vezes insuficientes ou ineficazes. Uma soma de fatores como, por exemplo, as atividades antrópicas em suas margens e as variações climáticas e a evaporação extremamente alta na região semiárida, acabam por reduzir o seu rendimento para aproximadamente 25%, no caso dos pequenos açudes (VIEIRA, 2003).

Com isso, avaliar disponibilidade hídrica de uma bacia deve ser iniciada a partir da identificação dos seus principais reservatórios e, através do balanço hídrico multianual, avaliando seu comportamento ao longo do tempo. Além disso, outro fator importante para uma gestão eficiente dos recursos hídricos de uma bacia, é o conhecimento e monitoramento das demandas hídricas. Por fim, confronta essas duas informações (Vazão de entrada \times demanda) fornece uma informação básica de apoio à decisão (CRUZ, 2001).

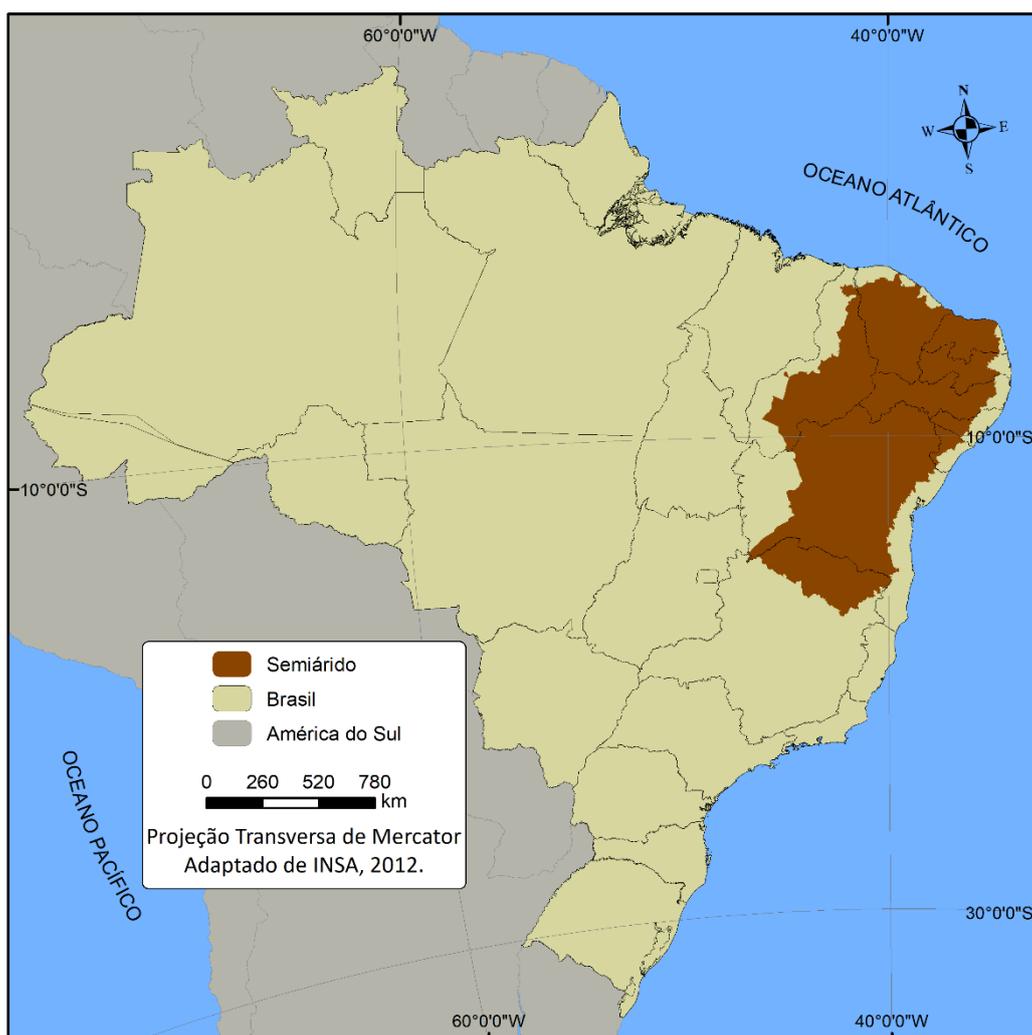


Figura 1 - Distribuição do Semiárido no território brasileiro.

As questões associadas à vida em regiões semiáridas não podem ser expressas apenas por essas definições. Do ponto de vista hidrológico, o aspecto mais comum nessa região é a corriqueira interrupção na disponibilidade natural de água, em virtude dos constantes períodos de estiagem na região. Nesse sentido, a região semiárida se caracteriza pela extrema necessidade de intervenções antrópicas (do homem pelas ações do Estado) que devem buscar amenizar os problemas das secas na região (ARAÚJO, 1990). As regiões semiáridas em todo o mundo se caracterizam por baixas taxas de densidade, e, contrariamente, o semiárido brasileiro é possivelmente o mais habitado do mundo.

Dessa forma, a necessidade de uma gestão hídrica mais eficiente é ainda mais relevante, já que o mau uso dos recursos hídricos existentes aliado às baixas precipitações e secas periódicas, afeta social e economicamente a população. Os reservatórios hídricos são submetidos aos impactos das atividades em suas margens e também no corpo d'água, juntamente com as variações climáticas torna-os bastante vulneráveis.

Aliado a esses problemas, a evaporação extremamente alta na região semiárida (média de 2.000 mm/ano) concentra nutrientes e sais que se expressam na alta salinidade e na rápida eutrofização que caracterizam a maioria dos Corpos hídricos da região (GALVÍNIO et al., 2006).

De acordo com Cirilo (2008), os reservatórios hídricos do Nordeste foram construídos de duas formas, sendo a primeira a dos grandes reservatórios, com número reduzido mas distribuídos por toda região e com capacidade de armazenamento de bilhões de metros cúbicos, e os de pequeno porte, chegando a armazenar milhares de metros cúbicos.

A disseminação da política da açudagem no semiárido brasileiro teve início no final do século XIX com a criação da Comissão da Seca, criada por D. Pedro II, que começou com a construção do reservatório de Quixadá entre 1888 e 1906. Em 1909 é criado o Instituto de Obras Contra as Secas (IOCS), posteriormente renomeado para Inspeção Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), assumindo sua denominação atual de Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) em 1954 (SILVA, 2019).

Um fator limitante ao emprego da política de açudagem é a elevada evapotranspiração de referência do semiárido brasileiro. Como bem ressalta Vieira (2003), os pequenos reservatórios do semiárido tem um baixo rendimento, com perdas na ordem de 25%, sendo esse valor a razão entre o volume regularizado anual e a capacidade do reservatório.

Com a grande proliferação dos pequenos reservatórios, surgem ainda outros problemas, que são os impactos das suas instalações nas bacias hidrográficas circunscritas, capazes de promover efeitos negativos para outros usuários, principalmente nos de jusante, isso porque esses barramentos podem interferir na gestão da água na bacia, bem como na degradação da qualidade das águas como destacam Suassuna e Audry (1995). Esses autores analisaram a caracterização da qualidade da água em pequenos

reservatórios da região Nordeste e identificaram os principais riscos de degradação na região, caso não ocorram uma circulação hídrica devida e a renovação de suas águas.

Dessa forma, um fator importante a ser considerado para a convivência com o semiárido é a disponibilidade hídrica. E esse fator deve ser visto como uma questão de fluxo de água e não de volume. Assim, com base em Chapra (1997) não se deve falar em disponibilidade hídrica em termos volumétricos, mas em termos de vazão, pois se trata de um ciclo com a água em movimento constante de um estado físico para outro.

2.3 Modelos de previsão Climática

O *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* (2001) define mudança climática como qualquer alteração temporal do clima atribuídas à variabilidade natural, bem como, as atividades humanas que alteram de forma direta ou indireta a composição atmosférica mundial. Fonseca (2017) complementa que as mudanças climáticas referem-se a uma alteração no estado do clima, que pode ser identificada (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade das suas propriedades, além disso, essas mudanças persistem por um tempo prolongado.

O aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera é considerada a principal causa das mudanças climáticas globais, aponta o IPCC (2013). Contudo, o aumento não é considerado o único responsável. A atmosfera e a superfície terrestre têm grande interação devido às constantes trocas de fluxo de calor, momento e água. Sendo assim, o comportamento do clima depende significativamente do estado da superfície, que pode ser caracterizada pela umidade do solo, por sua refletividade e temperatura (VIRGÍLIO, 2018).

As mudanças climáticas afetarão os elementos básicos da vida de pessoas de todas as partes do mundo (acesso à água, produção de alimentos, meio ambiente, saúde, dentre outros). As consequências previstas para os aumentos da temperatura global são apresentadas a seguir, com base no trabalho de Barrios (2013):

- Aumento de 1 °C na temperatura da Terra: desaparecimento das pequenas geleiras nos Andes, o que ameaça o fornecimento de água para aproximadamente 50 milhões de pessoas; diminuição da produção de

cereais nas zonas temperadas; ao menos 300 mil pessoas morrerão por ano devido a doenças relacionadas com as alterações climáticas.

- Aumento de 2 °C na temperatura da Terra: diminuições de 20 a 30% na água disponível em algumas regiões do sul e mediterrânea da África, redução de 5 a 10% na colheita de cereais na África tropical; de 40 a 60 milhões de pessoas estarão expostas à malária na África; 10 milhões de pessoas a mais expostas a enchentes; risco de extinção das espécies do Ártico (urso polar); e possibilidade de derretimento da camada de gelo da Groelândia de forma irreversível, elevando o nível dos oceanos em aproximadamente 7 metros.
- Aumento de 3 °C na temperatura da Terra: entre 1 e 4 bilhões de pessoas a mais enfrentando períodos de escassez de água; períodos de seca pronunciada a cada dez anos no sul da Europa; entre 150 a 550 milhões de pessoas a mais expostas a padecer de fome; entre 1 e 3 milhões de pessoas a mais sujeitas à desnutrição; colapso da floresta Amazônica (de acordo com alguns modelos); aumento do risco de colapso da camada de gelo da Antártida Ocidental; e elevação do risco de mudanças bruscas na circulação atmosférica (no mecanismo das monções).
- Aumento de 4 °C na temperatura da Terra: diminuições entre 30 e 50% na disponibilidade de água no sul da África e na África mediterrânea; queda entre 15 e 35% das safras de produtos agrícolas na África e Austrália; aproximadamente 80 milhões de pessoas a mais expostas à malária na África; e perda de cerca de metade da vegetação de tundra no Ártico.
- Aumento de 5 °C na temperatura da Terra: possível desaparecimento de grandes geleiras no Himalaia, afetando um quarto da população da China e milhões dos moradores da Índia; e aumento do nível dos oceanos, o que ameaça pequenas ilhas e as áreas costeiras (estado da Flórida), e grandes cidades, como Nova York, Londres e Tóquio.

As melhores ferramentas disponíveis para entender as mudanças climáticas são os modelos climáticos, pois, eles consideram as variações atmosféricas, bem como, a sua interação com os oceanos, a criosfera, vegetação e os ciclos biogeoquímicos. Além disso são alimentados com diversos cenários de emissões de gases do efeito estufa e do uso e cobertura da terra (VIRGÍLIO, 2018).

Os modelos climáticos globais são modelos matemáticos tridimensionais no espaço que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos. Para isso é resolvida uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, momento, conservação de massa e leis dos gases (SANTANA, 2013).

As principais limitações dos modelos globais de circulação quando aplicados aos recursos hídricos são que a discretização apenas retrata os processos atmosféricos de macro escala na superfície da terra; processos que variam em microescala, como os hidrológicos, não são adequadamente representados e o tempo e custo de uma discretização mais detalhada ainda é muito alto (FONSECA, 2017; SANTANA, 2013).

Contudo, estudos como o de Vaghefi et al. (2017), aponta que as estimativas de precipitação foram melhoradas a partir do último relatório do IPCC, além disso, destaca que no futuro possam ser simuladas projeções cada vez mais precisas, permitindo a previsão de eventos extremos.

Por fim, destaca-se um apontamento realizado por Santana (2013) de que não existe um MCG ideal ou melhor que os outros, com isso, faz-se necessária uma análise dos resultados de diversos modelos a fim de explorar os efeitos de diferentes formulações.

2.4 Predição de mudanças no uso e cobertura do solo

As modificações no uso da terra através da agricultura, silvicultura e urbanização representam a alteração substancial por meio de sua interação com a maioria dos componentes das mudanças ambientais globais, particularmente relacionadas às mudanças climáticas (VERWEIJ et al., 2018).

Desde a última década, o uso da terra e as mudanças nesses usos vêm ganhando importância devido ao seu papel na adaptação e mitigação das mudanças climáticas. Os biocombustíveis são necessários para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e mitigar as mudanças climáticas, enquanto a terra também precisa ser alterada para aumentar a produção de alimentos e se adaptar às secas e inundações (PIELKE, 2005). No geral, há uma necessidade crescente de modelos de mudanças de uso e cobertura da terra prontamente disponíveis e operacionais.

Inicialmente cabe destacar que ao longo do trabalho será utilizado a expressão “uso e cobertura da terra”, sendo assim, faz-se necessário entender a diferença entre os termos “uso” e “cobertura”. Para Silva (2016) cobertura da terra representa o estado

biofísico da superfície do solo, enquanto o uso da terra corresponde a forma e objetivo pelo qual os atributos biofísicos são manipulados.

As alterações no uso e cobertura da terra são reflexos de processos maiores, como crescimento populacional, interesses econômicos, avanços tecnológicos, interesses políticos e institucionais, fatores culturais e biofísicos (VERBURG e OVERMARS, 2009). Nesse sentido, Xavier (2017) destaca que essas as mudanças no uso e cobertura da terra, são as respostas da população para essas influências globais que criam oportunidades e restrições para novos usos do solo.

Face ao exposto, um estudo robusto das mudanças nos usos e cobertura da terra precisa levar em considerações maior número de fatores externos possíveis, como os citados anteriormente. Essas variáveis são denominadas de *driving forces* e são determinantes para a estimativa futura das demandas de uso e cobertura da terra (VERBURG et al., 2002).

Frente a importância de entender as alterações ocorridas no uso e cobertura da terra, bem como, da necessidade de prever as mudanças futuras, os modelos que estimam as mudanças nos padrões de uso e cobertura do solo ganham destaque nos últimos anos. Kuhn (2005) define os modelos de mudança de uso e cobertura da terra como sendo artifícios científicos com estrutura matemática computacional para o apoio ao planejamento e gestão regional. Destaca também, que esses modelos permitem a análise das condicionantes dessas mudanças, das consequências da dinâmica dos usos e coberturas da terra, e permitem a construção de cenários que auxiliam na construção de políticas e ações de planejamento.

Apesar do auxílio dos modelos de previsão das mudanças de uso e cobertura da terra, Xavier (2017) aponta que a simulação de cenários futuros dessas mudanças devem ser precedida de uma análise multitemporal de pelo menos dois mapas de uso e cobertura da terra (passado) para que seja possível a identificação dos indicadores de mudança e explorar as transições que a área de estudo vem sofrendo.

Dentre os modelos de predição do uso e cobertura da terra, alguns possuem diversas aplicações em diferentes partes do mundo. Muitos deles são facilmente integrados aos Sistemas de Informações Geográficas, o que facilita ainda mais a sua aplicação. A Tabela 1 apresenta alguns dos modelos de previsão do uso e cobertura da terra disponíveis atualmente.

Tabela 1- Principais modelos de previsão do uso e cobertura da terra

| Modelo | Autor (es) | Descrição |
|---------------------------------|--------------------------|---|
| CLUE | Verburg (1999) | Modelo desenvolvido para simular uso e cobertura do solo em escala regional utilizando relações empiricamente quantificadas entre as mudanças e seus fatores determinantes. |
| DINAMICA EGO | Soares Filho (1998) | Plataforma de modelagem voltada para implementação de modelos ambientais espacialmente explícitos de diversas áreas. |
| Land Transformation Model (LTM) | Pijanowski et al. (2002) | Baseado na arquitetura do ArcGIS, que permite criar cenários de mudanças no uso e cobertura do solo a partir de dados multitemporais relacionados à mudança. |
| TerraME | Carneiro (2006) | Ambiente de programação para a modelagem espacial dinâmica. Suporta autômatos celulares, modelos baseados em agentes e modelos de rede que funcionam em espaços celulares 2D. |
| Land Change Modeler | Eastman et al. (2006) | Permite análise, modelagem e simulação das mudanças da cobertura do solo para o futuro e suas consequências para biodiversidade, além de outras aplicações. |

(Fonte: Adaptado de Xavier, 2017).

O acoplamento entre Sistemas de Informações Geográficas e modelos hidrológicos permite uma integração para a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, em outras palavras, uma ferramenta essencial que permite estimar variáveis hidrológicas.

Com essa integração torna-se possível a visualização de cenários pretéritos e atuais, além de simular impactos futuros das mudanças do uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos (Santos, 2015). Essa integração SIG/modelos hidrológicos é um instrumento valioso para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica (VELDKAMP et al., 2015).

Nessa vertente, este estudo analisou as implicações da variabilidade climática futura na área de estudo e as repercussões desses impactos na produtividade de água na bacia do Rio Salgado utilizando o modelo Land Change Modeler – LCM, que permite analisar, modelar e simular as mudanças da cobertura do solo para o futuro e as consequências para a biodiversidade (EASTMAN, 2016).

O modelo LCM vem sendo utilizado em diversos estudos como o de Khawaldah (2016), que aplicou o modelo para a cidade de Amman, na Jordânia obtendo, a partir da análise dos anos de 1984 e 2014, uma previsão da cobertura do solo para o ano de 2030. Os resultados desse procedimento indicaram uma expansão de 147% na área urbana entre o período de 1984 a 2014 e ainda um acréscimo de 43,9% na área urbana para o ano de 2030 em relação ao de 2014. Deus (2013) utilizou o LCM na construção de cenários de uso e cobertura do solo para o planejamento ambiental na Amazônia. O autor identificou cinco áreas prioritárias com ritmo de mudanças aceleradas, como um prognóstico do desmatamento na área de estudo.

A Figura 2 mostra um fluxograma com os procedimentos metodológicos utilizados para a projeção dos cenários futuros obtidos neste estudo conforme apresentado no trabalho de Xavier (2017).

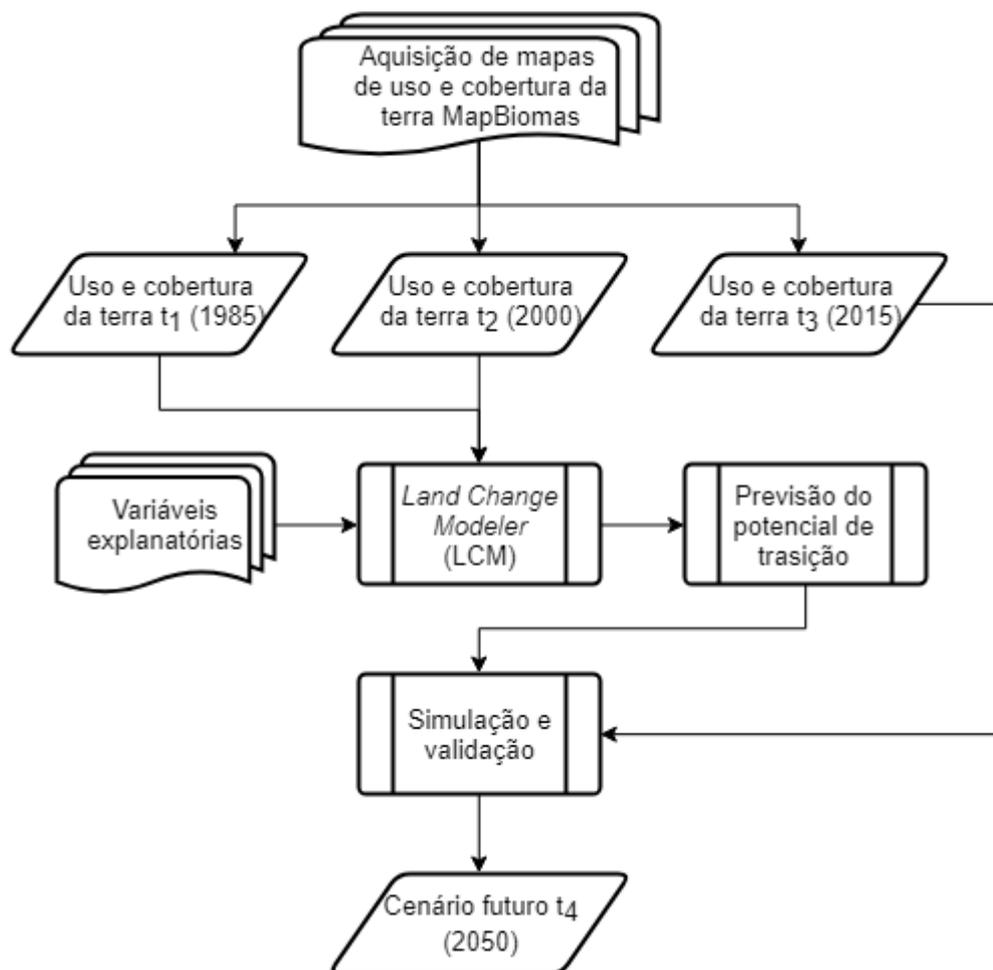


Figura 2 - Procedimentos metodológicos utilizados na predição dos cenários de uso do solo.

Além desses trabalhos, Wilson e Qiao (2011) simularam os impactos do uso da terra futuro e das mudanças climáticas na qualidade das águas superficiais na bacia hidrográfica do Rio Des Plaines, nos Estados Unidos. Os autores modelaram os efeitos da composição do uso da terra no passado e atual e dos padrões climáticos na qualidade das águas superficiais fornece informações valiosas para o planejamento ambiental e da terra. Este estudo prevê os futuros impactos do uso da terra urbana e mudanças climáticas na qualidade da água superficial na bacia hidrográfica do rio Des Plaines, Illinois, entre 2010 e 2030 utilizando o *Land Change Modeler* (LCM) para caracterizar três futuros cenários de uso/planejamento da terra.

Li et al. (2017) analisou as alterações no uso da terra e serviços ecossistêmicos sob simulação de vários cenários. Essa pesquisa tem como base uma combinação de cenários climáticos apresentados no quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e cenários políticos, incluindo a política do filho único e a política tributária de carbono, adotando o *Land Change Modeler* do *software* IDRISI para simular e analisar a mudança no uso da terra em 16 cenários futuros em 2050.

2.5 Modelagem hidrológica na estimativa da vazão

A modelagem hidrológica sempre é realizada para uma determinada bacia hidrográfica, com isso, faz-se necessário inicialmente entender o conceito de bacia hidrográfica, para Cruz e Tucci (2008) elas podem ser entendidas como um sistema fechado, onde ocorrem os processos hidrológicos, e têm como resposta à precipitação que ocorre sobre a mesma, a vazão, a evapotranspiração e a infiltração no tempo que representa a integração dos efeitos da precipitação, tipo e usos e cobertura do solo, geologia e a morfologia da bacia.

Com isso, Medeiros (2017) destaca que o monitoramento e a análise dos processos hidrológicos que ocorrem nos limites das bacias hidrográficas é uma tarefa bastante difícil, e em muitos casos inviável, devido a sua complexidade, e que, com isso, modelos hidrológicos surgem como ferramentas que podem ser utilizadas para auxiliar nessas tarefas.

A modelagem hidrológica se caracteriza como uma ferramenta que possibilita a representação de processos hidrológicos. Algumas de suas vantagens principais estão

relacionadas à previsão de condições diferentes das observadas, prever situações futuras, por vezes reproduzir o passado e dar suporte ao processo de tomada de decisão. Além do ganho obtido com as previsões, tem-se a vantagem do baixo custo e da rapidez do processamento (GADELHA, 2018).

Para Tucci (1998), a modelagem hidrológica é um dos meios que o homem desenvolveu para melhor compreender, simular e representar o comportamento da bacia hidrográfica e, com isso, prever condições diferentes das observadas. Medeiros (2017) complementa, apontando que Modelos são constituídos por equações que representam as condições e as características físicas de uma bacia hidrográfica, e têm como função auxiliar no entendimento do comportamento hídrico nas bacias, ou seja, são ferramentas que podem ser utilizadas para a simulação do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, como é o caso do modelo SWAT.

A principal limitação dos modelos hidrológicos é definida por Gadelha (2018) como sendo a dificuldade de manipular uma grande quantidade dados, que possuem grande variabilidade espacial e temporal, devido às características climáticas e físicas de uma bacia hidrográfica. A qualidade de um modelo hidrológico está diretamente relacionada com a capacidade de representar as variáveis e parâmetros.

Nesse sentido, o nível de detalhamento nas representações da variabilidade espaço-temporal dos dados de entrada e dos resultados, pode ser considerado como a propriedade mais importante de um modelo hidrológico. Para melhor representar essa variabilidade espaço-temporal das variáveis presentes em uma bacia hidrográfica, indica-se o uso de modelos hidrológicos distribuídos. Os modelos distribuídos são aqueles em que os parâmetros e variáveis variam tanto no espaço quanto no tempo (SANTOS, 2002).

Entretanto, os modelos distribuídos não garantem necessariamente melhores resultados do que outros tipos de modelo, contudo, permite melhor representar as modificações nas características da bacia (TUCCI, 1998).

3. A ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização Geográfica

Para a realização desse estudo foi escolhida a bacia hidrográfica do Rio Salgado (BHRS), que possui uma área de 13.009,57 km², e está localizada entre as latitudes 6,24° a 7,92° Sul e as longitudes 38,36° a 39,80° Oeste, mais precisamente na porção sul do estado do Ceará (Figura 3), limitando-se ao oeste com a sub-bacia do Alto Jaguaribe, ao sul com o estado de Pernambuco, ao leste com o estado da Paraíba e a nordeste com a sub-bacia do Médio Jaguaribe. A BHRS é uma sub-bacia do Rio Jaguaribe, que é a maior bacia do estado do Ceará, com uma área de aproximadamente 74.000 km².

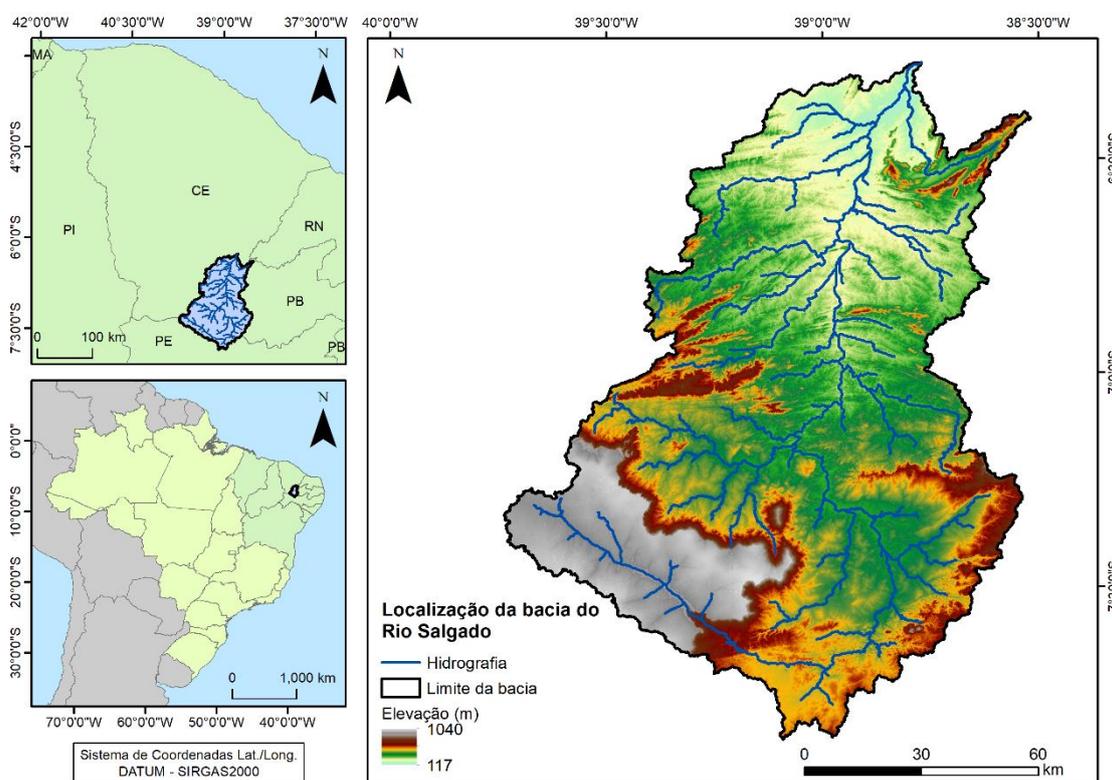


Figura 3 - Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Salgado.

O principal rio desta sub-bacia é o rio Salgado e seu trajeto dá-se no sentido sul-norte, até encontrar com o rio Jaguaribe, próximo à cidade de Icó, logo à jusante da barragem do açude Orós. Possui uma extensão de 308 km e drena uma área de 12.623,89 km², o equivalente a 9% do território cearense.

A bacia hidrográfica do Rio Salgado está inserida na Província Borborema, entidade tectônica Neoproterozóica (Brasiliana – Pan-Africana), parcialmente encoberta por sedimentos Fanerozóicos de bacias interiores e marginais do Nordeste brasileiro - na área em estudo, da Bacia Sedimentar do Araripe. Essa bacia sedimentar está inserida sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema, no domínio do Sistema de Dobramento Piancó-Alto Brígida, no seu limite com a zona geotectônica de Teixeira (BRITO NEVES et al., 2005), e tem seu arcabouço estrutural constituído por sequências estratigráficas, limitadas por discordâncias regionais. Segundo Assine (2007) estas discordâncias “representam o registro fragmentário de embaciamentos gerados em ambientes tectônicos distintos”.

A bacia do Rio Salgado está totalmente inserida no bioma Caatinga e possui um clima semiárido, característico pela alta variabilidade sazonal e intra-anual da precipitação, com médias anuais entre 500mm e 700mm concentrados entre os meses de janeiro a maio, relacionada com o fenômeno *El Niño*, que resulta em secas recorrentes (BRESSIANI et al., 2015).

A bacia do Rio Salgado apresenta uma característica geológica atípica para a região semiárida nordestina, pois é constituída de 57% de embasamento cristalino e 43% de sua área possui depósitos sedimentares. A grande parte da região sedimentar dessa bacia são da formação Araripe, que possui sistemas de aquíferos livres com alto potencial hídrico, localizadas ao sul da bacia.

3.2 Geologia e Clima

A Geologia da região é constituída por rochas do embasamento cristalino pré-cambriano (58,96%), representado por rochas do Arqueano ao Proterozóico Superior (BRITO NEVES et al., 2005). No que tange o seu substrato repousam depósitos sedimentares (41,04%) como os da Bacia Sedimentar do Araripe, que apresenta uma diversificação litológica caracterizada por sequências alternadas de arenitos, siltitos, calcários, argilitos e folhelhos, podendo alcançar uma espessura total da ordem de 1.600 m; das coberturas de idade terciária constituídas de areia, argilas e cascalhos e das quaternárias (aluviais), formadas por areias, siltes, argilas e cascalhos que se distribuem ao longo dos principais cursos d'água que drenam a sub-bacia (Figura 4).

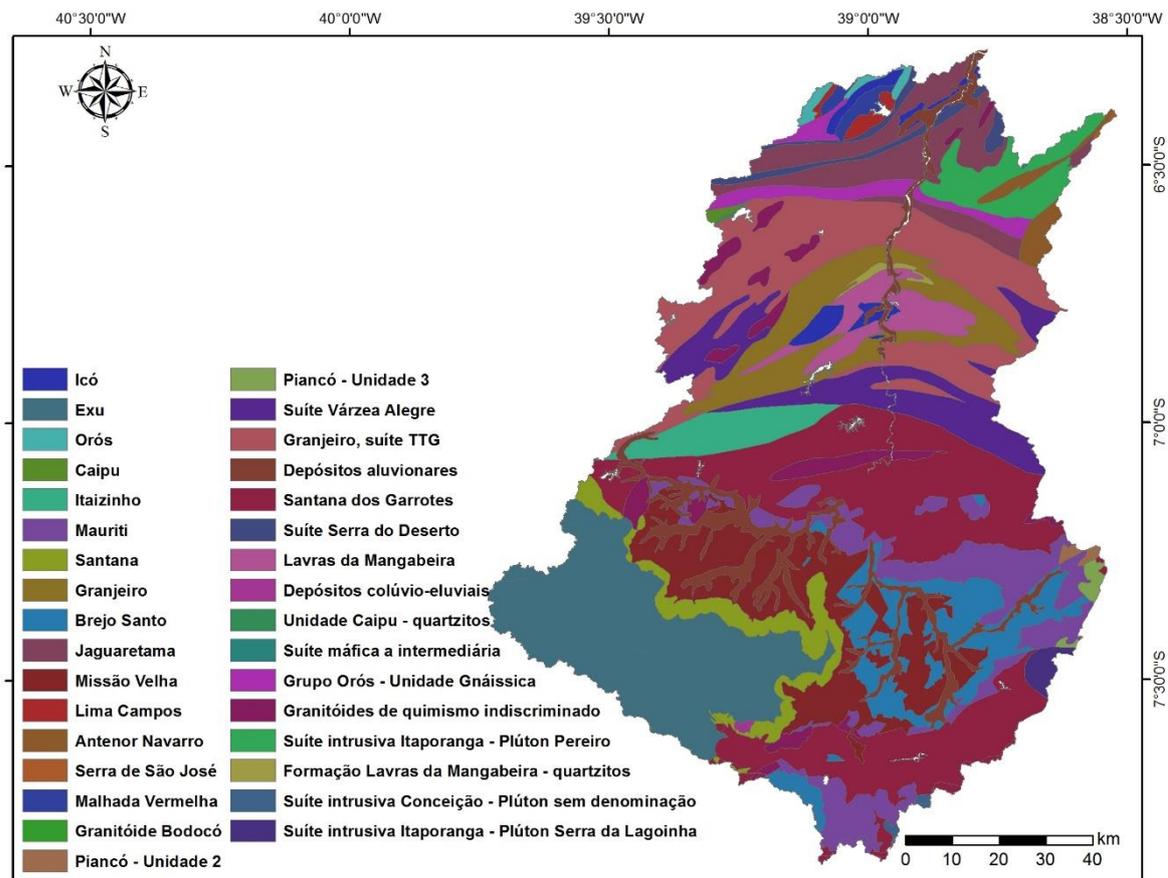


Figura 4 - Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Salgado.

Fonte: CPRM (2003).

A Bacia Sedimentar do Araripe, encontra-se a Chapada do Araripe, que possui níveis altimétricos entre 80 e 900 m e tem os arenitos Cretáceos da Formação Exu como mantenedor do relevo. Além disso, sua drenagem é de caráter intermitente e rica em recursos hídricos subterrâneos. Ao longo da borda norte-oriental desta chapada desenvolve-se a região do Cariri cearense, que se apresenta como um brejo de encosta e de vales espriados decorrentes de uma ramificação generalizada da drenagem. A bacia apresenta totais pluviométricos superiores a 900 mm (FUNCEME, 2009).

No que tange o clima da bacia, este é do tipo Semiárido Quente, que condiciona médias térmicas anuais que variam entre 24°C e 26°C. A precipitação anual média é de 967,6 mm. Há um contraste nítido no que diz respeito ao relevo entre os dois macrocompartimentos: o da Superfície de Cimeira da Chapada do Araripe (800 – 900 m) e a Depressão Sertaneja (350 – 450 m) (COGERH, 2019).

Na Depressão Sertaneja emergem, topograficamente, níveis serranos dos maciços cristalinos e as cristas residuais, e expandem-se as planícies fluviais. Nas

vertentes da chapada, o Rio Salgado possui declividades muito acentuadas, que vão se tornando mais suaves à medida que se aproxima da Depressão Sertaneja as declividades do talvegue variam de 0,1% a 8%, sendo a média 0,18% (COGERH, 2019).

3.3 Solos e Relevo

Devido às variações geológicas existe uma grande variedade de solos nesta sub-bacia. Os solos predominantes na sub-bacia são os Neossolos Flúvicos, Litossolos, Luvisolos, Argissolos, Planossolos, Nossolos Litólicos e Vertissolos. Na região da Chapada do Araripe, parte sul da bacia, há predomínio de solos mais profundos com domínio de Latossolos derivados de arenito da Formação Exu (COGERH, 2019). No sopé da chapada no entorno de municípios como Crato, Juazeiro e Barbalha, predominam solos profundos, avermelhados, com média fertilidade natural e boas condições para o uso agrícola. Na Depressão Sertaneja, localizada mais ao norte da sub-bacia, onde predominam rochas cristalinas ácidas, devido às condições climáticas, ocorrem solos rasos a pouco profundos, com diversas restrições para uso agrícola (FUNCEME, 2009).

3.4 Uso e cobertura da terra

Das relações que se estabelecem entre os fatores do potencial ecológico (fatores abióticos) e da exploração biológica (fatores bióticos), resultam as características do recobrimento vegetal. Na depressão periférica, onde há maior escassez de umidade e maiores taxas de evapotranspiração, há primazia de vegetação de caatingas que ostentam variados padrões fisionômicos e florísticos (FUNCEME, 2009).

As matas ciliares que recobriam primariamente as planícies aluviais estão fortemente descaracterizadas pelos desmatamentos desordenados. No acesso ao nível de Cimeira da Chapada do Araripe, os patamares se revestem de matas secas ou de faixas de transição com as matas de encostas e com os cerrados, cerradões e carrascos do altiplano sedimentar (Figura 5). A análise integrada da paisagem e dos componentes geoecológicos (geologia, geomorfologia, hidrologia, clima, solos e fitoecologia) que compõem o potencial natural e a exploração biológica derivada, realizada pela FUNCEME.

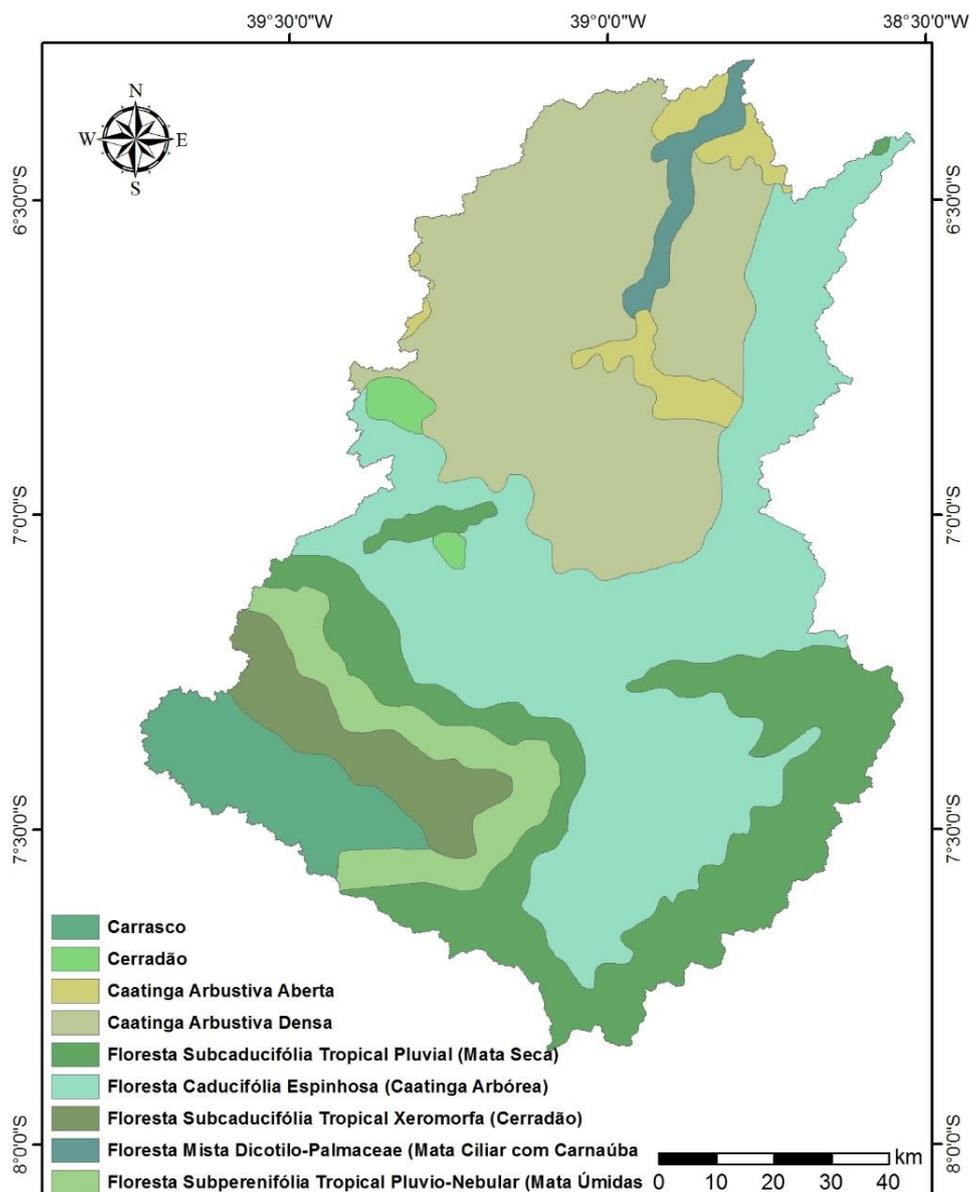


Figura 5 - Classes de vegetação existentes na bacia hidrográfica do Rio Salgado.

Fonte: Funceme (2009).

3.6 Águas Superficiais

Esta bacia apresenta baixa capacidade de acumulação em termos de águas superficiais no estado do Ceará (Figura 6), possui um total de 1.695 reservatórios (COGERH, 2018), destes, 254 apresentam área superior a 5 ha (FUNCEME, 2008). Destacam-se os açudes Atalho e Lima Campos, que juntos respondem por 39% da capacidade de acumulação.

É importante considerar que parte da água acumulada no açude Lima Campos provém da transferência das águas do açude Orós, localizado na sub-bacia do Alto

Jaguaribe, por meio de um túnel (COGERH, 2018). A consolidação da oferta hídrica no Salgado engloba 10 (dez) dos 13 (treze) principais reservatórios da sub-bacia, aqueles que possuem capacidade maior que 10 milhões de m³, tendo em vista que os açudes da região têm como principal função a acumulação de volumes de água que ficam estocados após a estação chuvosa (de fevereiro a maio), para serem depois utilizados na estação seca (demais meses) do mesmo ano.

Deve-se destacar ainda que os açudes servem como reservas interanuais, pois, quando da ocorrência de anos secos consecutivos, tais reservatórios não apresentam volumes para o atendimento às demandas (CEARÁ, 2005). A Tabela 2 apresenta a capacidade de acumulação dos principais reservatórios localizados nesta sub-bacia.

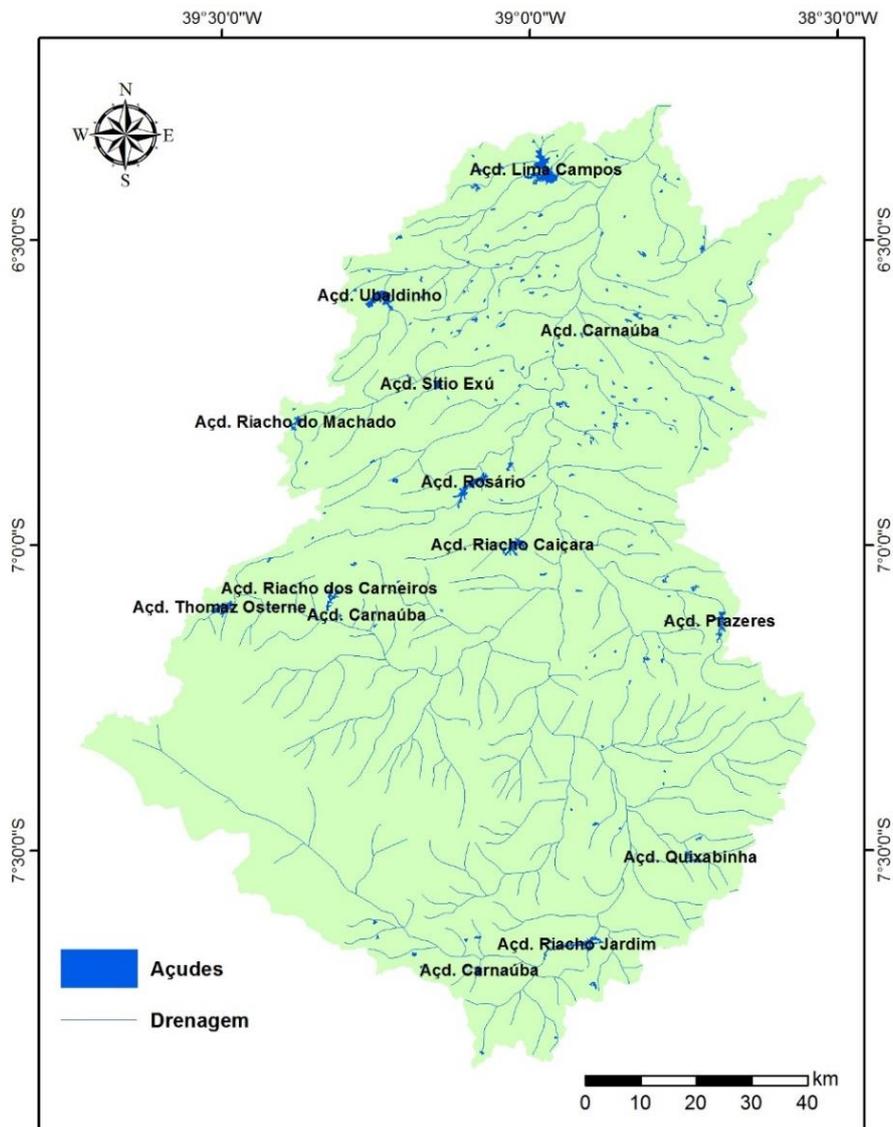


Figura 6 - Principais reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Salgado.

Fonte: Ceará (2005).

Tabela 2 - Principais reservatórios da bacia do Rio Salgado e sua capacidade de acumulação

| Nome do açude | Município | Capacidade de acumulação (m ³) |
|----------------|----------------------|--|
| Atalho | Brejo Santo | 108.250.000 |
| Cachoeira | Aurora | 34.330.000 |
| Estrema | Lavras da Mangabeira | 2.900.000 |
| Gomes | Mauriti | 2.390.000 |
| Lima Campos | Icó | 66.380.000 |
| Manoel Balbino | Juazeiro do Norte | 37.180.000 |
| Olho d'Água | Várzea Alegre | 21.000.000 |
| Prazeres | Barro | 32.500.000 |
| Quixabinha | Mauriti | 31.780.000 |
| Rosário | Lavras da Mangabeira | 47.200.000 |
| Tatajuba | Icó | 2.720.000 |
| Thomas Osterne | Crato | 28.780.000 |
| Ubalzinho | Cedro | 31.800.000 |
| Total | | 447.210.000 |

Fonte: Ceará (2005).

3.7 Águas subterrâneas

A bacia hidrográfica do Rio Salgado apresenta dois Sistemas Aquíferos: o das rochas sedimentares (porosos, cársticos e aluviais) e os das rochas cristalinas (fissurais), representados na Figura 7. Os sedimentares se caracterizam como mais importantes por possuírem uma porosidade primária e, nos terrenos arenosos, uma elevada permeabilidade, traduzindo-se em unidades geológicas com excelentes condições de armazenamento e fornecimento d'água COGERH (2019).

Os cristalinos (fissurais) apresentam um “baixo potencial”, pois se encontram inseridos em áreas de rochas do embasamento cristalino, sendo as zonas de fraturas, os únicos condicionantes da ocorrência d'água nestas rochas. A recarga destas fraturas se dá através dos rios e riachos que estão encaixados nestas estruturas, o que ocorre somente no período chuvoso (CEARÁ, 2005).

A quantificação e caracterização das captações de água subterrânea na sub-bacia, geradas a partir da sistematização do cadastro dos pontos d'água da CPRM, cadastro de fontes do DNPM e nos cadastros de poços da FUNCEME, SOHIDRA, COGERH, DNOCS, FUNASA, SDR e empresas privadas, até 2006, mostram a existência de 3.645 pontos d'água, sendo: 3.370 poços tubulares; 23 poços amazonas; e 252 fontes naturais, captando água tanto em rochas sedimentares como cristalinas.

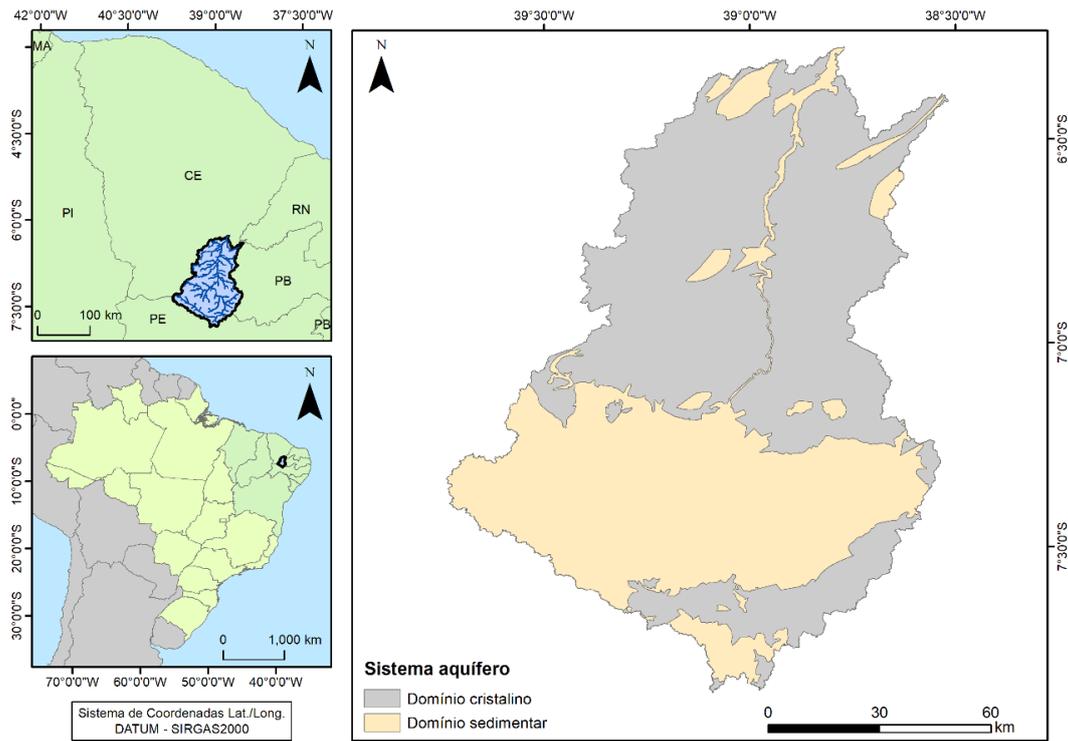


Figura 7 - Localização dos principais sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Salgado.

Fonte: CPRM (2003).

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia desta proposta está dividida de acordo com os objetivos principal e específicos desta pesquisa. Neste item serão abordados os procedimentos metodológicos utilizados para gerar os resultados da pesquisa, bem como a origem e tratamento dos dados utilizados. A figura 8 apresenta um fluxograma da integração dos modelos utilizados para a obtenção dos cenários futuros neste estudo.

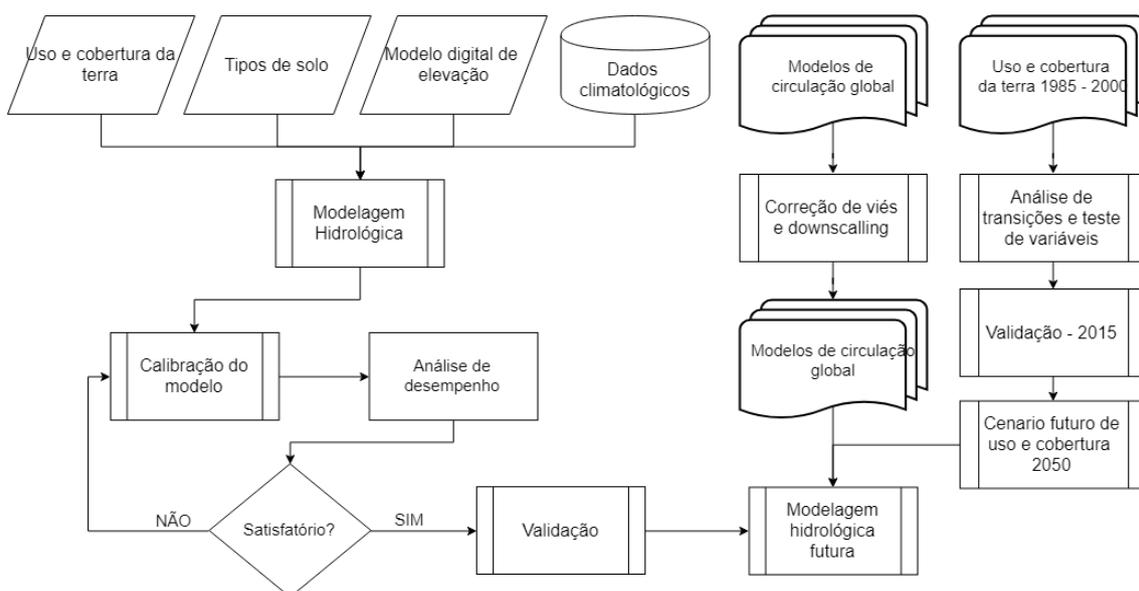


Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.

4.1 Obtenção dos dados de precipitação e vazão

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dados pluviométricos e fluviométricos disponibilizados gratuitamente pelo portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), distribuídos espacialmente conforme apresentado na Figura 9.

De acordo com o catálogo de estações do portal HidroWeb, existem 83 estações pluviométricas distribuídas ao longo da BHRS. Entretanto, foram selecionadas 22 estações para o período de 1980 – 2018, listadas na Tabela 3. A escolha dessas estações deve-se ao fato de serem aquelas que apresentam a menor quantidade de falhas, ou seja, os dias em que não foram registrados o total pluviométrico.

Tabela 3 - Lista de postos pluviométricos utilizados

| Código | Nome | Latitude | Longitude |
|---------------|----------------------|-----------------|------------------|
| 739046 | Abaiara | -7,3667 | -39,0500 |
| 638010 | Aurora | -6,9500 | -38,9667 |
| 638091 | Baixio | -6,7333 | -38,7167 |
| 739016 | Barbalha | -7,3333 | -39,3000 |
| 738060 | Barro | -7,1667 | -38,7667 |
| 738006 | Brejo Santo | -7,4911 | -38,9833 |
| 739011 | Caririacu | -7,0333 | -39,2833 |
| 639026 | Cedro | -6,6000 | -39,0667 |
| 639009 | Granjeiro | -6,8833 | -39,2167 |
| 638093 | Icó | -6,4000 | -38,8500 |
| 638013 | Ipaumirim | -6,7833 | -38,7167 |
| 739003 | Jamacaru | -7,4000 | -39,1333 |
| 739038 | Jardim | -7,5833 | -39,2833 |
| 739065 | Juazeiro do Norte | -7,2167 | -39,3167 |
| 638056 | Lavras da Mangabeira | -6,7500 | -38,9667 |
| 738001 | Mauriti | -7,3833 | -38,7667 |
| 738008 | Milagres | -7,3000 | -38,9333 |
| 739007 | Missão velha | -7,2500 | -39,1333 |
| 739060 | Pena Forte | -7,8167 | -39,0667 |
| 739010 | Porteiras | -7,5333 | -39,1167 |
| 639034 | Várzea Alegre | -6,8000 | -39,3000 |
| 638008 | Umari | -6,6333 | -38,7000 |

Para a realização deste estudo foram utilizados observados (1985–2017) de vazão diária de três estações fluviométricas das sete estações presentes na bacia. Da mesma maneira como na escolha dos postos pluviométricos, as estações de vazão foram selecionadas por possuírem a maior quantidade de observações. A Tabela 4 apresenta as principais informações sobre as estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Tabela 4 - Informações dos postos fluviométricos utilizados

| Código da estação | Nome da estação | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Área de drenagem (km²) |
|--------------------------|------------------------|-----------------|------------------|---------------------|--|
| 36290000 | Icó | -6° 24' 24,12" | -38° 52' 1,92" | 160 | 12.400 |
| 36210000 | Lapinha | -7° 13' 19,92" | -39° 8' 38,04" | 350 | 1.260 |
| 36250000 | Podimirim | -7° 18' 0,00" | -38° 59' 4,92" | 370 | 4.230 |

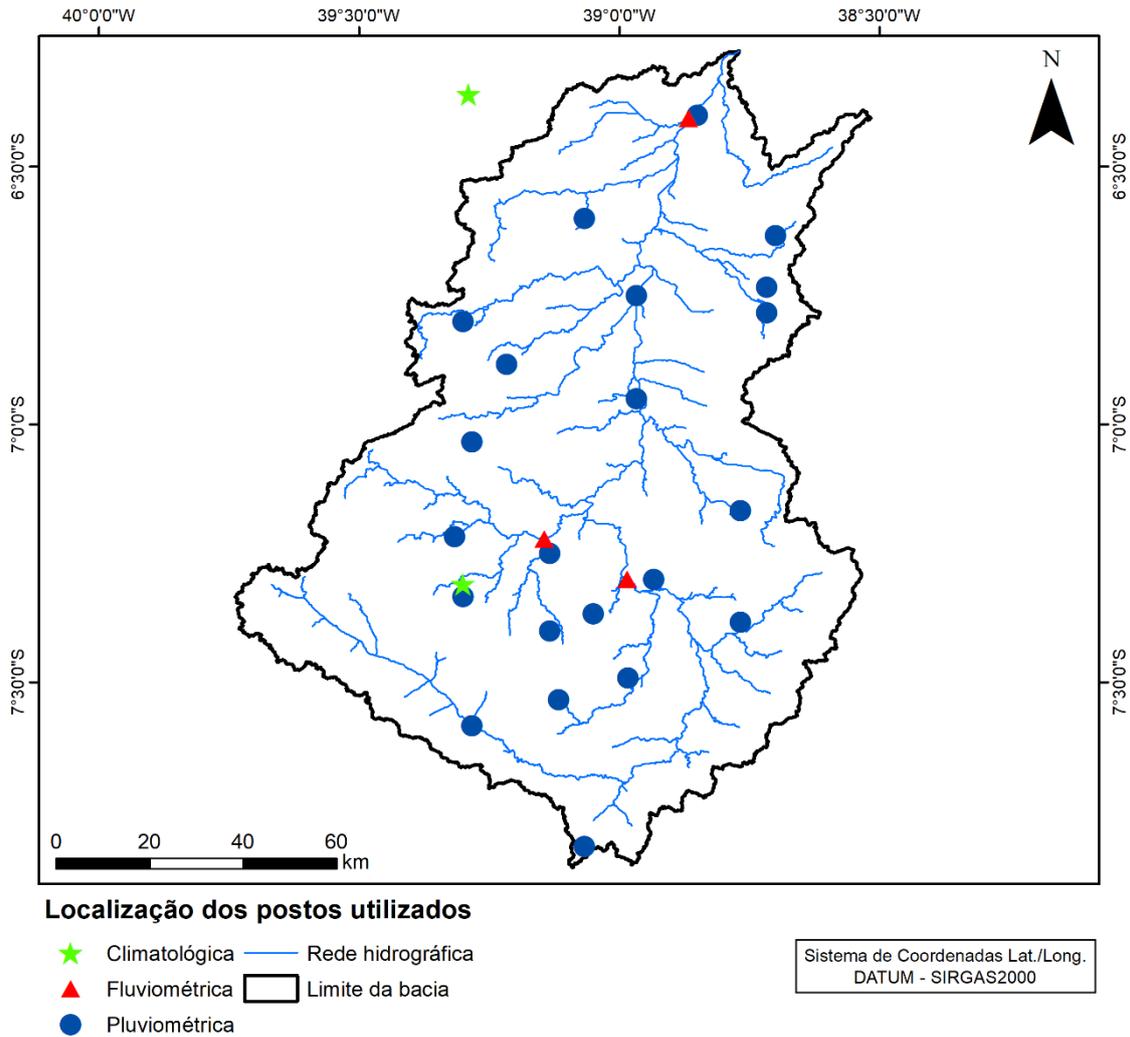


Figura 9 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste estudo.

4.2 Geração de Imagens Classificadas e Predição da Mudança do Uso e Ocupação da terra pelo *Land Change Modeler* (LCM)

Para analisar as mudanças do uso cobertura da terra na bacia do rio Salgado, para os anos de 1985, 2000 e 2015, foram utilizados os mapas de uso e ocupação do solo do projeto MapBiomas.

O MapBiomas é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>, os mapas do projeto são produzidos a partir da classificação de imagens dos satélites Landsat, utilizando algoritmos na plataforma *Google Earth Engine*,

que oferece uma imensa capacidade de processamento em nuvem, gerando assim um mapa detalhado para cada ano desde o ano de 1985.

O processamento e detecção de mudanças na cobertura e uso nos anos estudados foi realizada pelo Land Change Modeler – LCM, desenvolvido pela *Clark Labs*, com o apoio da comissão do Centro Andes de Conservação da Biodiversidade e Conservação Internacional (*Center Andes Biodiversity Conservation of Conservation International*). Esse método foi apresentado em 2006 e integrado ao software IDRISI, versão Andes, com o objetivo de auxiliar análises de mudanças de cobertura do solo com projeções de cenários futuros (DEUS, 2013).

De acordo com Luiz (2014), o LCM em sua versão atual, acoplado ao IDRISI TerrSet, é o resultado da adaptação do *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability*. Atualmente, o LCM também pode ser incorporado como módulo adicional ao software ArcGIS. Dessa forma, para a simulação dos cenários de uso e ocupação do solo para o ano de 2030 na bacia do reservatório Eptácio Pessoa, foi utilizado o LCM integrado ao IDRISI TerrSet. O LCM no IDRISI TerrSet é composto por cinco tarefas principais: (a) Análise de mudanças; (b) Potenciais de transição; (c) Previsão de mudança; (d) Planejamento e (e) Projeto de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD, sigla do inglês *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*).

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes opções para a predição dos cenários de uso e ocupação do solo para o ano de 2050, que segundo Eastman (2016) são: (a) análise de mudanças: analisa a mudança da cobertura do solo nos anos 1985 (t_1) e 2000 (t_2); (b) potenciais de transição: modelagem dos potenciais de transição da cobertura do solo; e (c) previsão de mudança: predição da mudança da cobertura do solo.

A Figura 10 apresenta a metodologia utilizada na predição do uso e ocupação do solo para t_4 (2050) para a BHRS usando o LCM, sendo composta basicamente pelas etapas de previsão do potencial de transição e simulação e validação, em que os principais dados de entrada foram: (a) mapa de uso do solo do ano 1985 (t_1), (b) uso do solo do ano 2000 (t_2), (c) variáveis explanatórias e (d) mapa de uso do solo do ano de 2015 (t_3), sendo este último mapa usado na etapa de validação da simulação para o ano de 2015 (t_3).

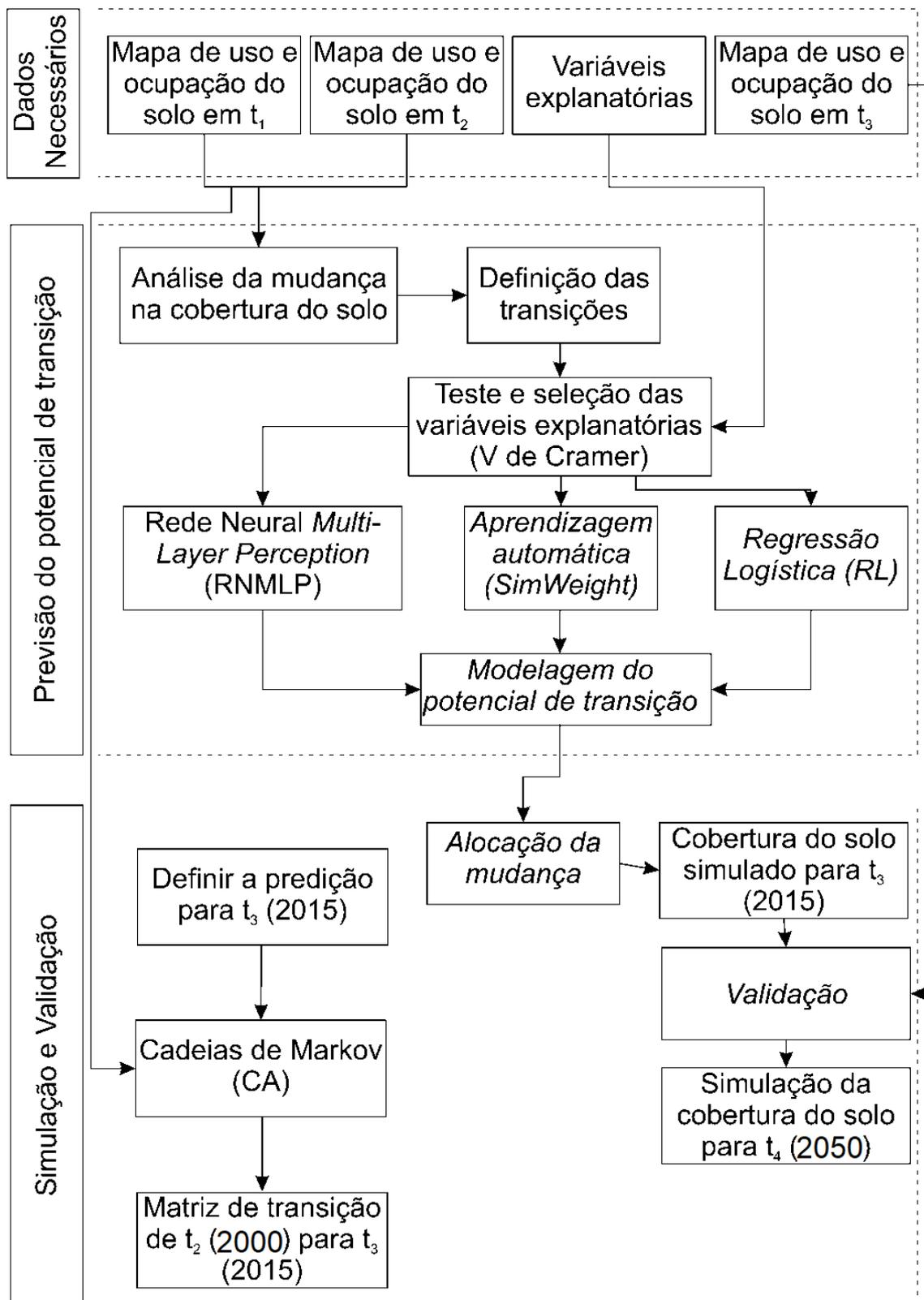


Figura 10 - Metodologia para previsão do uso e ocupação do solo para t₄ (2050) para a bacia do reservatório Epitácio Pessoa usando o LCM do Idrisi TerrSet

Fonte: Adaptado de Luiz (2014).

4.2.1 Previsão do potencial de transição

A etapa de previsão do potencial de transição foi composta por: (a) análise da mudança na cobertura do solo, (b) definição das transições, e (c) teste e seleção das variáveis explanatórias. Após a seleção das variáveis explanatórias através do teste V de Cramer, foi utilizada para a modelagem do potencial de transição para t₃ (2015) a Rede Neural *Multi-Layer Perceptron* (RNMLP)

4.2.2 Análise da mudança na cobertura do solo e definição das transições

A análise das mudanças na cobertura do solo pelo LCM foi realizada com base nos mapas de uso e ocupação do solo para os tempos t₁ (1985) e t₂ (2000). Assim, foram gerados o gráfico de perdas e ganhos por categoria de uso e ocupação do solo e o mapa das áreas de mudanças e persistência. Esses mapas serviram como subsídio para a definição das transições, isto é, para definição das mudanças de uma determinada classe para outra.

As transições no LCM foram definidas com base nas mudanças observadas no uso e ocupação do solo em t₁ (1985), t₂ (2000) e t₃ (2015). Dessa maneira, para modelagem do potencial de transição, foram escolhidas as seguintes transições: (a) formação savânica para pastagem; (b) formação savânica para agricultura; e (c) pastagem para agricultura. Essas transições foram escolhidas, em razão da diminuição das áreas ocupadas pela classe de formação savânica, bem como, pela expansão de áreas destinadas à pecuária e agricultura identificadas ao longo dos anos (t₁, t₂ e t₃), essas transições serão apresentadas no item 6.2.

4.2.3 Teste e seleção das variáveis explanatórias

Para avaliar as variáveis que mais influenciam no processo de mudança no uso e ocupação do solo na área de estudo, o LCM elege e seleciona as variáveis explanatórias, que são analisadas pelo teste V de Cramer. Esse teste tem como base uma análise estatística não paramétrica, utilizada para medir a força de associação entre variáveis que influenciam nas mudanças no uso do solo (LIEBERTRAU, 1983; SAMPAIO, 2014; LUIZ, 2014). Por meio desse teste, foi possível verificar a associação das variáveis

explanatórias com as transições definidas. O teste V de Cramer é obtido pela Equação 1 (LIEBERTRAU, 1983):

$$V = \sqrt{\frac{x^2}{n(q-1)}} \quad (1)$$

no qual x^2 = coeficiente Qui-quadrado:

$$x^2 = \frac{(O - E)^2}{2} \quad (2)$$

sendo: V = índice V de Cramer; n = tamanho da amostra; q = menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura do solo; O = frequência observada para uma categoria e E = frequência esperada na categoria correspondente.

O teste não paramétrico V de Cramer varia entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, maior é a associação entre a variável explanatória e a transição definida. Se o valor V de Cramer das variáveis for maior que 0,15, demonstra que a variável é significativa para a modelagem e deve ser adicionada na etapa de previsão do potencial de transição (HAMDY et al., 2017 e AMORIM, 2015). Dessa forma, apenas as variáveis explanatórias com valores V de Cramer superiores a 0,15 foram utilizadas na modelagem da predição do uso e ocupação do solo na área de estudo.

As variáveis explanatórias correspondem aos fatores que podem influenciar na mudança do uso do solo na bacia, por exemplo: altitude, distância de cursos d'água, distância de rodovias, distância de núcleos urbanos, tipos de solo, declividade, dentre outras. Segundo Sangermano et al. (2012), as principais variáveis que influenciam na tendência das mudanças são (a) a distância de rodovias, (c) cursos de água, (c) áreas urbanas, (d) declividade, e (e) modelo digital do terreno.

Com base nas mudanças do uso e ocupação do solo na bacia e no conhecimento da área de estudo, foram testadas as seguintes variáveis explanatórias: (a) distância de rodovias; (b) distância de cursos d'água e reservatórios; (c) distância de áreas urbanas; (d) declividade; e (e) altitude.

4.3 Cenários Climáticos Futuros

Para esse trabalho, serão utilizados quatro cenários que especificam as concentrações e emissões de gases elaborados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC AR5*. Esses cenários são denominados de *Representative Concentration Pathways* (RCP). Os RCP são a terceira geração de cenários do IPCC, que tem como base um conjunto de informações do *Special Report on Emission Scenarios* (SRES). Os RCP são baseados em uma abordagem diferente dos SRES e incluem informações mais consistentes sobre gases de curta duração e mudanças de uso da terra. Os conjuntos de dados RCP finais compreendem dados de uso da terra, emissões e concentrações de gases do efeito estufa, e de gases reativos e aerossóis, bem como campos de abundância de ozônio e aerossol (FONSECA, 2017).

Para este estudo foram selecionados quatro cenários de RCP, a saber: (a) RCP 2.6: é um cenário de mitigação, ou seja, é o único cenário onde as simulações foram realizadas com as concentrações CO₂ inferiores aos dados históricos (IPCC, 2013); (b) RCP 4.5 e RCP 6: são cenários de estabilização e por fim; (c) RCP 8.5: apresenta uma alta emissão dos gases do efeito estufa.

A mudança global de temperatura da superfície para o final do Século XXI será provavelmente superior a 1,5 °C, em relação ao período 1850–1900, para todos os cenários RCP, exceto o RCP 2.6. É provável que a temperatura ultrapasse 2 °C para o RCP 6.0 e o RCP 8.5, sendo mais provável que não exceda 2 °C para o RCP 4.5.

4.4 Modelos de mudanças climáticas

Os dados dos modelos de circulação atmosférica (MCA) climáticas foram obtidos a partir do portal *Water Weather Energy Ecosystem Technology and Data*, através do sítio eletrônico <https://www.2w2e.com>. Nesse portal, são disponibilizados diversos produtos como dados globais de solo, uso e cobertura da terra, dados históricos climáticos (CRU), bem como dados diários de precipitação e temperatura mínima e máxima futuros gerados por cinco MCA, todos com resolução espacial de 0,5°, conforme apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos modelos de circulação atmosféricos utilizados

| Modelos | Cenários | Período | Instituto |
|----------------|--------------------------|----------------|--|
| GFDL-ESM2M | RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) | 2006–2099 | NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory |
| HadGEM2-ES | RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) | 2006–2099 | Met Office Hadley Center |
| IPSL-CM51-LR | RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) | 2006–2099 | L'Institute Pierre-Simon Laplace |
| MIROC | RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) | 2006–2099 | AORI, NIES and JAMSTEC |
| NoerESM1-M | RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) | 2006–2099 | Norwegian Climate Center |
| CRU | Histórico | 1970–2005 | Climate Research Unit East Anglia |

Todos esses dados também podem ser adquiridos utilizando o programa *Climate Change Toolkit*, desenvolvido por Ashraf Vaghefi et al. (2017), que é ferramenta com cinco funcionalidades, são elas: (a) *download* e extração dos dados, (b) manejo de dados para o cálculo das médias anuais e mensais, (c) identificação de anomalias e correção de viés, e (d) análise de dias críticos consecutivos.

4.5 Cálculo do balanço hídrico

O SWAT é um modelo hidrossedimentológicos contínuo no tempo, de base semi-física (as equações utilizadas pelo modelo são baseadas em leis da física), e distribuído (os parâmetros do modelo variam no espaço e no tempo), permitindo com isso, a representação da sua variabilidade espaço-temporal (ARAGÃO et al., 2013).

4.5.1 Construção do banco de dados

Para a execução da modelagem hidrológica no modelo SWAT, faz-se necessária a construção de um banco de dados com diversas informações da bacia em estudo, essas informações podem ser subdividas em dois grupos principias: (a) variáveis climatológicas, e (b) variáveis físicas.

Os dados climatológicos foram adquiridos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), disponível no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Neste estudo, foram adquiridos dados diários de precipitação,

temperatura mínima, temperatura máxima, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar de duas estações climatológicas, entre os anos de 1980 e 2018 (Tabela 6).

Tabela 6 - Estações climatológicas utilizadas

| Estação climatológica | Latitude | Longitude | Elevação (m) |
|------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Barbalha | -7,31 | -39,30 | 409 |
| Iguatu | -6,36 | -39,29 | 217 |

Esses dados citados acima são utilizados para determinar uma série de informações necessárias para o funcionamento do gerador climático do modelo SWAT. Dentre as principais informações geradas, estão: (a) desvio padrão da temperatura, (b) probabilidades de dias úmidos seguidos de dias secos, (c) probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos, (d) precipitação máxima em meia hora de chuva no mês.

Com relação as variáveis físicas da bacia, para a modelagem hidrológica são utilizadas informações de elevação do terreno, tipos de solo e o uso e cobertura do solo para a bacia. Para estimar a elevação do terreno foi usado o modelo digital de elevação (MDE) oriundo da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, gerenciada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), disponibilizado de forma gratuita através do portal <https://earthexplorer.usgs.gov>.

A partir do MDE foi realizada a discretização da bacia, ou seja, foram geradas as direções de fluxo, o fluxo acumulado, a rede de drenagem e a delimitação das sub-bacias. Além disso, o MDE também foi utilizado para gerar a declividade da bacia, informação na qual é necessária para determinar as unidades de resposta hidrológicas (HRUs), descritas no item 4.6.

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial da declividade na bacia. Observa-se que as áreas com maiores declividades estão localizadas próximas aos limites da bacia, principalmente, na região leste, nordeste e sudeste da bacia. Essa bacia apresenta 36% de sua área com declividades superiores a 13%, o que caracterizam os relevos ondulado, forte ondulado e montanhoso.

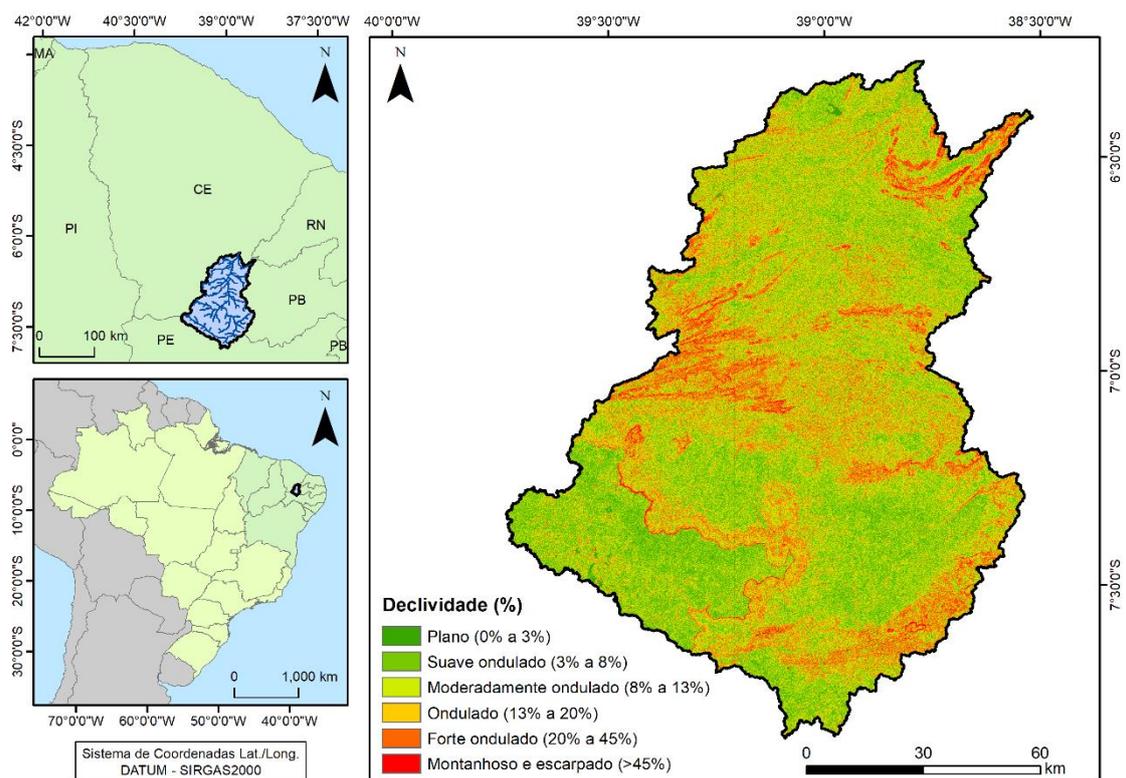


Figura 11 - Espacialização da declividade na bacia do Rio Salgado.

Na Tabela 7 observa-se que as duas classes mais representativas em toda a bacia, são: suave ondulado com 29% da área, predominante na porção sudoeste da bacia e o relevo moderadamente ondulado com 26% da área da bacia encontra-se distribuído ao longo de toda a bacia.

Tabela 7 - Distribuição das classes de declividade na bacia do rio Salgado

| Classes de declividade | Área (km ²) | % |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------|
| Plano (0% a 3%) | 1013,19 | 8% |
| Suave ondulado (3% a 8%) | 3835,00 | 29% |
| Moderadamente ondulado (8% a 13%) | 3437,41 | 26% |
| Ondulado (13% a 20%) | 2560,86 | 20% |
| Forte ondulado (20% a 45%) | 1973,88 | 15% |
| Montanhoso e escarpado (>45%) | 189,22 | 1% |
| TOTAL | 13009,57 | 100% |

Com relação as informações dos tipos de solo da bacia, foi realizada uma solicitação dos dados a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Foram adquiridos os dados de solos na escala de 1:100.000 publicados no

Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos da Mesorregião do Sul Cearense e Áreas de Entorno do Estado do Ceará no ano de 2013. As classes de solo identificadas na bacia encontram-se especializadas na Figura 12. Com relação aos parâmetros físicos dos solos necessários para a execução do modelo SWAT, eles foram obtidos a partir do portal SISOLOS da EMBRAPA (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>) no qual foram consultados todos os dados de solo disponíveis para a área da BHRS.

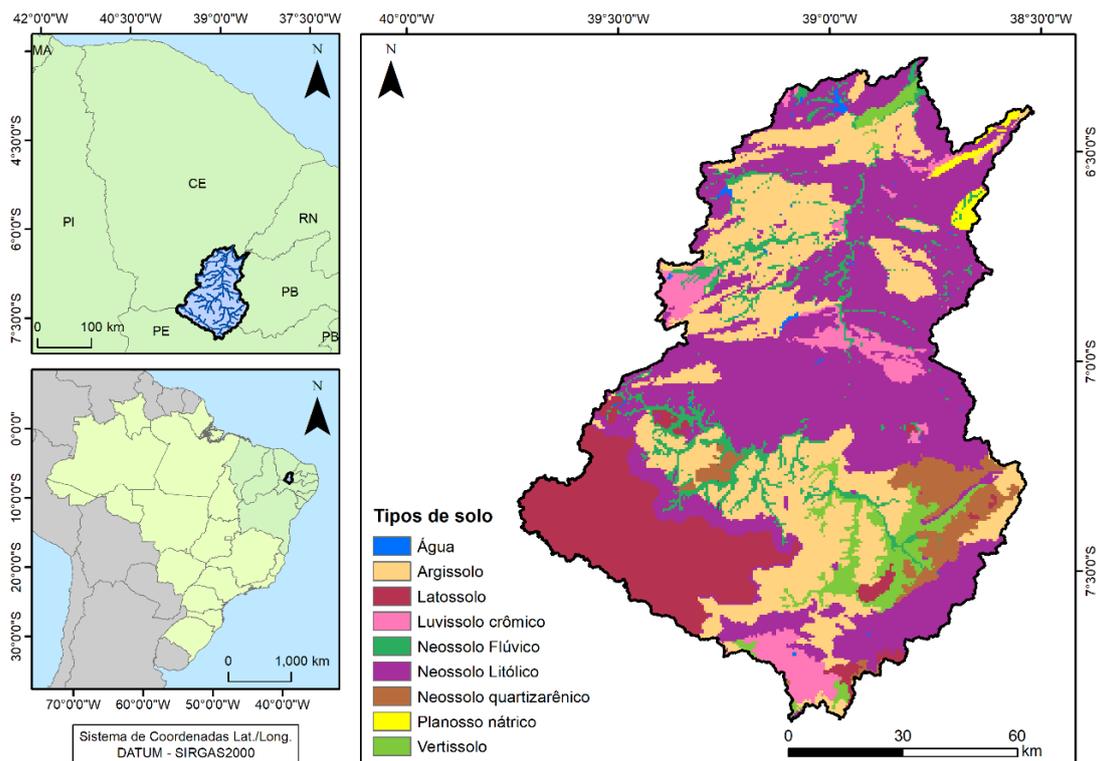


Figura 12 - Espacialização dos tipos de solo presentes na bacia do Rio Salgado.

Para essa bacia foram identificadas oito classes de tipos de solo, além das áreas classificadas como água. O tipo de solo predominante na bacia é Neossolo Litólico, que representa 41,64% da área total da bacia (Tabela 8), enquanto, a segunda classe mais representativa é o Argissolo, com 25,62%.

Tabela 8 - Distribuição dos tipos de solo na bacia do rio Salgado

| Classes de solo | Área (km²) | % |
|-------------------------|------------------------------|----------------|
| Água | 42,52 | 0,33% |
| Argissolo | 3332,94 | 25,62% |
| Latossolo | 1765,88 | 13,57% |
| Luvissolo crômico | 593,36 | 4,56% |
| Neossolo Flúvico | 704,45 | 5,41% |
| Neossolo Litólico | 5417,00 | 41,64% |
| Neossolo quartizarênico | 524,25 | 4,03% |
| Planossolo nátrico | 104,63 | 0,80% |
| Vertissolo | 524,54 | 4,03% |
| TOTAL | 13009,57 | 100,00% |

Com relação aos dados de uso e cobertura da terra, foram utilizados os mapas do Projeto MapBiomias (Coleção 4), que é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>.

O projeto MapBiomias disponibiliza um mapa anual de uso e cobertura da terra para todo o Brasil, para o período de 1985 a 2018. Além dos mapas, esse projeto também disponibiliza dados de mudanças dos usos e coberturas da terra, bem como, diversas estatísticas das imagens, como a qualidade dos mosaicos e da classificação.

No que tange as etapas de calibração e validação do modelo SWAT (1986–2017) foi utilizada como entrada do modelo o uso e cobertura da terra para o ano de 2000 (Figura 13).

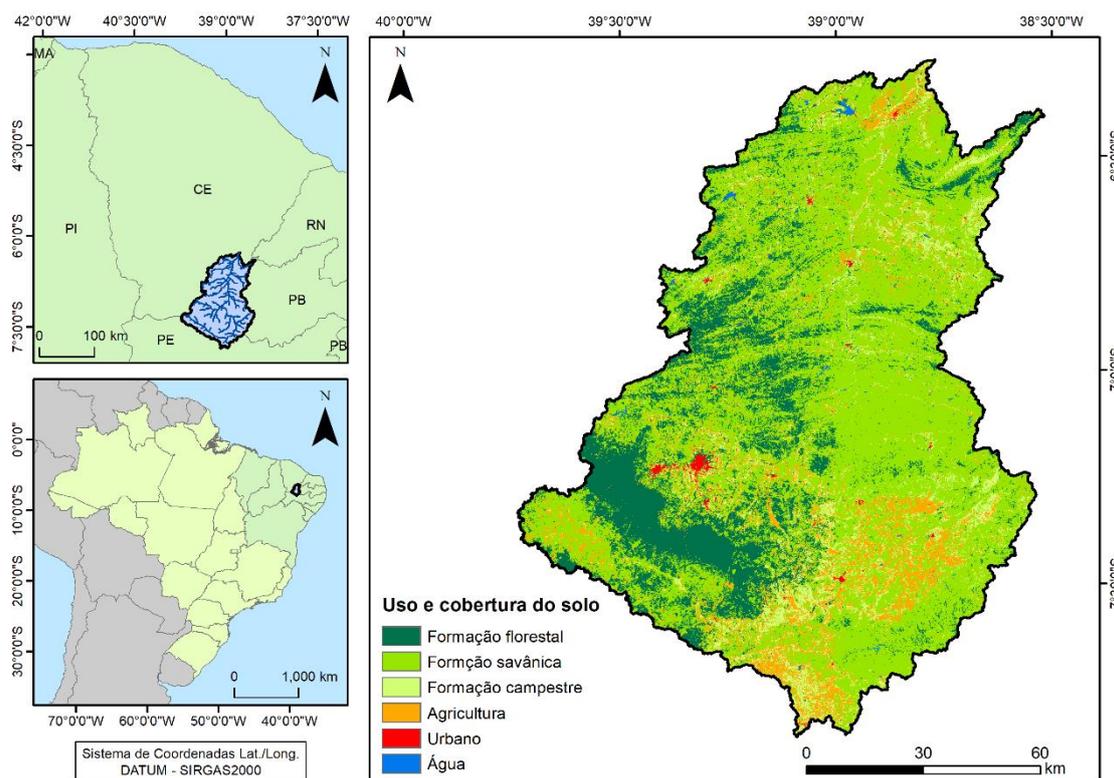


Figura 13 - Especialização dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado.

Para o ano de 2000, foram identificadas seis classes de uso e cobertura da terra, que são apresentadas na Tabela 9. As classes mais representativas identificadas para esse ano foram a formação savânica, formação florestal e agricultura. A formação savânica possui 60,92% da área, que está distribuída por toda a bacia com uma concentração maior na porção leste. A segunda classe, a formação florestal, esta recobre 19,28% da bacia, e destaca-se pela maior ocorrência na porção sudoeste da bacia, onde está localizado Parque da Floresta do Araripe-Apodí. A classe agricultura, representa 10,43% da área da bacia e está concentrada nas porções sul/sudeste e norte da bacia.

Tabela 9 - Distribuição dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado

| Classes de uso e cobertura do solo | Classe SWAT | Área (km ²) | % |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|----------------|
| Formação florestal | FRST | 2508,78 | 19,28% |
| Formação savânica | RNGB | 7925,92 | 60,92% |
| Formação campestre | RNGE | 1109,37 | 8,53% |
| Agricultura | AGRL | 1356,48 | 10,43% |
| Urbano | URMD | 52,73 | 0,41% |
| Água | WATR | 56,28 | 0,43% |
| TOTAL | | 13009,57 | 100,00% |

4.6 Módulos do SWAT

De posse dos dados de entrada necessários para a execução do SWAT, a modelagem se inicia com a realização de uma discretização da bacia hidrográfica, que consiste em calcular as direções de fluxo, a geração da rede de drenagem, e por fim, a delimitação da bacia em sub-bacias. A última etapa da discretização da bacia foi a geração das HRU, com base nas características de declividade, tipos de solo e uso e cobertura da terra. Essas unidades são as áreas mínimas modeladas, as quais são atribuídos os parâmetros da modelagem.

Nesse sentido, Neitsch et al. (2011) apontam que o modelo SWAT realiza as estimativas dos fluxos para cada URH, porém, essas unidades não se comunicam, ao término das estimativas os resultados de cada URH são acumulados para gerar o balanço hídrico da sub-bacia, por fim, esses são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle.

Desta forma, pode-se assumir que o balanço hídrico é central de todos os processos do SWAT, porque a partir dele são determinados diversos fatores, a saber: o crescimento da planta, o movimento dos sedimentos, nutrientes, pesticidas e agentes patogênicos. Para isso, a execução do modelo se dá em duas fases: a terrestre e a aquática Ferrigo (2014).

A modelagem Hidrossedimentológica do SWAT inicia-se com a fase terrestre do ciclo hidrológico, é nessa fase que são estimadas as quantidades de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas que são carregados para a rede de drenagem de cada sub-bacia. Em um segundo momento, na fase aquática do ciclo hidrológico, são estimados todos os processos que ocorrem nos canais da bacia até que alcancem o seu exutório (NEITSCH et al., 2011).

Após essa caracterização o SWAT procede com do balanço hídrico, realizado a partir da equação 3(ARNOLD et al., 1998).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{sup_i} - ET_i - P_i - QL_i) \quad (3)$$

sendo SW_t o conteúdo final de água no solo (mm), SW_0 o conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm), t o tempo (dias), R_i a precipitação (mm), Q_i

o escoamento superficial (mm), ET_i a evapotranspiração (mm), P_i a percolação (mm), e QL_i o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

A seguir serão apresentados os principais módulos do modelo SWAT utilizados para a estimativa do balanço hídrico:

4.6.1 Escoamento superficial

Entende-se escoamento superficial como sendo o excesso de água aplicada em uma determinada porção da superfície, ou seja, quando a capacidade de infiltração do solo é excedida, inicia-se o processo de escoamento superficial. O modelo SWAT possui dois métodos para a determinação do escoamento superficial, uma para dados diários de precipitação (método de Curva Número – CN) e um métodos para dados sub-diários (método de Green e Ampt). Nesse estudo, o método utilizado foi o da Curva Número, tendo em vista que os dados coletados para a bacia estão em escala diária.

O *Soil Conservation Service* (SCS) desenvolveu o método CN em 1954 com o objetivo de estimar de maneira consistente o escoamento superficial para diversos tipos de uso do solo e de tipos de solo, tendo como base a condição prévia da umidade do solo. O resultado desse método é um valor adimensional que varia de 0 a 100, onde o valor zero corresponde a uma bacia que infiltra toda a água incidente e o valor 100 corresponde a uma área completamente impermeável (NEITSCH et al., 2011). O SWAT calcula o escoamento superficial a partir da equação 4.

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - I_a)^2}{(P_d - I_a + S)} \quad (4)$$

sendo, Q_{sup} é o escoamento superficial total (mm), P_d é a precipitação total (mm), I_a é a abstração inicial que abrange o armazenamento, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção (S) é uma variável que varia espacialmente, considerando mudanças no tipo de uso e cobertura solo, além das práticas de manejo e as características de declividade do terreno, sempre tendo como base as condições prévias de umidade (NEITSCH et al., 2011). O SWAT calcula esse parâmetro com base na Equação 5:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

onde CN é o valor da Curva Número para o dia.

A abstração inicial (I_a) é considerada igual a $0,2S$, onde o escoamento só irá ocorrer se $P_d > I_a$. Com isso, a Equação 2 pode ser reescrita conforme apresentado na Equação 6:

$$Q_{sup} = \frac{(P_d - 0,2S)^2}{(P_d + 0,8S)} \quad (6)$$

4.6.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo de perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas. A evapotranspiração é responsável por transferir grandes volumes de água da superfície terrestre para a atmosfera. Além disso, a evapotranspiração é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, e o seu valor integrado no tempo é de suma importância para estudos hidrológicos, agronômicos e de modelagem atmosférica (Borges, 2013).

A evapotranspiração pode ser classificada em dois tipos: potencial/referência e a real. A evapotranspiração potencial (ETP) é a quantidade de água transferida para a atmosfera de uma extensa superfície completamente coberta por vegetação de porte baixo (normalmente grama) e bem suprida de água. Já a evapotranspiração real (ETR) é a quantidade de água transferida para a atmosfera sob as condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo, sendo a ETR sempre menor ou igual à ETP (Tucci e Beltrame, 2014).

4.6.2.1 Evapotranspiração potencial

O SWAT possui 3 métodos para a determinação da evapotranspiração potencial, a saber: Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) ou Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1982). Para realizar as estimativas o modelo utiliza os dados médios climáticos mensais inseridos previamente no seu gerador climático.

Nesse estudo foi adotado o método de Penman-Monteith, que é um dos métodos mais robustos e amplamente utilizado em diversas partes do mundo, expresso pela equação 7.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / ra}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (7)$$

no qual λE é a densidade do fluxo de calor latente (MJ/m²/dia), E é a profundidade da taxa de evaporação (mm/dia), Δ é a inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor (kPa/°C), H_{net} é a radiação líquida (MJ/m²/dia), G representa a densidade de fluxo de calor para o solo (MJ/m²/dia), ρ_{air} é a densidade do ar (kg/m³), c_p é o calor específico (MJ/kg/°C), e_z^0 é a pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa), e_z é a pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa/°C), r_c é a resistência do dossel da planta, e ra é a resistência aerodinâmica.

4.6.2.2 Evapotranspiração real

Com a evapotranspiração potencial devidamente calculada, o SWAT inicia o cálculo da evapotranspiração real. Inicial é estimada a evaporação da água interceptada pelo dossel das plantas e posteriormente calculando a capacidade máxima de evaporação do solo. Neitsch et al., (2011) destaca que a quantidade máxima de água armazenada pelo dossel da vegetação é estimada com base no índice de área foliar, conforme apresentado na equação 8.

$$can_{dia} = Canmx \cdot \frac{IAF}{IAFmax} \quad (8)$$

no qual can_{dia} é a quantidade máxima de água que é interceptada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm), $Canmx$ é a quantidade máxima de água que pode ser interceptada e armazenada no dossel quando este está totalmente desenvolvido (mm), IAF é o índice de área foliar para um determinado dia, e $IAFmax$ é o índice de área foliar máximo para a planta.

Ao selecionar o método de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração potencial, a transpiração das plantas é calculada com base no índice de área foliar conforme apresentado pelas equações 9 e 10.

$$E_t = \frac{E'_0 IAF}{3.0} \quad \text{Se } 0 \leq IAF \leq 3.0 \quad (9)$$

$$E_t = E'_0 \quad \text{Se } IAF > 3.0 \quad (10)$$

no qual E_t é a transpiração máxima em um determinado dia (mm), E'_0 é a evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da água livre dentro do dossel (mm), e o IAF é o índice de área foliar.

Na etapa seguinte o modelo SWAT estima a evaporação do solo mediante uma função exponencial, levando em conta as características da profundidade do solo e a quantidade de água existente, utilizando a equação 11.

$$E_{solo,z} = E_z'' \cdot \frac{z}{(z + \exp(2,374 - 0,00713 \cdot z))} \quad (11)$$

sendo $E_{solo,z}$ a demanda evaporativa (mm) na profundidade z , E_z'' a evaporação máxima do solo para o dia (mm) e z a profundidade do solo (mm).

4.6.2.3 Percolação

O processo de percolação pode ser entendido como a transferência de água do solo para o lençol freático. Esse processo ocorre quando uma determinada camada do solo armazena uma quantidade de água que supera a sua capacidade de campo e a camada imediatamente inferior não está saturada. O volume de água disponível na camada do solo para a percolação é calculado pelas Equações 12 e 13.

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} = FC_{cam} \text{ se } SW_{cam} > FC_{cam} \quad (12)$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \text{ se } SW_{cam} \leq FC_{cam} \quad (13)$$

onde $SW_{cam,excesso}$ é a quantidade de água disponível para percolar no dia (mm), SW_{cam} é a quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm) e FC_{cam} é a quantidade de água na capacidade de campo (mm).

Logo após é então calculada a quantidade de água que é efetivamente transferida para a camada de solo inferior utilizando a Equação 14.

$$w_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (14)$$

onde $w_{perc,cam}$ é a quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm); ΔT é a duração do intervalo de tempo (h); e TT_{perc} é o tempo de percolação entre as camadas (h).

O tempo de percolação entre as camadas é determinado usando a equação 15.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (15)$$

onde SAT_{cam} é a quantidade de água no solo completamente saturado (mm) e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h).

4.6.2.4 Água subterrânea

Como dito anteriormente, os aquíferos são recarregados a partir do processo de percolação da água no solo. A equação 16 estima a quantidade de água que pode recarregar os aquíferos.

$$W_{rec} = \left(1 - \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] \right) W_{seep} + \exp \left[\frac{-1}{\delta_{aq}} \right] W_{rec,i-1} \quad (16)$$

no qual W_{rec} é a quantidade de água que adentra os aquíferos no dia i (mm); δ_{aq} é o tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia); W_{seep} é a quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm); e $W_{rec,i-1}$ é a quantidade de água que entra no aquífero no dia $i - 1$ (mm).

Posteriormente o modelo consegue estimar a quantidade de água que recarrega tanto o aquífero profundo como o aquífero raso, utilizando as equações 17 e 18, respectivamente.

$$W_{prf} = \beta_{prf} \cdot W_{rec} \quad (17)$$

onde W_{prf} é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo no dia i e β_{prf} é o coeficiente de percolação do aquífero.

$$W_{rec,rs} = W_{rec} \cdot W_{prf} \quad (118)$$

onde $W_{rec,rs}$ é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero raso no dia i .

4.7 Calibração de parâmetros do modelo SWAT

Modelos hidrológicos de base física, complexos como o SWAT, que possibilitam a estimativa de diversas variáveis, desde variáveis do ciclo hidrológico, produção de sedimentos, dispersão de poluentes, ente outras, possuem obrigatoriamente uma grande quantidade de parâmetros que necessitam de ajustes específicos para cada área de estudo, esse processo de ajuste pode ser denominado de calibração e que tem por objetivo otimizar a resposta do modelo quando comparado aos dados observados.

Nesse sentido, calibrar modelos que possuem uma grande quantidade de parâmetros torna-se uma tarefa complexa e demorada, sendo assim, utilizar ferramentas que automatizam esse processo de calibração é de suma importância para a diminuição de erros por parte do usuário, bem como, para permitir uma maior quantidade de testes nas configurações dos parâmetros em um menor espaço de tempo.

Para isso, utilizou-se o programa SWAT-CUP SWAT-CUP – SWAT *Calibration and Uncertainty Programs*, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007) e disponibilizado de forma gratuita a partir do portal <https://www.2w2e.com>. O SWAT-CUP além de fornecer uma completa automatização no processo de calibração, também fornece cinco algoritmos distintos para otimizar os parâmetros do modelo SWAT, sempre tendo como objetivo aproximar as estimavas da variável calibrada aos dados observados em campo.

Dentre os cinco algoritmos disponíveis no SWAT-CUP um dos mais utilizados é o *Sequential Uncertainty Fitting – version 2* (SUFI-2). Esse algoritmo estocástico estima todas as incertezas do modelo (parâmetros, modelo conceitual, dados de entrada etc) e determina os valores dos parâmetros calibrados a fim de capturar a maioria dos dados médios dentro de um intervalo de incerteza predefinido (Abbaspour et al., 2015).

Uma das principais vantagens da utilização do algoritmo SUFI-2 é a calibração multiparamétrica, ou seja, é possível analisar e calibrar simultaneamente diversos parâmetros presentes nos processos de simulações do SWAT, com o objetivo de buscar

o melhor resultado através de inúmeras combinações dos parâmetros, variando-os dentro do intervalo permitido pelo SWAT (ROCHA, 2013)

Para a utilização do SUFI2, são necessárias algumas definições básicas, como: (a) escolha dos parâmetros que serão otimizados; (b) o estabelecimento de faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros selecionados, assim como a relação matemática que deve ser adotada para a variação dos valores dos parâmetros; (c) o número de iterações que devem ser realizadas; (d) as variáveis a serem verificadas (vazão observada, por exemplo), incluindo a série histórica a ser considerada; (e) a função objetivo a ser utilizada como referência (SANTOS, 2015).

Neste estudo foram calibrados 19 parâmetros do modelo SWAT utilizados para a estimativa da vazão. Esses parâmetros foram selecionados de acordo com estudos prévios que os identificaram como sendo parâmetros que influenciam diretamente no escoamento para as condições das bacias hidrográficas inseridas no semiárido nordestino, conforme os estudos de Aragão et al. (2013), Bressiani et al. (2015) e Dantas et al. (2015).

Para cada execução do SWAT-CUP foram realizadas 500 iterações, ou seja, 500 configurações de parâmetros distintas, onde em cada uma dessas iterações os valores de cada parâmetro são modificados simultaneamente, o que agiliza o processo de calibração. Ao final de cada uma das execuções do SWAT-CUP, são obtidas como resultados os valores dos índices estatísticos que analisam o desempenho do modelo comprando-os com os dados observados, mostrando: (a) os valores utilizados de cada parâmetro, (b) os resultados dos índices de desempenho do modelo, (c) os valores simulados para a variável indicada (nesse caso a vazão) e (d) a iteração que apresentou o melhor ajuste.

Além disso, é calculada a sensibilidade de cada um dos parâmetros calibrados. O SWAT-CUP apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: (1) o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, considerando que quanto maior for o seu valor, mais sensível será o parâmetro; e (2) o *p-value*, que determina a significância da sensibilidade, sendo que um valor próximo à zero indica maior significância.

Um dos principais pontos na utilização do SWAT-CUP é a determinação da relação matemática realizada pelo modelo, ou seja, qual a forma que o SWAT-CUP irá alterar os valores dos parâmetros. É possível optar por três métodos de alteração dos parâmetros, a saber: (a) substituição (=) - substitui o valor existente por outro; (b) adição (+) - um novo valor é adicionado ao valor inicial do parâmetro; (c) multiplicação (×) - aumentar ou diminuir o valor inicial através de porcentagem.

A Tabela 10 apresenta a descrição dos parâmetros utilizados no processo de calibração do modelo SWAT, assim como a sua faixa de variação e relação matemática adotada. Destaca-se que os intervalos que representam os valores reais dos parâmetros são apenas os do método de substituição (=), os demais valores serão somados ou multiplicados pelos parâmetros.

Tabela 10 - Lista dos parâmetros calibrados pelo SWAT-CUP

| Parâmetros | Descrição | Intervalos mínimos e máximos | Métodos |
|-------------------|---|-------------------------------------|----------------|
| Alpha_Bf | Fator de recessão de escoamento de base (dias) | 0 – 1 | = |
| Biomix | Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional) | 0 – 1 | = |
| Canmx | Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm) | 0 – 10 | = |
| Cn2 | Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional) | -0 – 2 | × |
| Ch_K2 | Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h) | 0 – 5 | = |
| Ch_N2 | Coefficiente de Manning do canal (adimensional) | 0 – 0,3 | = |
| Epc0 | Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional) | 0 – 1 | = |
| Esco | Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional) | 0,5 – 1 | = |
| Gw_delay | Tempo de recarga do aquífero (dias) | -30 - 60 | + |
| Gw_revap | Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada (adimensional) | 0,02 – 0,2 | = |
| Gw_qmn | Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm) | 0 – 1000 | = |
| Rchrg_Dp | Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração) | -0,04 – 0,05 | × |
| Revapmn | Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm) | 0 – 10 | = |
| Slsbbsn | Comprimento da declividade média (m) | -0,25 – 0,25 | × |
| Sol_Al0 | Albedo do solo (adimensional) | -0,25 – 0,25 | × |
| Sol_Awc | Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm) | -0,25 – 0,25 | × |
| Sol_K | Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h) | -0,25 – 0,25 | × |

4.8 Índices de desempenho para avaliação do desempenho do modelo SWAT

Para verificar a eficiência do modelo, isto é, mensurar o desempenho do modelo na estimativa da variável analisada foram utilizados dois índices estatísticos: o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS (NASH e SUTCLIFFE, 1970), e o Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2). Esses dois índices estatísticos são comumente utilizados em estudos hidrológicos (Duan et al., 2019; Gabiri et al., 2019; Shi et al., 2019).

O Nash analisa o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, no qual Nash = 1 indica um ajuste perfeito. Esse coeficiente é calculado pela Equação 19. O R^2 calcula a associação linear entre duas variáveis, também variando de $-\infty$ (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela Equação 20.

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right] \quad (19)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right]^2 \quad (20)$$

sendo Q_{obs} : vazão observada; Q_{sim} : vazão simulada pelo modelo; $\overline{Q_{obs}}$ média da vazão observada; $\overline{Q_{sim}}$ média da vazão simulada; n : quantidade de dados na série de vazões observadas.

Para avaliar o desempenho do modelo SWAT, utilizou-se a classificação utilizada por Moriasi et al. (2007), que assumem faixas de valores de insatisfatórios a muito boa para os valores de R^2 e Nash, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação do desempenho do modelo SWAT

| Classificação | R^2 | Nash |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Muito boa | $0,80 < R^2 \leq 1,00$ | $0,75 < Nash \leq 1,00$ |
| Boa | $0,70 < R^2 \leq 0,80$ | $0,65 < Nash \leq 0,75$ |
| Satisfatória | $0,60 < R^2 \leq 0,70$ | $0,50 < Nash \leq 0,65$ |
| Insatisfatória | $R^2 \leq 0,60$ | $Nash \leq 0,50$ |

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise das alterações no uso e cobertura do solo para a BHRS

No presente trabalho, foi analisada a evolução do uso e cobertura do solo para um período de 34 anos, de 1985 a 2018. Ao longo desse período foram consideradas oito classes de uso e cobertura do solo, a saber: Formação florestal, formação savânica, formação campestre, pastagem, agricultura, urbano, solo exposto e água.

A Figura 14 apresenta a evolução de cada uma das classes ao longo do período analisado. Observa-se que em todos os anos a classe predominante foi a de formação savânica, apresentando sempre uma área de abrangência superior aos 6.000 km² e com uma média de 7.287,20 km² o que representa em média 56% da área de toda a BHRS. Além de ser possível observar que essa classe foi a mais representativa ao longo dos anos analisados, com base na figura 14 também fica evidente que ao longo dos anos houve um perca gradual das áreas de formação savânica na bacia.

Por sua vez, a classe formação florestal apresentou um comportamento relativamente estável, variando em aproximadamente 500 km², como pode ser observado na figura 14. Apesar de não ter sido observada grandes variações para essa classe de uso e cobertura da terra, observa-se que entre os anos de 1985 e 2011 existe uma diminuição das áreas de formação florestal, contudo, a partir de 2012 houve um aumento visível nas áreas dessa classe, alcançando o seu valor máximo no ano de 2018. Além disso, a baixa variabilidade observada para essa classe, pode estar associada a área de preservação permanente do Parque Floresta do Araripe, localizado na porção sudoeste da bacia (figura 15).

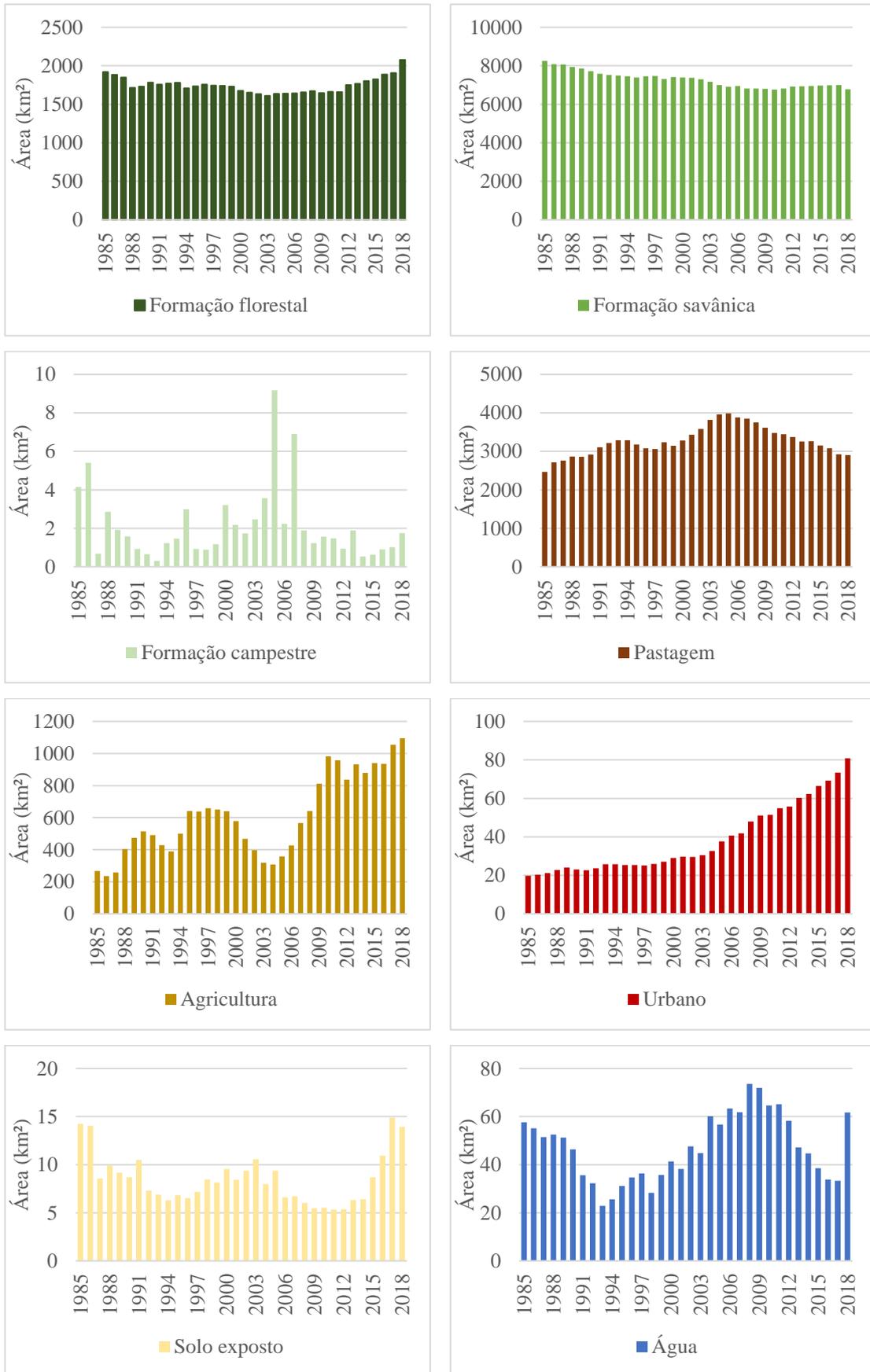


Figura 14 - Evolução do uso e cobertura do solo da BHRs.

Dentre as classes presentes na BHRS as que apresentaram um crescimento mais evidente foram a agricultura e o urbano. Analisando a evolução da classe Agricultura, ao longo dos anos estudados, é possível observar períodos onde houve consideráveis aumentos e diminuições em sua área. Em um primeiro momento, entre os anos de 1985 e 1998 observou-se que as áreas de agricultura praticamente triplicaram, saindo de aproximadamente 250 km² e chegando aos 624 km². Apesar desse aumento expressivo, em 5 anos (1999 – 2004) houve uma diminuição de mesma ordem, onde as áreas de agricultura retornam praticamente para o patamar inicial. Por fim, a partir do ano de 2005 até 2018 houve uma clara expansão da áreas de agricultura, chegando a aproximada 1100 km². primeira apresentou aumentos e diminuições da área a longo dos anos, contudo, a classe urbana apresentou um crescimento praticamente linear (Figura 14).

Para a classe pastagem, ficou evidente dois momentos ao longo dos 34 anos analisados. Em um primeiro momento, entre os anos de 1985 e 2006 houve um aumento na área a cada ano, contudo, a partir de 2007 é percebido uma diminuição gradativa das áreas de pastagem na BHRS. Já com relação as demais classes, não apresentaram um padrão em suas variações ao longo do período em estudo.

Analisando as variações ocorridas entre 1985 e 2018, as classes que apresentaram a maior variação foram as classes Agricultura e Urbano, com um aumento de 309% cada uma delas (Tabela 12). Ainda analisando as variações entre o ano inicial e o ano final da série, a classe que mais perdeu área na BHRS foi a de formação campestre, que perdeu 58% da sua área ao longo de 34 anos. Por sua vez, as classes que apresentaram as menores variações, em termos absolutos, foram formação florestal, água e solo exposto, com 8%, 7% e 2%, respectivamente.

Contudo, a análise das variações das classes de uso e cobertura do solo ocorridas entre o ano inicial e final da série, não representa de forma satisfatória o estudo das modificações ocorridas na BHRS. Para isso, a Tabela 12 apresenta as variações ano a ano para cada uma das classes de uso e cobertura do solo.

Analisando a tabela 12, observa-se que a classe formação campestre foi a que apresentou as maiores variações ao longo do tempo, tendo variações positivas superiores aos 200% em 3 anos (1988, 1994 e 2007), bem como, reduções significativas com percas superiores aos 80%, como foi o caso de 1987, onde houve uma diminuição de 87% das áreas de formação campestre na BHRS.

Tabela 12 - Variação anual do uso e cobertura do solo na BHRS

| CLASSES | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | a | a | a | a | a | a | a | a |
| | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
| Formação florestal | -2% | -2% | -7% | 1% | 3% | -1% | 1% | 0% |
| Formação savânica | -2% | 0% | -2% | -1% | -2% | -2% | -1% | 0% |
| Formação campestre | 30% | -87% | 322% | -33% | -18% | -41% | -30% | -53% |
| Pastagem | 10% | 2% | 4% | 0% | 2% | 7% | 4% | 2% |
| Agricultura | -12% | 9% | 57% | 18% | 9% | -5% | -13% | -9% |
| Urbano | 3% | 5% | 8% | 5% | -4% | -2% | 5% | 9% |
| Solo exposto | -1% | -39% | 16% | -7% | -5% | 20% | -30% | -6% |
| Água | -4% | -7% | 2% | -2% | -10% | -23% | -9% | -29% |

| 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a |
| 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| -4% | 2% | 1% | -1% | 0% | -1% | -3% | -1% | -1% | -1% | 2% |
| -1% | -1% | 1% | 0% | -2% | 1% | 0% | 0% | -1% | -2% | -2% |
| 298% | 19% | 104% | -69% | -4% | 32% | 172% | -32% | -20% | 42% | 44% |
| 0% | -3% | -3% | -1% | 6% | -3% | 4% | 5% | 4% | 6% | 4% |
| 28% | 28% | -1% | 3% | -1% | -2% | -9% | -19% | -15% | -20% | -3% |
| 0% | -2% | 0% | -1% | 3% | 4% | 7% | 2% | -1% | 3% | 7% |
| -9% | 8% | -4% | 10% | 18% | -4% | 17% | -12% | 11% | 13% | -25% |
| 12% | 22% | 11% | 5% | -22% | 26% | 16% | -8% | 25% | -6% | 34% |

| 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a | a | a | a | a | a | a | a | a | a | a |
| 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| 0% | 0% | 1% | 1% | -1% | 1% | 0% | 6% | 1% | 2% | 1% |
| -1% | 1% | -2% | 0% | 0% | -1% | 1% | 2% | 0% | 0% | 0% |
| 158% | -76% | 209% | -72% | -35% | 28% | -6% | -36% | 102% | -71% | 15% |
| 1% | -3% | -1% | -3% | -4% | -4% | -1% | -2% | -4% | 0% | -3% |
| 16% | 19% | 33% | 13% | 27% | 21% | -2% | -13% | 11% | -6% | 7% |
| 15% | 8% | 3% | 15% | 6% | 1% | 7% | 2% | 8% | 3% | 7% |
| 18% | -30% | 2% | -10% | -10% | 2% | -4% | 0% | 18% | 1% | 36% |
| -6% | 12% | -2% | 19% | -2% | -10% | 1% | -11% | -19% | -5% | -14% |

| 2015 | 2016 | 2017 | 1985 |
|------|------|------|------|
| a | a | a | a |
| 2016 | 2017 | 2018 | 2018 |
| 3% | 1% | 9% | 8% |
| 0% | 0% | -3% | -18% |
| 45% | 13% | 71% | -58% |
| -2% | -5% | -1% | 18% |
| -1% | 13% | 4% | 309% |
| 4% | 6% | 10% | 309% |
| 26% | 36% | -6% | -2% |
| -12% | -1% | 85% | 7% |

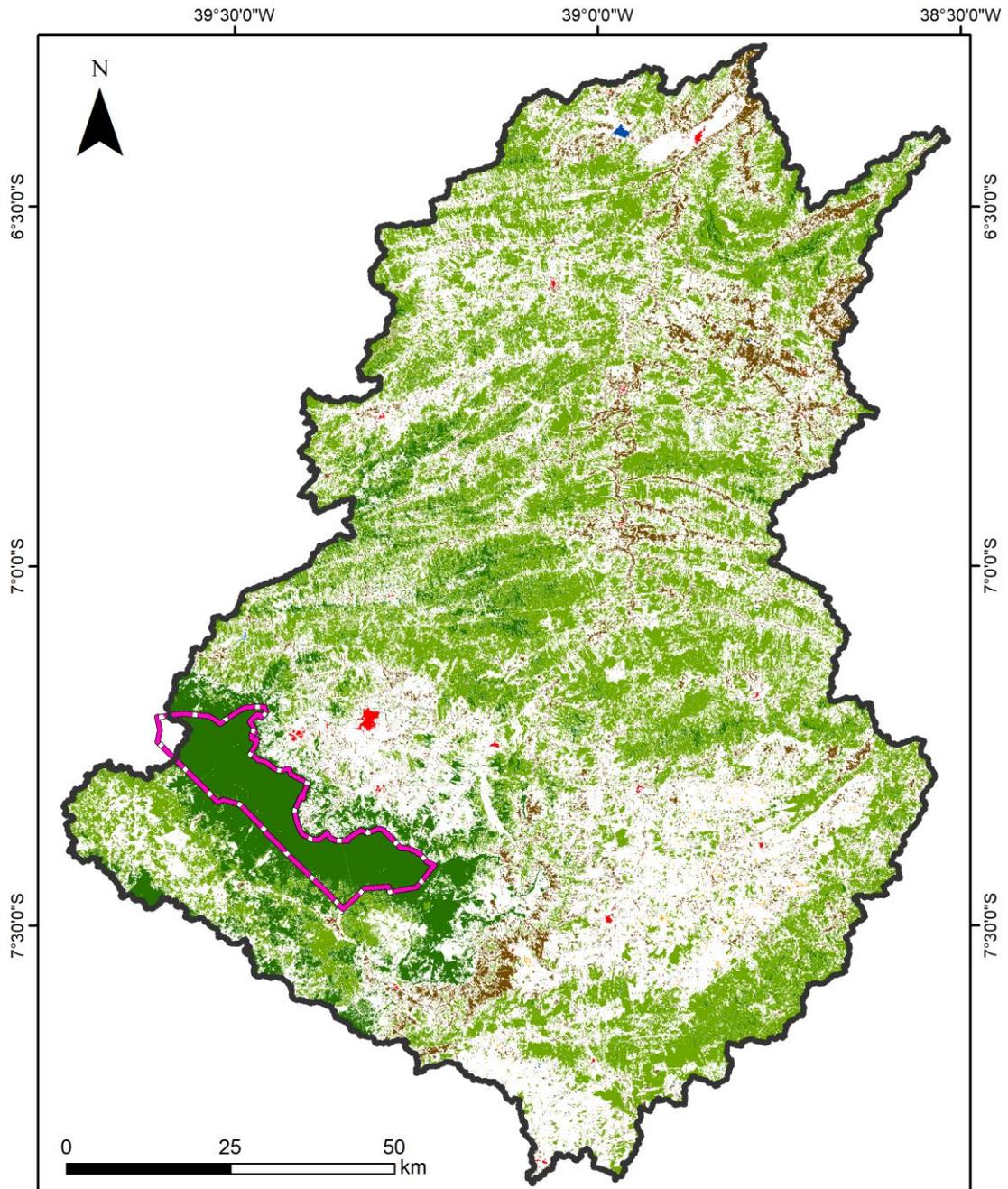
Com relação a classe formação savânica, em termos absolutos, não houve variação anual superior a 3% durante os 34 anos analisados, contudo, houve uma constância na diminuição da área desse tipo de uso e cobertura do solo na bacia. Ao longo período em estudo, a BHRS perdeu 0.59% ao ano de formação savânica, totalizando uma perda de 18% em 34 anos.

Para as classes que apresentaram os maiores ganhos de área, Agricultura e urbano, destaca-se dois períodos distintos ao longo do período analisado. O crescimento das áreas classificadas como urbano foi intensificado a partir do ano de 2003. Entre os anos 1985 a 2003 a área da classe urbano crescia em média 2% ao ano, totalizando 54% ao longo dos primeiros 18 anos da série. Entretanto, a partir de 2004 essa média sobe para 7% ao ano, totalizando entre 2004 e 2018 um aumento de 165% das áreas classificadas como urbano na BHRS.

O mesmo ocorreu com a classe agricultura, a partir de 2003 houve uma intensificação na expansão desse tipo de uso e cobertura do solo, passando de uma variação média de 3% (1985–2003) para 9% ao ano a partir de 2004. Com isso, observou-se entre os anos de 2003 e 2018 um ganho total de 243% nas áreas classificadas como agricultura na bacia.

Por fim, buscou-se identificar em quais partes da BHRS ocorreram de forma mais representativas as alterações no uso e cobertura do solo ao longo dos 34 anos analisados. Para isso, foi elaborado um mapa identificando as áreas inalteradas ao longo desse período, ou seja, as áreas que em todos os anos foram classificadas como sendo a mesma classe de uso e cobertura em todo os anos da série.

A Figura 15 apresenta a distribuição espacial das áreas consideradas inalteradas na BHRS. As áreas em branco são aqueles em que houve a alteração no uso e cobertura do solo em ao menos 1 dos anos analisados. Com base na figura 15 observa-se que as áreas que houve alterações no uso e cobertura do solo, estão localizadas ao sul e sudeste da bacia. Em contrapartida, as áreas mais declivosas, próximo aos limites da bacia e na região central dela, não apresentaram alterações. Na porção sudoeste da BHRS destaca-se a presença de uma extensa área de formação floresta que não apresentou alterações ao longo dos 34 anos analisados, essa porção da bacia é uma área de proteção permanente, delimitada como sendo a Floresta Nacional do Araripe-Apodi.



Áreas inalteradas (1985 - 2018)

- | | |
|--|---|
|  Parque Floresta do Araripe |  Pastagem |
|  Formação florestal |  Agricultura |
|  Formação savânica |  Urbano |
|  Formação campestre |  Água |

Sistema de Coordenadas Lat./Long.
DATUM - SIRGAS2000

Figura 15 - Áreas de uso e cobertura do solo inalteradas entre 1985 e 2018 na BHRS.

Com base na Tabela 13, verifica-se que 49,93% da BHRS não apresentou alterações no uso e cobertura do solo entre os anos de 1985 e 2018. Desse total, 32,12% da área total da bacia permaneceu como formação savânica ao longo dos 34 anos, enquanto, 10,24 % da área da bacia esteve recoberta por formação florestal ao longo do período analisado.

Tabela 13 - Área da BHRS que não foram alteradas entre 1985 e 2018.

| Classes | Área (km²) | % |
|--------------------|------------------------------|---------------|
| Formação florestal | 1332,34 | 10,24% |
| Formação savânica | 4438,46 | 34,12% |
| Formação campestre | 0,031 | 0,00% |
| Pastagem | 690,28 | 5,31% |
| Agricultura | 11,97 | 0,09% |
| Urbano | 17,20 | 0,13% |
| Solo exposto | 0,10 | 0,00% |
| Água | 5,80 | 0,04% |
| TOTAL | 6496,18 | 49,93% |

6.2 Modelagem futura do uso e cobertura da terra

Para a realização da modelagem futura do uso e cobertura da terra para a BHRS, foram utilizadas as imagens de 1985 (t_1) e 2000 (t_2), como imagens de referência para o modelo. Com isso, foram analisadas todas as transições entre essas duas imagens, a fim de determinar uma relação entre as mudanças identificadas na bacia com as variáveis exploratórias. Essas variáveis têm por objetivo auxiliar o modelo a determinar a alocação espacial das demandas dos diferentes usos e coberturas do solo.

A Figura 16 apresenta a mudança líquida para cada tipo de uso e cobertura da terra para a BHRS entre t_1 e t_2 . Observa-se que a classe que apresentou a maior perda de área foi a formação savânica, perdendo aproximadamente 900 km² de área seguido da formação florestal com cerca de 250 km² de diminuição na área. Em contrapartida, as classes pastagem e agricultura foram as que apresentaram os maiores ganhos de área, com 814 km² e 312 km², respectivamente.

Para melhor compreender a dinâmica das alterações dos usos e cobertura da terra na BHRS é necessário analisar separadamente as transições entre cada uma das classes, dessa forma, é facilitada a relação entre essas transições e as variáveis exploratórias.

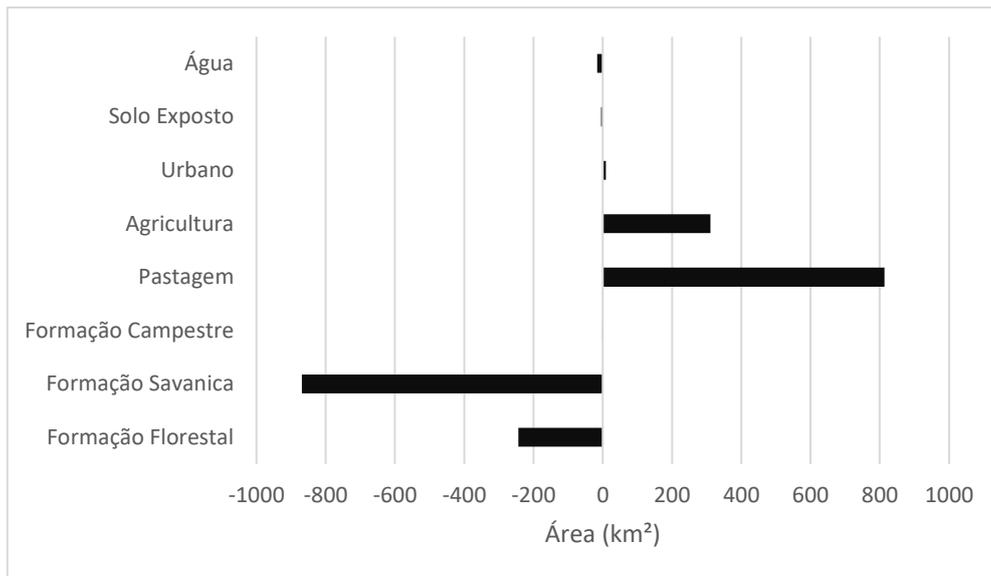


Figura 16 - Ganhos e perdas de área em km² para cada tipo de uso e cobertura da terra.

Com base na Figura 17, é possível verificar que existe uma dinâmica clara entre as mudanças no uso e cobertura da terra na BHRS. Inicialmente destaca-se que as principais transições ocorrem entre as classes de formação florestal, formação savânica, agricultura e pastagem. As demais classes apresentam transições que representam uma ínfima parcela da bacia.

A formação savânica predominantemente foi convertida em pastagem, ao todo aproximadamente 940 km² foram convertidos entre essas duas classes. Ao mesmo tempo que as maiores mudanças da classe pastagem são as conversões para agricultura. Entre t_1 e t_2 foram convertidos mais de 240 km² de pastagem para áreas agricultáveis.

Face ao exposto, foram definidas como as transformações mais relevantes para a bacia as seguintes conversões: Formação savânica para pastagem; formação savânica para agricultura; Pastagem para agricultura. Com isso, as demais transições são desconsideradas pelo fato de não serem representativas quando comparadas à área total da bacia.

Com as transições definidas foram analisadas a relação entre as variáveis exploratórias e as conversões das classes, essa relação é definida a partir do valor do V de Cramer. Com base nesses valores foram selecionadas as variáveis que possuem relação com as mudanças observadas na bacia, e que posteriormente serão utilizadas pelo modelo para a alocação espacial das mudanças.

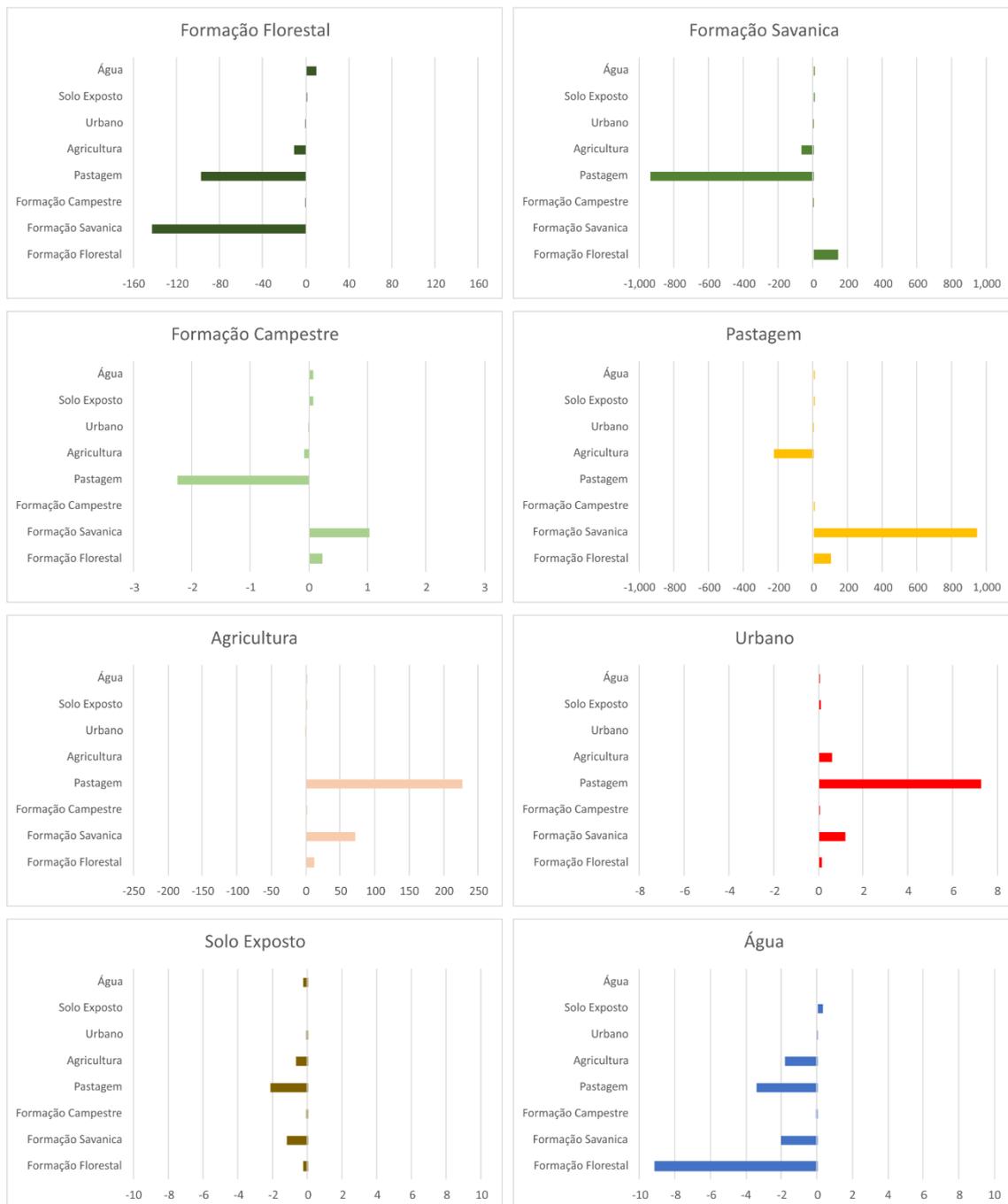


Figura 17 - Transições em km² dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra na BHRs.

As variáveis que apresentaram os valores de V de Cramer mais significativos foram para o período modelado estão apresentadas na tabela 14. Foram selecionadas apenas as variáveis com V de Cramer superiores a 0,15 conforme as recomendações de (XAVIER, 2017).

Tabela 14 - Lista das variáveis exploratórias utilizadas para a modelagem do LCM

| Variável explanatória | V de Cramer |
|--|--------------------|
| Mapa de mudanças entre t ₁ e t ₂ | 0,6798 |
| Modelo digital de elevação | 0,2152 |
| Temperatura do ar | 0,1784 |
| pH do solo | 0,3104 |

Com as transições definidas e as variáveis exploratórias selecionadas foi realizada uma predição inicial para a validação do modelo, nesse estudo foi estimado o uso e cobertura da terra para o ano de 2015 (t₃). As figuras 18a-18d apresentam os mapas base do modelo referentes a t₁ e t₂ (figuras 18a e 18b), bem como, o mapa de referência para o período de validação t₃ (figura 18c) e o mapa simulado para t₃ (figura 18d).

Analisando as figuras 18c e 18d pode-se observar uma nítida diferença na porção sudoeste da bacia entre o mapa de referência e do mapa de validação, o modelo praticamente substituiu toda a área de vegetação savânica por pastagem. Nas demais áreas da bacia não é possível verificar diferenças consideráveis entre o mapa de referência o predito para o ano de 2015.

Com relação as áreas de cada classe de uso e cobertura da terra as maiores diferenças encontradas entre a simulação e a imagem de referência foram para as classes de Formação campestre e urbano, com 418,10% e -56,26% de diferença, respectivamente. Entretanto, essa variação não apresenta grande impacto na estimativa da bacia como um todo, devido ao fato de que essas classes possuem baixa representatividade em toda a bacia.

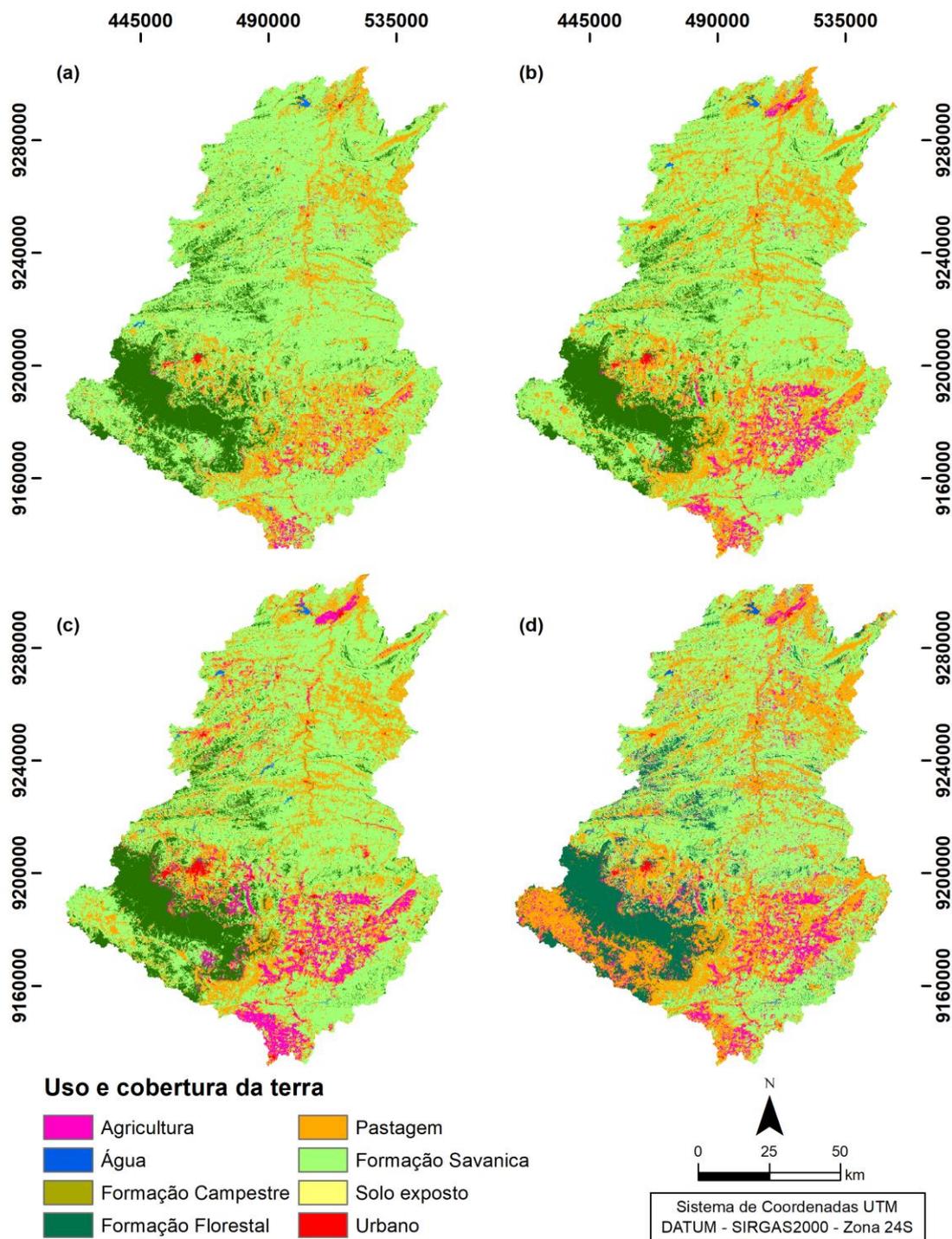


Figura 18 - Mapas de uso e cobertura da terra utilizados pelo modelo LCM – (a) Mapa base 1985 (t1); (b) Mapa base 2000 (t2); Mapa de referência 2015 (t3); (d) Mapa simulado para validação 2015.

A tabela 15 mostra as diferenças mais significativas para a bacia são uma subestimativa da formação savânica em 13,91% e um superestimativa da pastagem em 31,08%, associados principalmente a conversão entre essas duas classes apresentada

anteriormente, predominante na porção sudoeste da BHRS. Além disso, destaca-se um aumento de 18,24% na área de agricultura e uma diminuição de 8.13% na formação florestal, entre as imagens de referência e a estimada para o ano de 2015.

Tabela 15 - Diferenças das áreas de uso e cobertura da terra para a validação do modelo LCM.

| Classe | Mapa de referência (km²) | Mapa simulado (km²) | Diferença (%) |
|--------------------|--|---|--------------------------|
| Formação Florestal | 1,824.13 | 1,675.77 | -8.13% |
| Formação Savânica | 6,980.85 | 6,009.83 | -13.91% |
| Formação Campestre | 0.62 | 3.19 | 418.10% |
| Pastagem | 3,149.30 | 4,128.17 | 31.08% |
| Agricultura | 941.05 | 1,112.68 | 18.24% |
| Urbano | 66.63 | 29.15 | -56.26% |
| Solo Exposto | 8.70 | 9.56 | 9.90% |
| Água | 38.48 | 41.41 | 7.63% |
| Total | 13,009.76 | 13,009.76 | |

Ainda com o objetivo de verificar a acurácia da estimativa do LCM para o período de validação foi calculado o índice Kappa que é uma medida de associação utilizada para testar o grau e concordância entre dois conjuntos de dados, para essa estimativa foi calculado um Kappa de 0,7697 evidenciando que o modelo LCM apresentou uma boa acurácia na estimativa do uso e cobertura da terra.

Com o modelo validado foi realizada a estimativa do uso e cobertura do solo para o ano de 2050 (t4), apresentado na figura 19. Com base na figura é possível verificar que o modelo estimou uma expansão das áreas de pastagem na bacia, predominantemente na região sul da BHRS, área predominantemente sedimentar. Além disso, também destaca-se as áreas de agricultura, distribuídas predominantemente na porção sul e nordeste da BHRS.

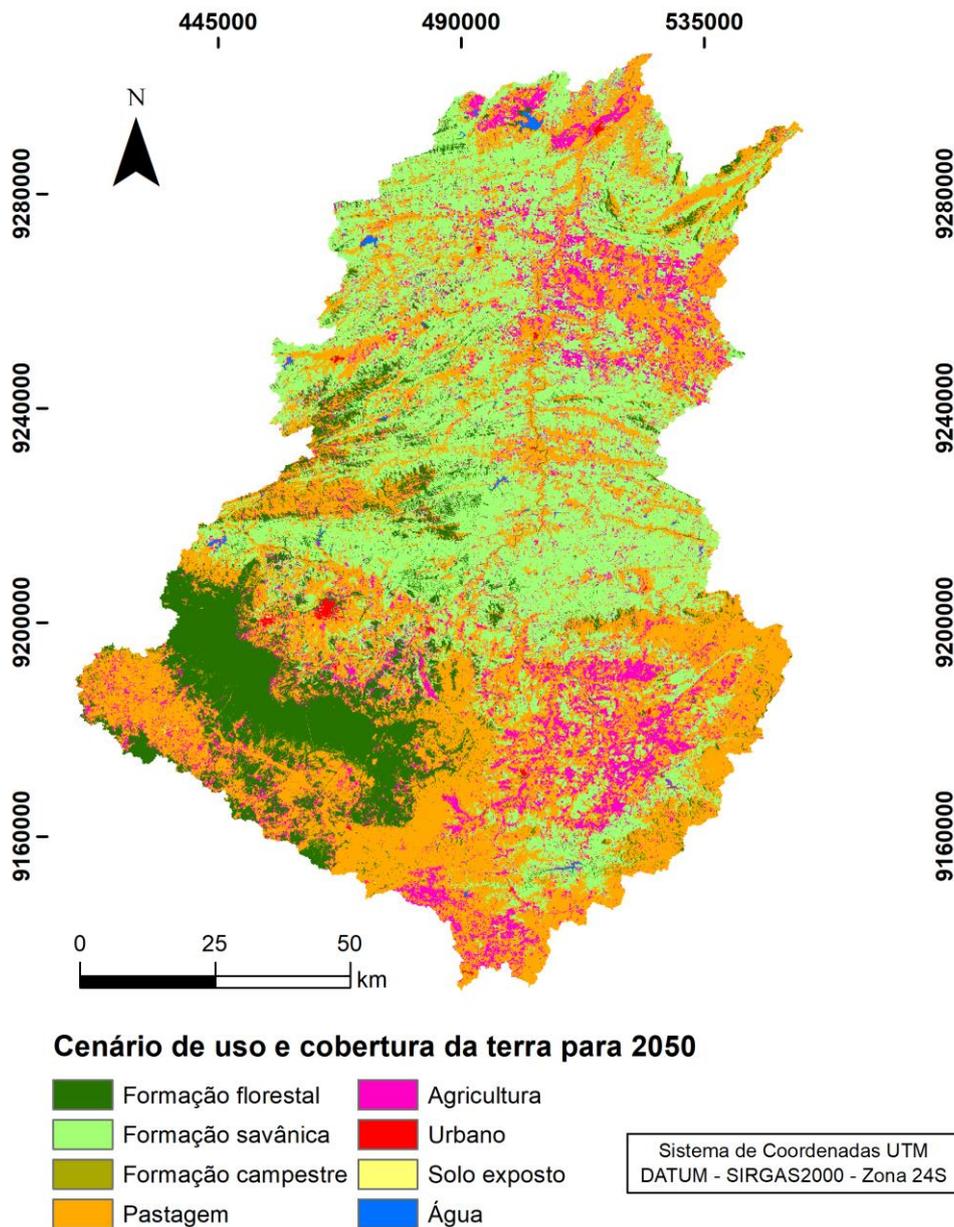


Figura 19 - Cenário de uso e cobertura da terra para o ano de 2050.

Desta forma, as estimativas mostram uma continuidade na diminuição das áreas de vegetação savânica e no aumento das áreas de agricultura, além disso, aponta uma retomada do aumento das áreas de pastagem observados anteriormente na figura 14 e na tabela 12. Para o ano de 2050 na BHRS, a classe de pastagem será a mais representativa segundo a estimativa, com aproximadamente 40% (Tabela 16) da área da bacia, seguido pelas classes de Formação savânica, Formação florestal e Agricultura, com 35%, 13% e 12% da área da bacia, respectivamente.

Tabela 16 - Áreas das classes de uso e cobertura da terra simuladas para 2050

| Classe | Uso simulado 2050 (km²) | % |
|--------------------|---|----------------|
| Formação Florestal | 1.675,77 | 12,88% |
| Formação Savânica | 4.572,68 | 35,15% |
| Formação Campestre | 3,19 | 0,02% |
| Pastagem | 5.169,97 | 39,74% |
| Agricultura | 1.508,02 | 11,59% |
| Urbano | 29,15 | 0,22% |
| Solo Exposto | 9,56 | 0,07% |
| Água | 41,41 | 0,32% |
| Total | 13.009,76 | 100,00% |

6.3 Análise dos cenários de mudanças climáticas

Com relação aos cenários de mudanças climáticas, foram analisados cinco modelos globais e quatro cenários denominados de *Representative Concentration Pathways* - RCP (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5) apresentados anteriormente, totalizando assim 20 cenários de mudanças climáticas. Apesar de todos os modelos fornecerem estimativas de 2006 a 2099, optou-se por analisar as influências desses cenários na vazão da BHRS para um período de dados menor, entre os anos de 2030 e 2060. Essa escolha, deve-se principalmente ao fato de o modelo SWAT permitir a entrada de um único uso do solo para toda a série temporal, apesar do modelo permitir a configuração de alterações intra- anuais entre as classes de uso e cobertura do solo, não é possível alterar espacialmente essas classes, desta forma, ampliar o tamanho da série implicada em adicionar incertezas as estimativas.

Para toda a bacia foram necessários coletar os dados de 16 pontos, especializados na Figura 20. Inicialmente foi realizada uma análise desses cenários de previsão climática, comparando os dados desses modelos com os dados observados da bacia, tanto para as previsões de precipitação, como para a temperatura máxima e mínima.

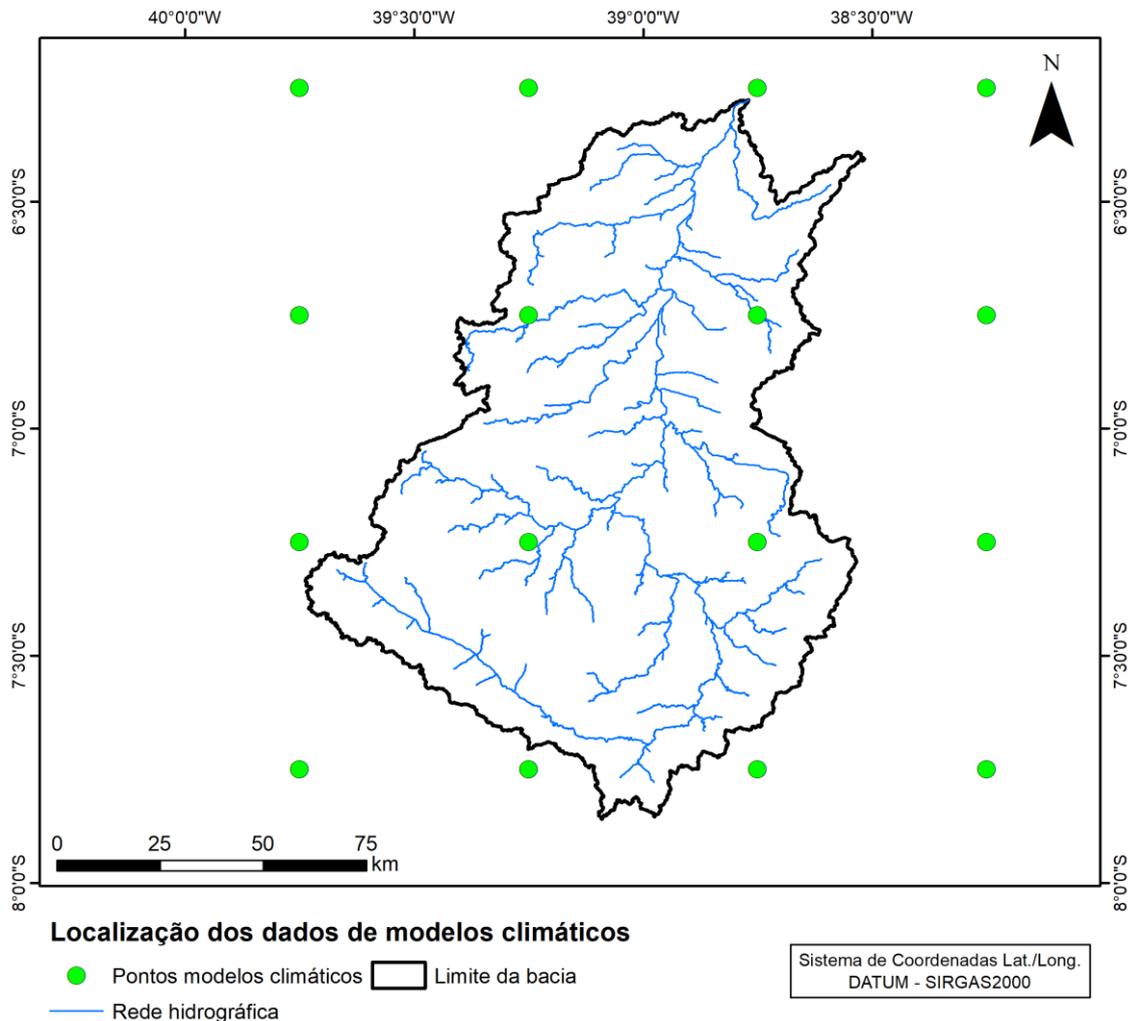


Figura 20 - Espacialização da malha de pontos dos modelos climáticos globais.

Para a realização deste estudo foram calculadas as médias mensais de precipitação para o período 1986 a 2017, sendo considerado como os dados Históricos, apresentados nessa comparação com os dados de modelos climáticos. Já com relação as médias mensais dos modelos foram calculadas para cada um dos RCP's entre os anos de 2030 e 2060. Observando as Figuras 21a–21d pode-se observar que de modo geral, o comportamento pluviométrico da bacia será mantido, de acordo com as estimativas dos modelos climáticos, sendo o período chuvoso entre os meses de janeiro e abril e os meses mais secos de julho a novembro, independente do cenário RCP.

Além disso, observa-se também que em todos os RCP's houveras estimativas dos modelos climáticos que ultrapassaram as médias observadas nos dados históricos, principalmente durante os meses de janeiro a abril. Os modelos que mais apresentaram estimativas superiores as médias históricas para esses meses foram o HadGEM2-Es e o

IPSL-CM5A-LR. Para o cenário RCP 8.5, por exemplo, de janeiro a maio o modelo IPSL-CM5A-LR estimou precipitações bem superiores as observadas nas médias históricas, mostrando assim, um alto nos eventos extremos de precipitação na bacia para esses meses.

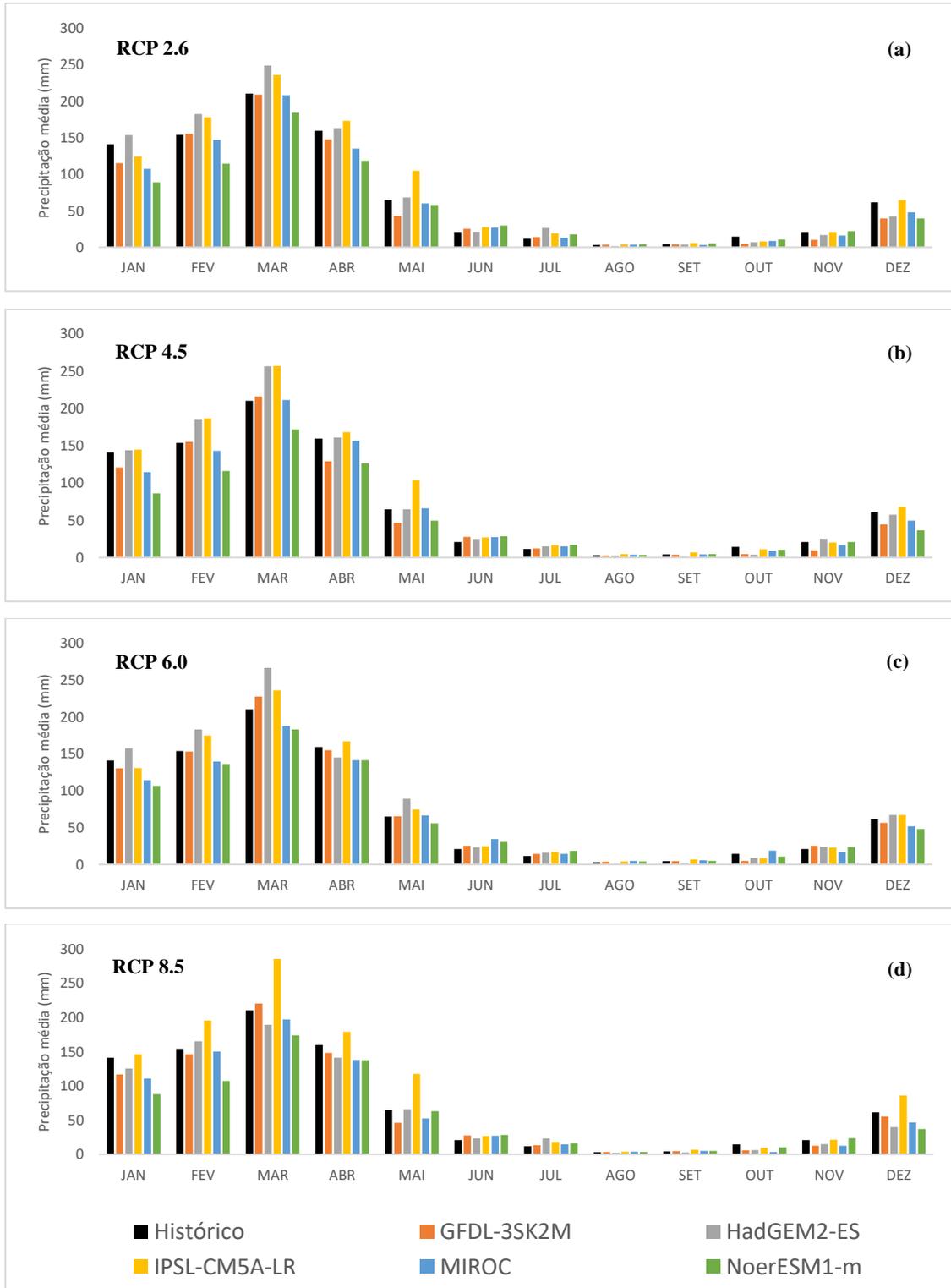


Figura 21 – Variabilidade anual da precipitação prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRS

Ao analisar as variações entre as médias mensais históricas e as estimadas pelos modelos climáticos (Tabela 18), observa-se que independente do cenário RCP todos modelos estimam totais pluviométricos inferiores aos observados nas médias históricas dos meses mais secos. Por exemplo, para o mês de outubro no cenário RCP 2.6 é previsto uma diminuição na precipitação média entre -26,14% e -65,55%, enquanto para o RCP 8.5 essa diminuição é ainda mais acentuada, variado de -30,44% para o modelo NoerESM1-m e -76,05% para o modelo MIROC.

Além disso, também foi observado uma previsão de aumento da precipitação média para os meses de junho e julho em todos os modelos e cenários, chegando a estimar um aumento da precipitação média superior aos 100%, como por exemplo, o modelo a HadGEM2-ES no cenário RCP 2.6, onde prevê um aumento de 128,05% para o mês de julho.

Com relação aos meses mais chuvosos, o modelo NoerESM1-m é aquele que prevê as maiores diminuições dos totais pluviométricos em todos os RCP's. Esse modelo em média prevê uma diminuição de -22,67% do total pluviométrico entre os meses de janeiro e abril. Sendo a maior diminuição encontrada para o mês de janeiro no cenário RCP 4.5, no qual a previsão é de -38,90% quando comparado com a média histórica.

Entre os anos de 1986 e 2017 a precipitação média anual para a BHRS foi de 866.16 mm. A tabela 17 apresenta as estimativas da precipitação média anual para cada um dos modelos climáticos e seus respectivos cenários, bem como, o calcula da diferença entre essas estimativas e a média histórica. Com base na tabela 17, observa-se que o modelo IPSL-CM5A-LR é o único que prevê um aumento na precipitação média anual para o período de 2030 a 2060 em todos os cenários analisados. Esse modelo prevê um aumento entre 7,72% no cenário RCP 6.0 e 26,36% no cenário RCP 8.0.

Tabela 17 – Precipitação média anual para diferentes cenários e modelos climáticos

| Cenário | GFDL-3SK2M | | HadGEM2-ES | | IPSL-CM5A-LR | | MIROC | | NoerESM1-m | |
|---------|------------|---------|------------|---------|--------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | Média (mm) | Dif (%) | Média (mm) | Dif (%) | Média (mm) | Dif (%) | Média (mm) | Dif (%) | Média (mm) | Dif (%) |
| RCP 2.6 | 770,72 | -11,02% | 933,90 | 7,82% | 965,79 | 11,50% | 777,28 | -10,26% | 691,86 | -20,12% |
| RCP 4.5 | 770,72 | -11,03% | 933,90 | 7,91% | 965,79 | 11,49% | 777,28 | -10,27% | 691,86 | -20,12% |
| RCP 6.0 | 865,56 | -0,07% | 982,78 | 13,46% | 933,04 | 7,72% | 795,55 | -8,15% | 763,01 | -11,91% |
| RCP 8.0 | 799,39 | -7,71% | 797,96 | -7,87% | 1094,47 | 26,36% | 759,83 | -12,28% | 692,87 | -20,01% |

Em contrapartida, os modelos GFDL-3SK2M, MIROC e NoerESM1-m preveem apenas diminuições na precipitação média anual da bacia em todos cenários. Dentre eles, o modelo NoerESM1-m é o que prevê as maiores diminuições na precipitação da bacia, com uma diferença entre -11.91% no RCP 6.0 e -20.12% nos cenários RCP 2.6 e RP 4.5. Com base na tabela 17, também é possível verificar que a nível anual existe pouquíssimas diferenças entre as estimativas dos modelos entre os cenários RCP 2.6 e 4.5, analisando a nível mensal (Tabela 18) essa diferença é mais expressiva.

Tabela 18 – Diferença entre a precipitação média mensal do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários

| | | GFDL-3SK2M | HadGEM2-ES | IPSL-CM5A-LR | MIROC | NoerESM1-m |
|----------------|-----|-------------------|-------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| RCP 2.6 | JAN | -18,37% | 8,73% | -11,85% | -23,81% | -37,07% |
| | FEV | 1,03% | 18,55% | 15,74% | -4,43% | -25,62% |
| | MAR | -0,66% | 18,39% | 12,25% | -0,93% | -12,42% |
| | ABR | -7,47% | 2,34% | 8,66% | -15,27% | -25,76% |
| | MAI | -33,58% | 4,92% | 61,40% | -7,21% | -10,90% |
| | JUN | 20,06% | 1,13% | 32,06% | 28,44% | 41,36% |
| | JUL | 20,11% | 128,05% | 64,38% | 14,35% | 50,99% |
| | AGO | 9,27% | -40,76% | 32,50% | 8,95% | 28,58% |
| | SET | -8,55% | -19,14% | 27,34% | -26,67% | 20,40% |
| | OUT | -65,55% | -53,76% | -45,54% | -39,12% | -26,14% |
| | NOV | -51,29% | -19,79% | 0,39% | -23,82% | 5,05% |
| | DEZ | -36,19% | -32,06% | 4,76% | -22,14% | -35,90% |
| RCP 4.5 | JAN | -14,34% | 2,09% | 2,58% | -18,75% | -38,90% |
| | FEV | 0,82% | 20,29% | 21,32% | -6,81% | -24,61% |
| | MAR | 2,74% | 22,03% | 22,23% | 0,46% | -18,20% |
| | ABR | -18,90% | 0,96% | 5,59% | -1,65% | -20,67% |
| | MAI | -27,99% | 0,03% | 59,91% | 2,25% | -23,90% |
| | JUN | 32,10% | 18,50% | 28,41% | 30,87% | 36,41% |
| | JUL | 6,49% | 31,41% | 41,93% | 29,30% | 47,83% |
| | AGO | -3,36% | -14,01% | 53,02% | 29,86% | 18,71% |
| | SET | -13,08% | -78,82% | 51,74% | -0,02% | 8,10% |
| | OUT | -67,16% | -72,67% | -24,32% | -35,46% | -27,95% |
| | NOV | -53,91% | 20,14% | -3,73% | -18,68% | -0,46% |
| | DEZ | -27,82% | -6,86% | 10,77% | -19,52% | -40,76% |
| RCP 6.0 | JAN | -7,59% | 11,57% | -7,39% | -18,92% | -24,48% |
| | FEV | -0,63% | 18,94% | 13,48% | -9,32% | -11,51% |
| | MAR | 8,24% | 26,64% | 12,18% | -10,96% | -12,97% |
| | ABR | -2,79% | -9,01% | 4,71% | -11,24% | -11,29% |
| | MAI | 0,87% | 37,30% | 14,87% | 2,22% | -13,86% |
| | JUN | 21,40% | 10,30% | 16,72% | 64,83% | 45,56% |
| | JUL | 23,20% | 36,77% | 45,98% | 22,63% | 57,19% |
| | AGO | 22,48% | -60,39% | 30,03% | 54,10% | 30,56% |
| | SET | 3,18% | -55,60% | 56,45% | 30,55% | 14,20% |
| | OUT | -66,61% | -36,56% | -40,89% | 29,46% | -26,85% |
| | NOV | 20,38% | 14,44% | 9,52% | -18,37% | 13,09% |
| | DEZ | -8,09% | 9,01% | 8,95% | -15,93% | -21,66% |

| | | | | | | |
|----------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| RCP 8.5 | JAN | -17,38% | -11,17% | 3,51% | -21,67% | -37,70% |
| | FEV | -5,03% | 7,27% | 26,88% | -2,49% | -30,34% |
| | MAR | 4,67% | -10,15% | 35,65% | -6,35% | -17,36% |
| | ABR | -7,21% | -11,55% | 12,22% | -13,61% | -13,74% |
| | MAI | -29,15% | 1,63% | 81,20% | -19,52% | -3,10% |
| | JUN | 31,50% | 10,72% | 28,17% | 29,32% | 35,38% |
| | JUL | 15,75% | 101,10% | 55,03% | 23,86% | 38,82% |
| | AGO | 14,81% | -31,00% | 31,26% | 19,61% | 14,03% |
| | SET | 9,21% | -42,26% | 47,42% | 15,93% | 15,44% |
| | OUT | -58,72% | -57,69% | -34,91% | -76,05% | -30,44% |
| | NOV | -40,02% | -28,21% | 2,02% | -40,34% | 13,10% |
| | DEZ | -10,35% | -35,48% | 39,52% | -24,38% | -39,78% |

Além das previsões das precipitações diárias, os modelos climáticos também geram estimativas da temperatura diária máxima e mínima. As Figuras 22a–22d apresentam a temperatura média mensal prevista pelos cinco modelos utilizados neste estudo.

Em praticamente todos os cenários, os modelos se comportaram de forma semelhante, estimando a temperatura para o período de 2030 a 2060 com valores superiores as encontradas no período histórico, com uma particularidade, em praticamente todos os casos os modelos previram temperaturas mais baixas nos meses de junho e julho, por exemplo no cenário RCP 2.6 (Figura 22a) todos os modelos apresentaram esse comportamento.

Outro ponto relevante a ser destacado é que com base nos dados históricos o mês de outubro foi o que apresentou a maior média da temperatura máxima, com 34,06°C. Entretanto, com base nas previsões dos modelos climáticos, para o período analisado o mês mais quente na maioria dos cenários e modelos será o mês de dezembro. Apenas o modelo HadGEM2-ES nos cenários RCP 4.5 e RCP 6.0 que estimou o mês de outubro como sendo o que registra as maiores temperaturas máximas.

Analisando a diferença média entre as previsões da temperatura máxima e aos dados históricos (Tabela 19), observa-se que as menores diferenças são identificadas a partir do cenário RCP 2.6. Para o Cenário RCP 4.5 todos os modelos previram temperaturas máximas para a BHRS que superaram em mais de 1°C a média histórica, contudo a maior diferença foi identificada com o modelo HadGEM2-ES no cenário RCP 8.5, onde a previsão foi em média 1,87° C superior as médias históricas.

Tabela 19 – Diferença entre a média mensal da temperatura máxima do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários

| Cenário | GFDL-3SK2M | HadGEM2-ES | IPSL-CM5A-LR | MIROC | NoerESM1-m |
|---------|------------|------------|--------------|---------|------------|
| RCP 2.6 | 0,64 °C | 0,96 °C | 0,78 °C | 0,96 °C | 0,73 °C |
| RCP 4.5 | 1,12 °C | 1,07 °C | 1,07 °C | 1,16 °C | 1,06 °C |
| RCP 6.0 | 0,62 °C | 0,90 °C | 1,10 °C | 1,18 °C | 0,73 °C |
| RCP 8.0 | 0,97 °C | 1,87 °C | 1,44 °C | 1,07 °C | 1,19 °C |

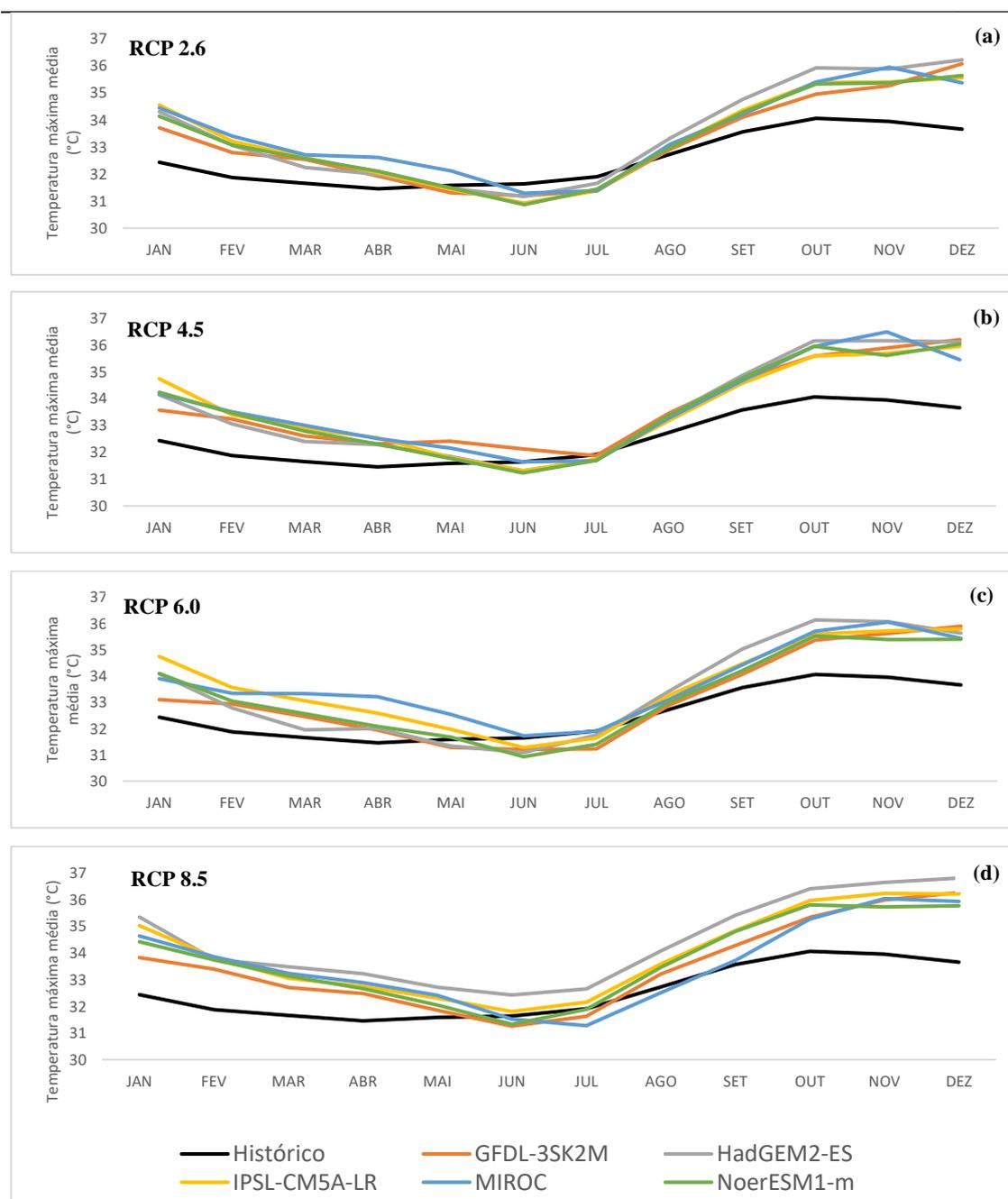


Figura 22 - Variabilidade anual da temperatura máxima prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRS

Com relação as previsões das temperaturas mínimas, os modelos apresentaram um comportamento bem similar ao da temperatura máxima, ou seja, as previsões para os anos entre 2030 e 2060 para a BHRS foram em sua grade maioria superiores aos valores registrados entre 1986 e 2017.

Assim, como ocorreu na temperatura máxima, os modelos previram para alguns meses temperatura inferiores as registradas no período histórico, nesse caso, nos meses de julho e agosto. De acordo as figuras 23a- 23d o mês que apresentara as menos temperaturas mínimas em todos os modelos e cenários será o mês de agosto, enquanto nos dados históricos os menores registros de temperatura mínima ocorriam no mês de junho, com média e 20,74° C.

Analisando as figuras 23a- 23d os modelos climáticos apresentaram um padrão mais distinto entre eles. Fica claro analisando as figuras que em todos os cenários são os modelos HadGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR que apresentam as previsões mais distantes dos valores históricos, enquanto os modelos GFDL-3SK2M e NoerESM1-m apresentam um previsões mais próximas.

As diferenças médias entre as temperaturas mínimas observadas o período histórico e as previsões dos modelos foram mais significativas do que as identificadas nas temperaturas máximas. A tabela 20 mostra que para os modelos HadGEM2-ES e IPSL-CM5A-LR no cenário RCP 8.0 haverá um aumento médio nas temperaturas mínimas mensal para a BHRS superior as 2°C. Além disse a maioria dos modelos e cenários apontam um aumento superior a 1° C.

Tabela 20 - Diferença entre a média mensal da temperatura mínima do período histórico e as previsões dos modelos climáticos em múltiplos cenários

| Cenário | GFDL-3SK2M | HadGEM2-ES | IPSL-CM5A-LR | MIROC | NoerESM1-m |
|----------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| RCP 2.6 | 0,58 °C | 1,29 °C | 1,32 °C | 0,72 °C | 0,64 °C |
| RCP 4.5 | 0,86 °C | 1,56 °C | 1,82 °C | 1,01 °C | 0,81 °C |
| RCP 6.0 | 0,62 °C | 1,46 °C | 1,61 °C | 0,87 °C | 0,62 °C |
| RCP 8.0 | 1,08 °C | 2,10 °C | 2,46 °C | 0,85 °C | 1,24 °C |

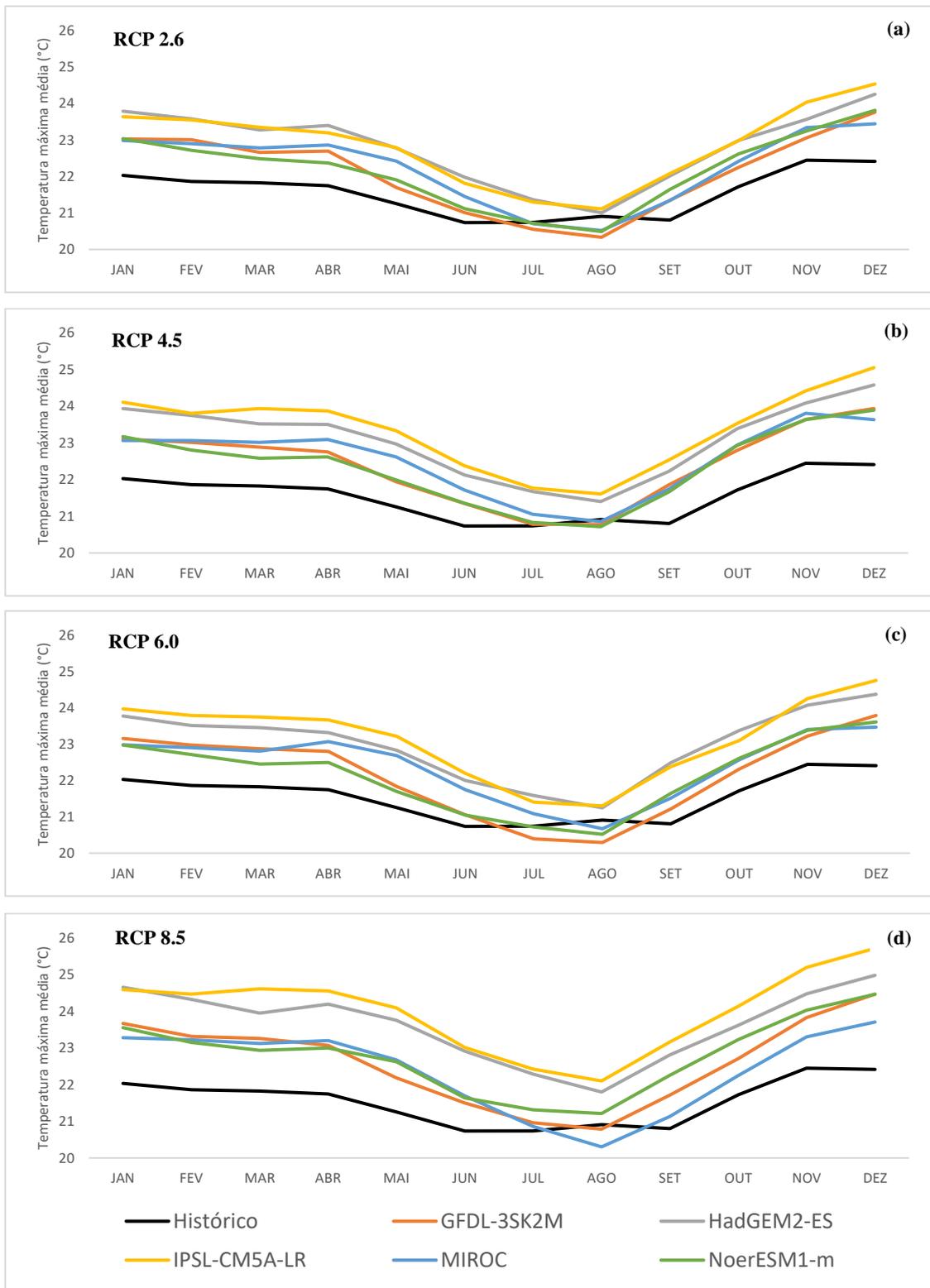


Figura 23 - Variabilidade anual da temperatura mínima prevista pelos modelos climáticos globais para a BHRs

6.4 Calibração e validação da vazão utilizando o modelo SWAT

A tabela 21 apresenta os resultados da calibração dos parâmetros realizada no SWAT-CUP. Destaca-se que apenas os resultados do parâmetros nos quais foram utilizados o método de substituição (=) apresentam os valores reais do parâmetro, para os demais parâmetros faz-se necessária a realização de operações matemáticas a partir dos valores iniciais para a obtenção do valor final do parâmetro.

Tabela 21 - Resultado da calibração dos parâmetros no SWAT-CUP

| Parâmetro | Valor Inicial | Método | Resultado SWAT-CUP |
|-----------|---------------|--------|--------------------|
| Alpha_Bf | 0,048 | = | 0,1785 |
| Canmx | 0 | = | 42,635 |
| Cn2 | VE | × | -0,7315 |
| Ch_K2 | 0 | = | 0,7535 |
| Ch_N2 | 0,014 | = | 0,17305 |
| Epc0 | 1 | = | 0,90625 |
| Esco | 0,95 | = | 0,5899 |
| Gw_delay | 31 | + | 11,19 |
| Gw_revap | 0,02 | = | 0,1807 |
| Gw_qmn | 1000 | = | 904,345 |
| Rchrg_Dp | 0,05 | × | -0,01137 |
| Revapmn | 750 | = | 7,045 |
| Slsbbsn | VE | × | -0,1381 |
| Sol_Alb | VE | × | -0,05865 |
| Sol_Awc | VE | × | 0,1791 |
| Sol_K | VE | × | -0,003735 |
| Sol_Z | VE | x | 0,4429 |
| Surlag | 4 | = | 11,545 |

VE: varia espacialmente. Estes parâmetros variam seus valores de acordo com cada uso e cobertura do solo, tipos de solo ou declividade.

Com os parâmetros calibrados, foram realizadas as estimativas de vazão para a BHRS para o período de 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação). Primeiramente, cabe destacar que dentre os três postos analisados, o de Icó foi aquele que possui a maior área de contribuição (12.400 km²). Com isso, os valores de vazão observados são bem superiores aos valores observados nos postos Lapinha e Podimirim, que possuem uma área de contribuição de 1.260 km² e 4.230 km², respectivamente.

Com base na Figura 24, observa-se que o modelo SWAT não estimou de forma satisfatória os picos de vazão superiores a 100 m³/s, eventos esses, que foram

identificados em 22 meses ao longo de toda a série analisada. Essa subestimativa do modelo SWAT para esses meses, distanciou os valores entre as médias estimadas e observadas, respectivamente, $14,73 \text{ m}^3/\text{s}$ e $21,60 \text{ m}^3/\text{s}$ para o período de calibração e $13,52 \text{ m}^3/\text{s}$ e $20,44 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 22).

Analisando as estimativas da vazão desconsiderando os 22 meses com vazões superiores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$, o que representa 5,7% de toda a série de dados, a diferença entre as médias estimadas e observadas diminuiu consideravelmente, passando a ser de $10,03 \text{ m}^3/\text{s}$ e $10,50 \text{ m}^3/\text{s}$ para o período de calibração e de $9,58 \text{ m}^3/\text{s}$ e $9,18 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de validação, respectivamente.

A avaliação dos resultados excluindo os meses com vazão mais elevadas, evidencia a dificuldade do modelo SWAT em estimar os picos de vazão para esse posto em estudo. Esse fato pode estar associado a diversos fatores, desde características intrínsecas do modelo, até os parâmetros de calibração utilizadas na modelagem.

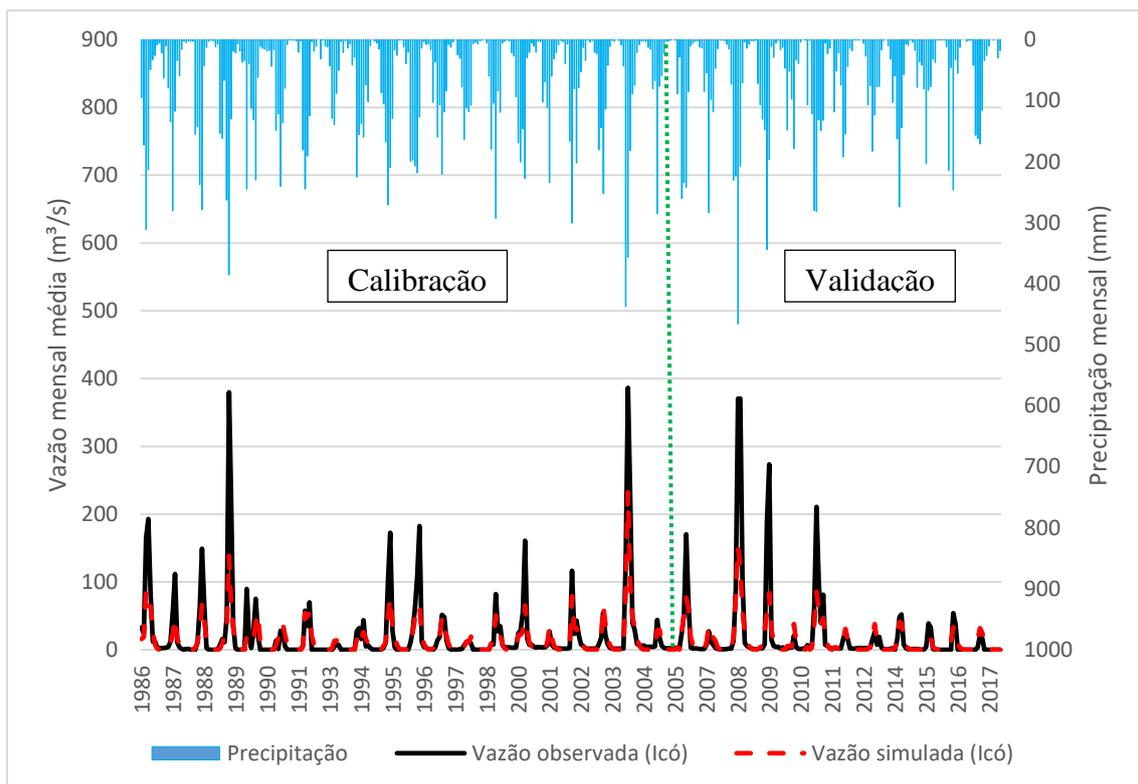


Figura 24 - Estimativa das vazões para o posto Icô (calibração e validação do modelo SWAT).

Apesar do modelo subestimar a vazão média do posto, os valores dos índices estatísticos R^2 e Nash podem ser considerados satisfatórios para os períodos de calibração

e validação. O melhor desempenho foi identificado para o período de calibração, com R^2 de 0,84 (desempenho muito bom) e Nash de 0,65 (desempenho bom). Entretanto, no período de validação houve uma queda do desempenho do modelo, principalmente quando avaliado a partir do Nash.

Para o período de validação foram identificados R^2 de 0,83, valor praticamente idêntico ao período de calibração e que pode ser considerado com um desempenho muito bom, contudo, o valor de Nash diminuiu para 0,57, mesmo assim, o desempenho pode ser considerado satisfatório. Essa queda no desempenho do modelo, pode estar associada a mudança no regime pluviométrico da bacia ocorrido nos últimos anos do período avaliado, quando comparado com o período de calibração. Com base na Figura 24 é possível identificar que a partir dos anos de 2011 a bacia não apresenta nenhum pico de vazão superior aos 100 m³/s.

Tabela 22 - Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Icó

| Estatísticas | Calibração (1986 – 2005) | Validação (2006 – 2017) |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| R^2 | 0,84 | 0,83 |
| Nash | 0,65 | 0,57 |
| Média simulada (m ³ /s) | 14,73 | 13,52 |
| Média observada (m ³ /s) | 21,60 | 20,44 |

Assim como destacado anteriormente, pode-se observar com base na Tabela 23 que a média da vazão observada para o posto Lapinha é bem inferior ao posto Icó, sendo 3,85 m³/s para o período de calibração e 3,65 m³/s para o período de validação. Para o posto Lapinha foi observado um melhor desempenho do modelo SWAT para ambos os períodos, seja com relação à média simulada e observada, seja com relação aos índices estatísticos.

O desempenho do modelo SWAT para o período de calibração pode ser considerado como muito bom, apresentando valores de R^2 e Nash na ordem de 0,85 e 0,84, respectivamente. Essa melhora no valor de Nash quando comparado ao posto Icó, deve ao fato do modelo ter conseguido estimar de forma mais satisfatória as vazões de pico. Já para o período de validação, o desempenho do modelo foi um pouco pior, principalmente com relação ao valor de Nash 0,68.

Tabela 23- Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Lapinha

| Estatísticas | Calibração (1986 – 2005) | Validação (2006 – 2017) |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| R ² | 0,85 | 0,82 |
| Nash | 0,84 | 0,68 |
| Média simulada (m ³ /s) | 3,51 | 2,95 |
| Média observada (m ³ /s) | 3,85 | 3,65 |

Essa queda no desempenho do SWAT fica evidente ao analisar a figura 25, percebe-se que durante o período de calibração (até o ano de 2005) o modelo conseguiu estimar de forma satisfatória os picos de vazão, enquanto no período de validação isso não ocorreu da mesma forma, como observado em dois picos ocorridos nos anos de 2008 e 2009. Essa diferença é evidenciada quando comparadas as médias estimadas e observadas. Para o período calibrado as estimativas do modelo SWAT subestimaram a vazão média simulada em -9,01% enquanto, no período de validação essa subestimativa foi de -19,27%.

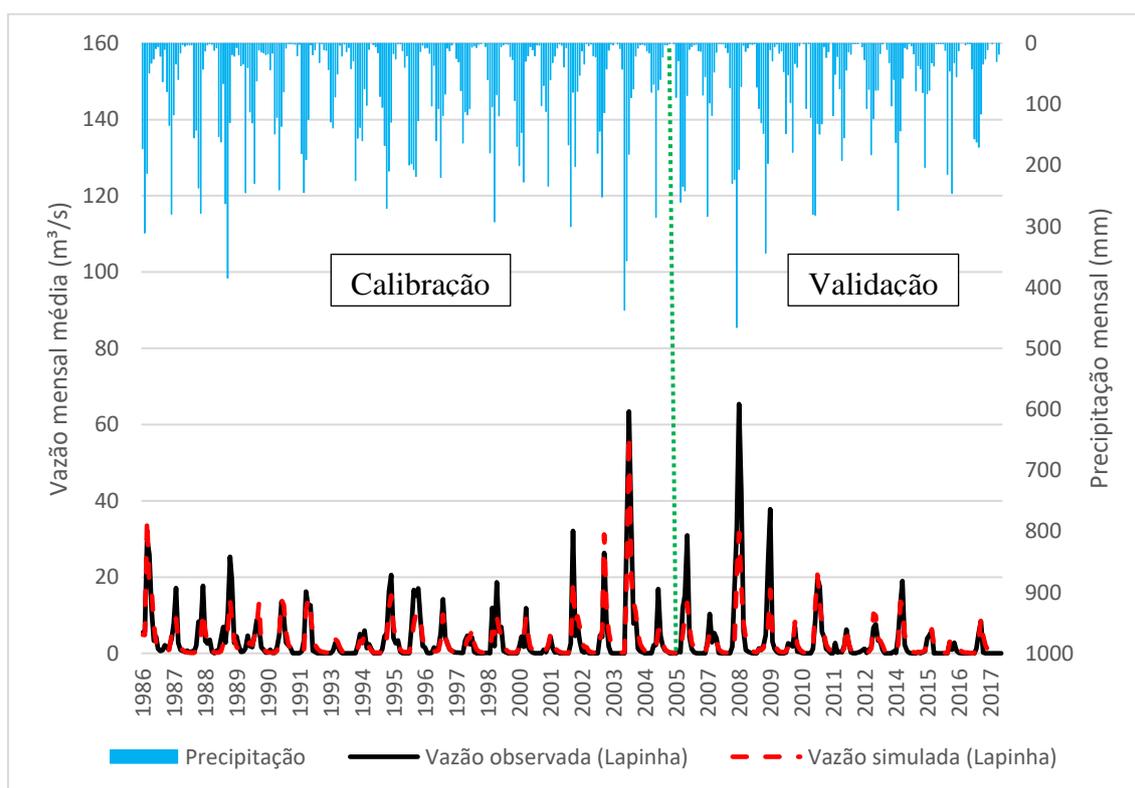


Figura 25 - Estimativa da vazão para o posto Lapinha (calibração e validação do modelo SWAT).

Por fim, o pior desempenho do modelo SWAT foi identificado para o posto Podimirim. Para o período de calibração o desempenho do modelo pode ser considerado bom, com R^2 de 0,74 e Nash de 0,68 (Tabela 24). Contudo, para o período de validação esse desempenho diminuiu consideravelmente, com um Nash de 0,30 considerado insatisfatório de acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007).

Tabela 24 - Análise estatísticas do modelo SWAT para o posto Podimirim

| Estatísticas | Calibração (1986–2005) | Validação (2006–2017) |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| R^2 | 0,74 | 0,73 |
| Nash | 0,68 | 0,30 |
| Média simulada (m ³ /s) | 4,76 | 4,27 |
| Média observada (m ³ /s) | 2,91 | 1,78 |

Com base na Figura 26, observa-se que houve superestimativas no período de calibração e validação, principalmente nos anos finais do período de calibração. Essas superestimativas podem estar associadas a características geológicas da área e que não foram representadas de forma satisfatória com bases nos parâmetros calibrados. Uma das possíveis causas é a falta de ajuste dos parâmetros relacionados as águas subterrâneas, como níveis de aquíferos, velocidade de recarga, e infiltração. Essas superestimativas elevaram a média observada para o período de calibração em 63,73% enquanto para o período de validação a média mensal estimada foi 139,56% maior.

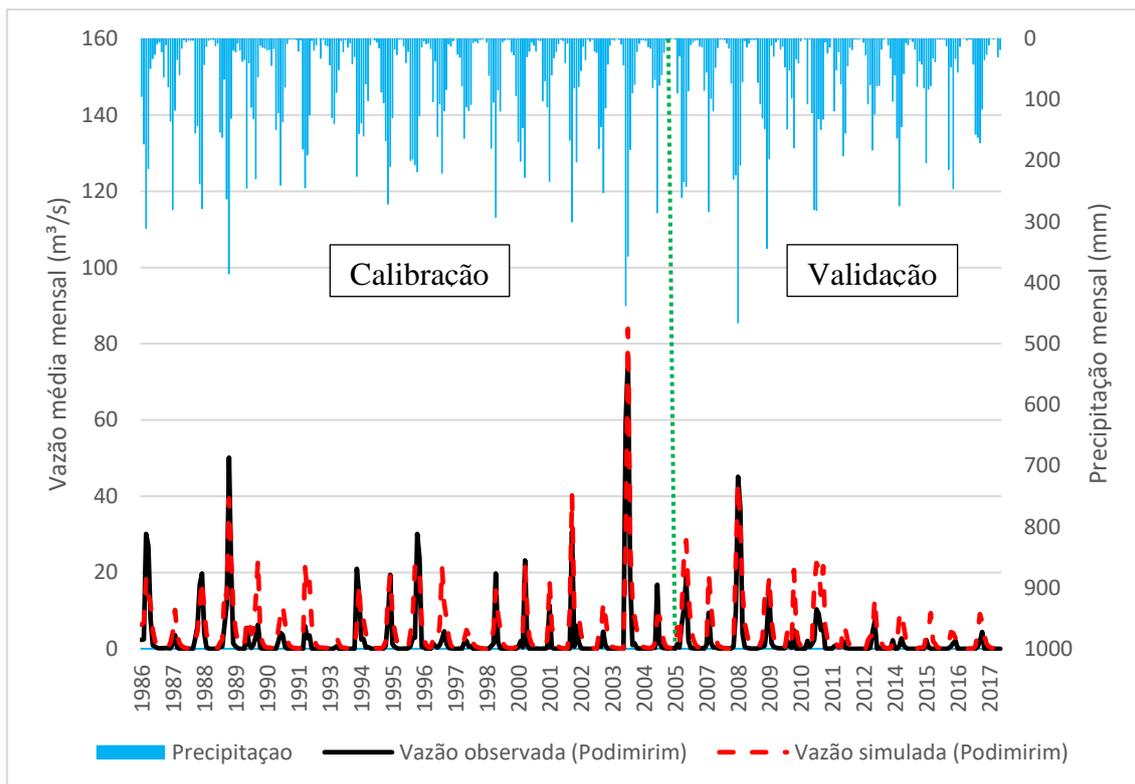


Figura 26 - Estimativa da vazão para o posto Podimirim (calibração e validação do modelo SWAT).

6.5 Modelagem futura da vazão

Com o modelo SWAT calibrado e validado, foram realizadas as estimativas da vazão futura para a bacia do rio Salgado, acoplando ao modelo SWAT os resultados da modelagem do uso e cobertura da terra, bem como, os cenários dos modelos atmosféricos globais.

Tendo em vista a similaridade entre as previsões de alguns dos modelos climáticos analisados, foram selecionados apenas dois modelos para estimar a vazão futura da bacia, sendo eles o IPSL-CM5A-LR que apresentou valores superiores aos dados históricos e o modelo NoerESM1-m que estimou os valores mais abaixo dos dados históricos, conforme apresentado anteriormente na tabela 17.

Os cenários que apresentaram uma diminuição no comportamento da vazão para a BHRS foram os oriundos do modelo NoerESM1-m. O modelo SWAT foi executado para o período de 2030 a 2060. Os resultados analisados foram referentes as mesmas sub-bacias utilizadas na calibração, referentes a localização dos postos fluviométricos Icó, Lapinha e Podimirim (Figura 27).

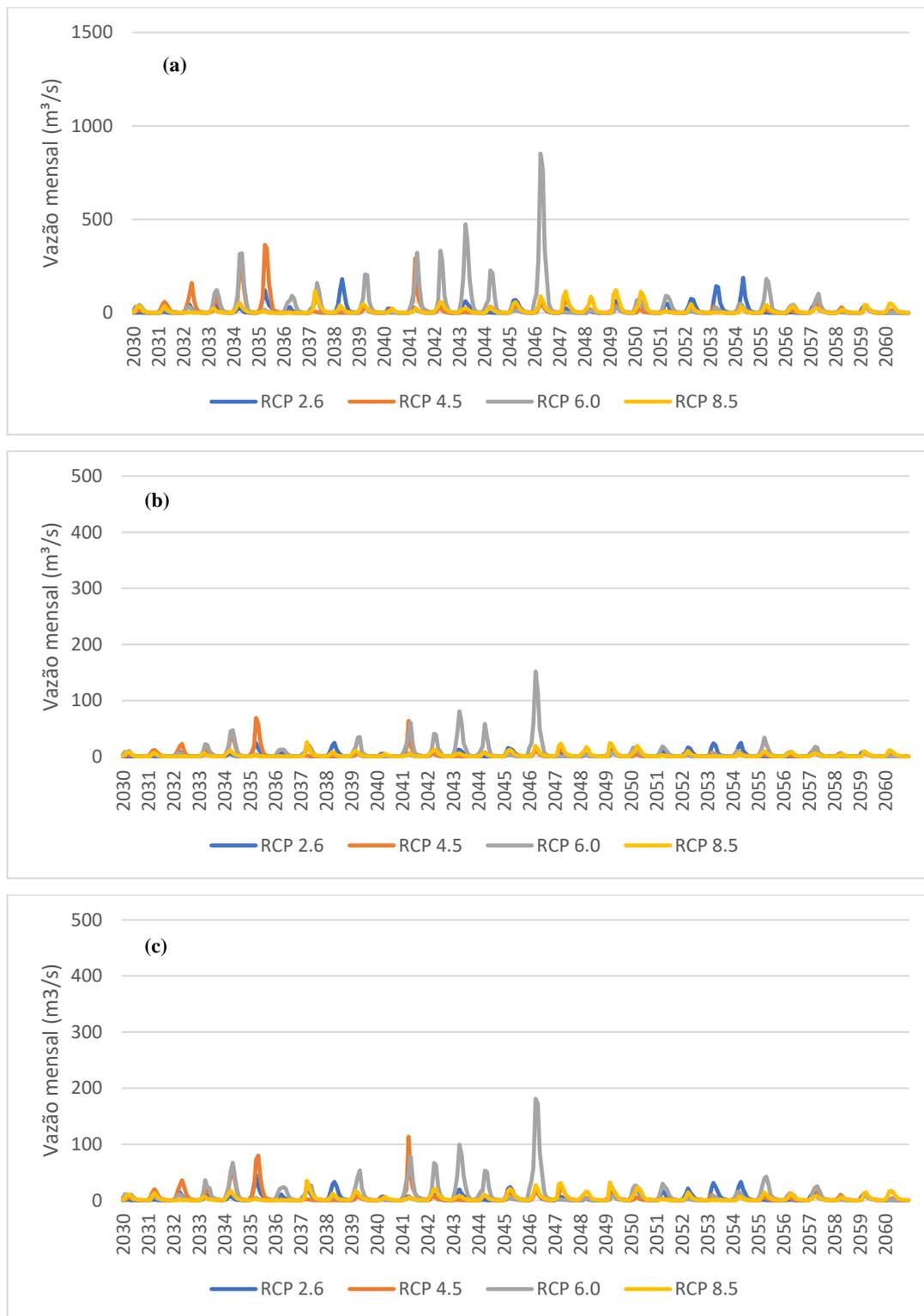


Figura 27 – Estimativa da vazão futura utilizando o modelo NoerESM1-m para os postos (a) Icó, (b) Lapinha e (c) Podimirim

Graficamente é possível verificar que os maiores picos de vazão para a bacia são identificados a partir dos cenários RCP 4.5 e RCP 6.0. A sub-bacia do posto Icó (figura 27a) é a que apresenta a maior média da vazão, por conta da sua maior área de

contribuição, conforme destacado anteriormente. Utilizando os dados do modelo NoerESM1-m com a previsão do uso e cobertura do solo do LCM, observou-se que a média da vazão variou entre 12.49 m³/s e 33.30 m³/s para os RCPs 8,5 e 6,0 respectivamente. Para as demais sub-bacias, Lapinha e Podimirim o comportamento foi o mesmo, com as maiores médias estimadas utilizando o cenário RCP 6.0, sendo 6.05 m³/s para a sub-bacia do posto Lapinha e 8,66 para o Podimirim conforme apresentado na tabela 25.

Tabela 25 - Média da vazão simulada futura utilizando o modelo NoerESM1-m para a BHRS

| Cenários | NoerESM1-m | | |
|----------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Icó (m ³ /s) | Lapinha (m ³ /s) | Podimirim (m ³ /s) |
| RCP 2.6 | 13.79 | 2.79 | 3.98 |
| RCP 4.5 | 15.05 | 3.00 | 4.42 |
| RCP 6.0 | 33.30 | 6.05 | 8.66 |
| RCP 8.5 | 12.49 | 2.67 | 3.78 |

Quando com parada as médias históricas dos 3 postos analisados observaram-se que para os postos Icó e Lapinha apenas o RCP 6.0 estima uma vazão superior à média histórica, que é de 21,02 m³/s e 3,75 m³/s, respectivamente. A tabela 26 apresenta a diferença percentual das estimativas futuras da vazão com os dados históricos observados. Para o posto Icó o cenário do modelo NoerESM1-m que apresenta maior diminuição é o do cenário 8.5 que prevê uma diminuição de 41% da média da vazão, por sua vez o cenário 6.0 prevê um aumento de 58%. Para o posto Podimirim, independente do cenário utilizado no modelo NoerESM1-m houve uma previsão nas médias da vazão, variando de um aumento 61% no RCP 8.5 a 269% de aumento na vazão média para o RCP 6.0.

Tabela 26 - Diferença entre a média da vazão futura simulada utilizando o modelo NoerESM1-m com os dados históricos

| Cenários | NoerESM1-m | | |
|----------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Icó (m ³ /s) | Lapinha (m ³ /s) | Podimirim (m ³ /s) |
| RCP 2.6 | -34% | -25% | 69% |
| RCP 4.5 | -28% | -20% | 88% |
| RCP 6.0 | 58% | 61% | 269% |
| RCP 8.5 | -41% | -29% | 61% |

Com relação ao modelo IPSL-CM5A-LR, que previu um aumento significativo na precipitação média anual da bacia na ordem de 7% a 26% (Tabela 17), as estimativas

da vazão futura para o período de 2030-2060 refletiram bem essa estimativa no aumento da precipitação, conforme apresentado nas Figuras 28a – 28c.

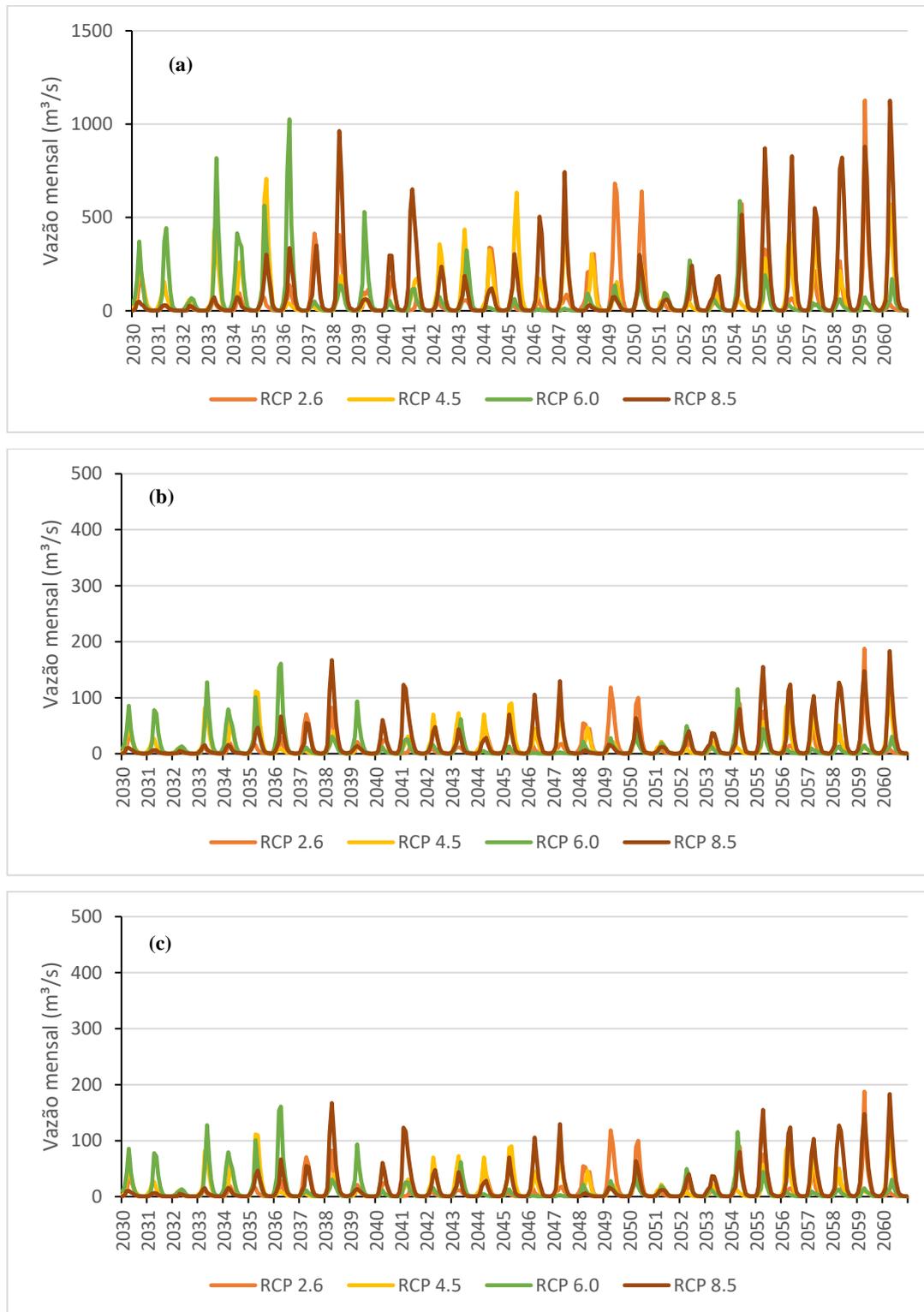


Figura 28 - Estimativa da vazão futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para os postos (a) Icó, (b) Lapinha e (c) Podimirim

Quando comparado com as estimativas realizadas tendo como entrada os dados do modelo NoerESM1-m, observa-se que as estimativas com modelo IPSL-CM5A-LR apresenta picos de vazão mais expressivos, comparando as figuras 28a e 29a, referentes a sub-bacia do posto Icó, observa-se que na primeira praticamente toda a série apresenta picos inferiores aos 500 m³/s, com exceção de um valor próximo aos 800 m³/s. Em contrapartida, na segunda figura observa-se um número mais representativo de picos superiores aos 500 m³/s, além de alguns picos que ultrapassaram os 1000 m³/s.

Conseqüentemente, as médias da vazão para as três sub-bacias analisadas foram bem maiores conforme a tabela 27. As vazões médias para os 3 postos foram sempre superiores aos 10 m³/s independente de qual cenário RCP utilizado. Destaca-se que nesse caso, para o modelo IPSL-CM5A-LR foi o cenário RCP 8.5 que apresentou as maiores estimativas da vazão e o RCP 2.6 estimou os menores valores para as três sub-bacias analisadas.

Tabela 27 - Vazão média futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para a BHRS

| Cenário | IPSL-CM5A-LR | | |
|---------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Icó (m ³ /s) | Lapinha (m ³ /s) | Podimirim (m ³ /s) |
| RCP 2.6 | 56.03 | 10.16 | 13.17 |
| RCP 4.5 | 64.20 | 12.19 | 16.01 |
| RCP 6.0 | 54.73 | 10.46 | 14.55 |
| RCP 8.5 | 97.17 | 17.67 | 26.91 |

Comparando as estimativas da vazão futura a partir do modelo IPSL-CM5A-LR com os dados históricos (tabela 28), observa-se quem em todos os cenários foi previsto um aumento de no mínimo 167% na média mensal da vazão. As diferenças mais significativas foram identificadas na sub-bacia do posto Podimirim, onde a estimativa da vazão futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR previu um aumento entre 460% no cenário RCP 2.6 a 1045% para o cenário RCP 8.5.

Tabela 28 - Diferença entre a média da vazão futura simulada utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR com os dados históricos

| Cenário | IPSL-CM5A-LR | | |
|---------|--------------|-------------|---------------|
| | Icó (%) | Lapinha (%) | Podimirim (%) |
| RCP 2.6 | 167% | 171% | 460% |
| RCP 4.5 | 205% | 225% | 581% |
| RCP 6.0 | 160% | 179% | 519% |
| RCP 8.5 | 362% | 371% | 1045% |

Além de analisar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra e das mudanças climáticas na vazão, foi analisada uma outra variável estimada pelo modelo SWAT, a produtividade de água que pode ser entendida como a soma do escoamento superficial, do fluxo lateral e da recarga subterrânea descontando as perdas por transmissão e reservatórios.

Analisar essa variável permite observar de forma mais clara a influência das características geológicas da bacia, bem como, das distribuições dos usos e coberturas da terra na disponibilidade hídrica da bacia. A figura 29 apresenta a média da produtividade de água anual para cada uma das sub-bacias no período de 1986 a 2017. Observa-se que há um predomínio de regiões com produtividade de água entre 25 e 50 mm/ano distribuídos ao longo de toda a bacia. As sub-bacias que apresentam os maiores valores de produtividade estão localizadas na porção centro-sul, onde está localizada a maior porção do embasamento sedimentar, bem como, próximo aos limites da bacia em regiões mais declivosas.

As Figuras 30a–30d apresentam a produtividade de água utilizando o acoplamento de cenários de uso e cobertura da terra gerado pelo LCM, bem como, os cenários climáticos do modelo NoerESM1-m. Assim como visto anteriormente, o cenário RCP 6.0 desse modelo, prevê um total pluviométrico superior aos demais, o que resultou em uma maior média da vazão nas sub-bacias analisadas e conseqüentemente uma maior produtividade de água para bacia como pode ser visto na figura 30c, onde grande parte da bacia apresenta valores superiores aos 100 mm/ano.

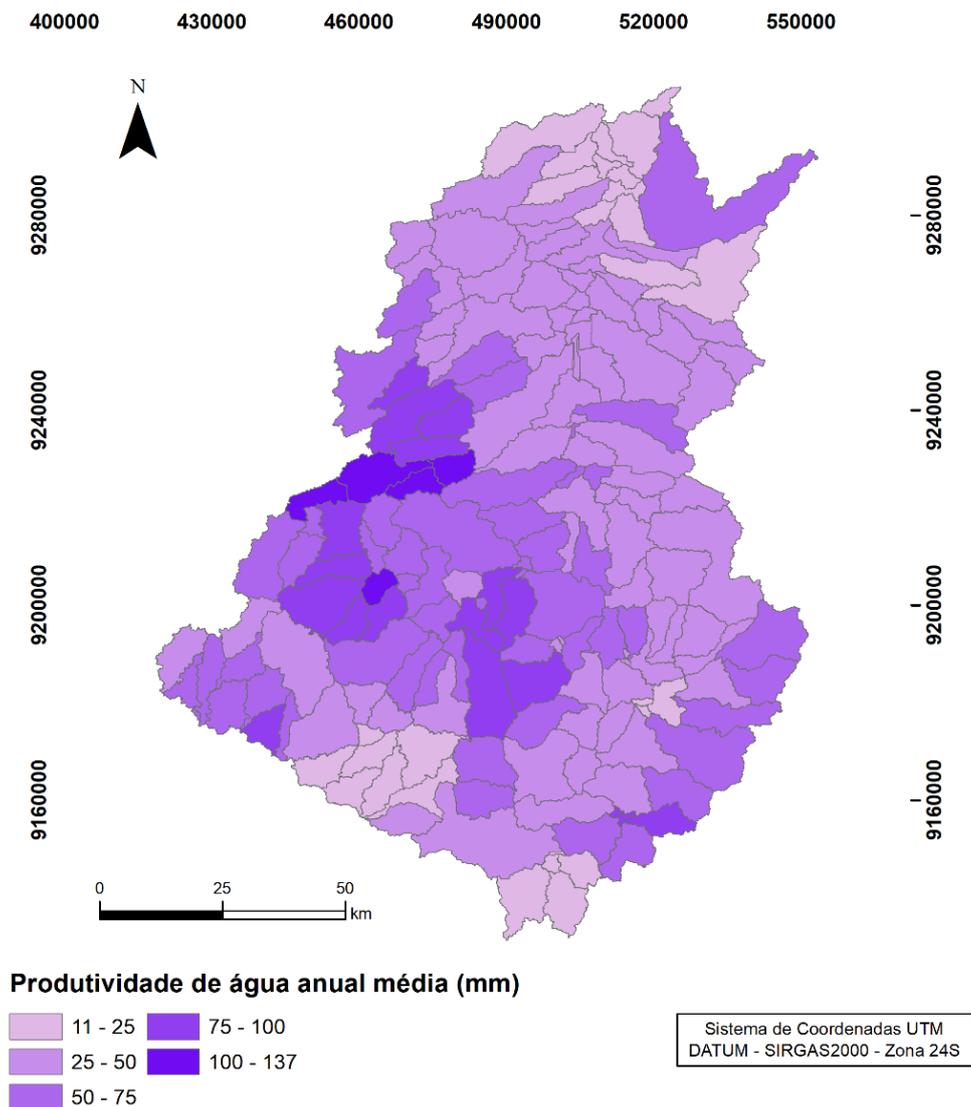


Figura 29 - Produtividade de água anual média para o período histórico

Comparando espacialmente as estimativas da produtividade de água no período histórico e as projeções, não são observadas grandes mudanças. Destaca-se apenas que nas figuras 30a, 30b e 30d as sub-bacias mais a jusante da bacia, na região norte apresentaram uma diminuição nos valores de produtividade de água, além disso, ocorreu um padrão das sub-bacias que apresentam os maiores valores, localizada na porção centro-sul da bacia, região de embasamento sedimentar.

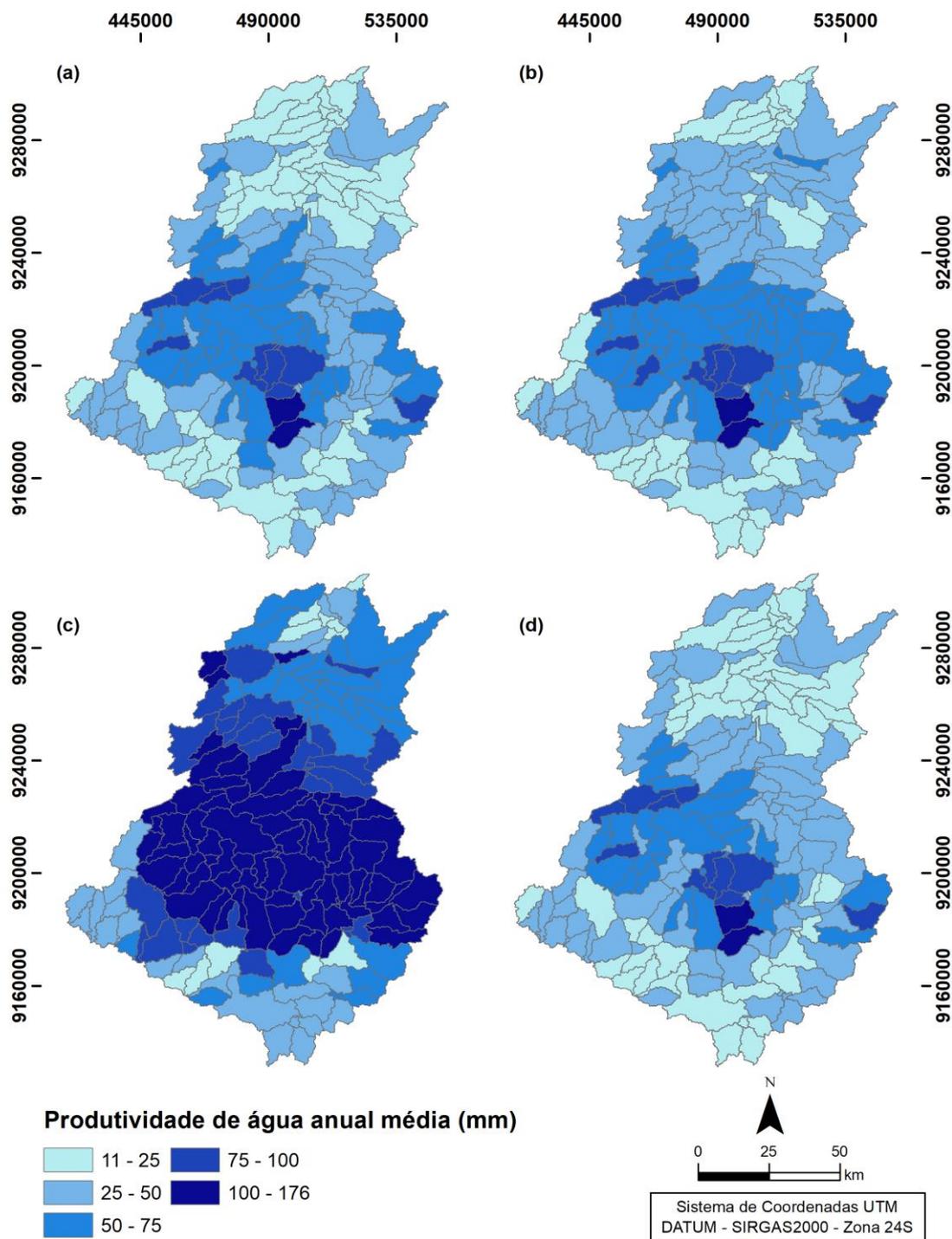


Figura 30 - Produtividade de água anual média futura utilizando o modelo NoerESM1-m para diferentes cenários – (a) RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0 e (d) RCP 8.5.

A Figura 31 apresenta a estimativa da produtividade de água utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR. A estimativa precipitação média anual superior a observada no período histórico para esse modelo climático, elevou consideravelmente os valores de produtividade e água para a BHRS.

Para o modelo IPSL-CM5A-LR o cenário 8.5 foi aquele que apresentou os valores mais elevados de produtividade de água, com um predomínio de áreas com valores superiores aos 300 mm/ano. Com relação a distribuição espacial das áreas com os maiores valores de produtividade, não houve grandes mudanças, tendo em vista que foi utilizado o mesmo cenário de uso e cobertura da terra para os dois modelos. Entretanto destaca-se o fato de uma área maior na porção central da bacia apresentar os valores mais representativos em todos os cenários analisados.

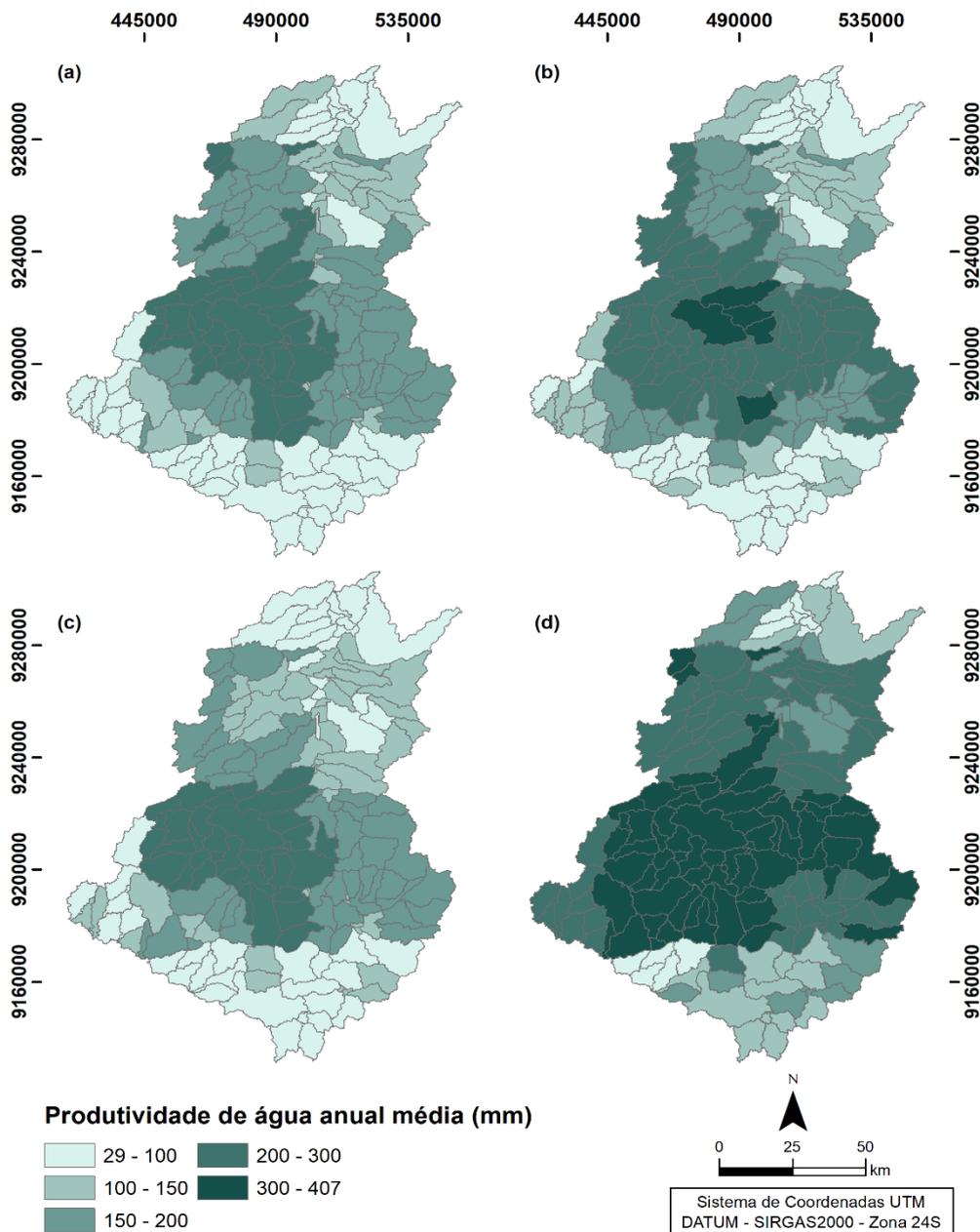


Figura 31 - Produtividade de água anual média futura utilizando o modelo IPSL-CM5A-LR para diferentes cenários – (a) RCP 2.6, (b) RCP 4.5, (c) RCP 6.0 e (d) RCP 8.5.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho conseguiu avaliar os efeitos das possíveis alterações futuras na distribuição do uso e cobertura da terra e das mudanças climáticas no comportamento da vazão e da produtividade de água na bacia do rio Salgado. Além disso, foi possível verificar a aplicabilidade do modelo SWAT e do LCM para uma bacia no semiárido nordestino, em que ambos os modelos apresentaram validações satisfatórias analisando os parâmetros estáticos necessários para aferir a eficácia das estimativas.

Destaca-se também, que dentre os cinco modelos de circulação atmosférica todos apresentaram uma tendência de intensificação dos eventos extremos, ou seja, a previsão é que nas próximas décadas os meses caracterizados como mais secos e quentes, bem como, os mais frios e chuvosos terão essas características intensificadas, com isso, podendo existir período de seca mais intensas, assim como, eventos extremos de chuva, que causam diversos problemas, como os alagamentos, por exemplo.

As projeções futuras da vazão baseadas nos cenários analisados, apesar de serem opostas, com uma previsão de diminuição da vazão mensal média utilizando o modelo NoerESM1-m, e com um aumento significativo da vazão média a partir do modelo IPSL-CM5A-LR, elas evidenciam a necessidade de planejamento efetivo das bacias hidrográficas que seja capaz de minimizar os efeitos das mudanças futuras no clima e na disposição dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra, seja para minimizar os efeitos da seca e da diminuição da vazão, ou para evitar os efeitos negativos de um aumento na precipitação e conseqüentemente na vazão, como a intensificação dos processos erosivos.

Além disso, foi possível verificar que a integração da modelagem hidrológica com os modelos de previsão de uso e cobertura do solo e dos modelos climáticos são uma importante ferramenta no auxílio do manejo e planejamento da gestão de bacias hidrográficas, por permitir a elaboração de diversos cenários futuros, possibilitando assim, a elaboração de ações que possam gerir da forma mais adequada os recursos hídricos de uma bacia.

7. RECOMENDAÇÕES

Face aos resultados obtidos podem ser elaboradas algumas recomendações para a elaboração de estudos similares a este:

- Utilizar algoritmos externos ao modelo LCM para o cálculo das demandas do uso e cobertura da terra, e com isso, elaborar cenários mais específicos da configuração futura da bacia.
- Definir todas as transições possíveis entre as diferentes classes de uso e cobertura do solo, criando submodelos individuais para cada uma das transições, testando a influência das variáveis exploratórias de forma individualizada.
- Realizar o estudo com outros modelos de circulação global, bem como, como modelos em escala regional.
- Testar diversas configurações de discretização de bacia no modelo SWAT, a fim de permitir que o modelo capture pequenas modificações no uso e cobertura da terra. Para isso, faz-se necessário diminuir a área mínima de acumulação, bem como, os limiares do uso e cobertura no momento da criação de HRUs.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v, 524, p. 733-752, 2015.
- ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R.; Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, 2007.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. v. 133, p. 380-394, 2007.
- AMORIM, J.A.F. Análise e modelação da mudança da ocupação e uso do solo: Caso de estudo da bacia hidrográfica do Rio Vez. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do território), Instituto Politécnico de Viana do Castelo- Escola Superior Agrária, Ponte de Lima, 129 f.; 2015.
- ANDRADE, C.W.L. DE, MONTENEGRO, S.M.G.L.; LIMA, J.R. DE S.; MONTENEGRO, A.A. de A.; MAGALHÃES, A.G.; 2017. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 3, p. 227-238, 2017.
- ANG, R.; OEURNG, C. Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science*, v. 32, p. 89-101, 2018.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.S.; AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1091-1102, 2013.
- ARAÚJO, J.A.A. Barragens do Nordeste do Brasil. Fortaleza: DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, 1990.
- 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*, v. 34, p. 73-89, 1998.
- VAGHEFI, S.A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K.C. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, v. 6, p. 181-198, 2017.
- BAPTISTA, N.Q.; CAMPOS, C.H. Caracterização do semiárido brasileiro. In: CONTI, I. L.; SCHROEDER, E.; MEDAGLIA, V.R. (Org.). *Construindo saberes, cisternas e cidadania*. Brasília: ed. IABS, 2014. p.45-47.

BARRETO, L.; SCHOORL, J.M.; KOK, K.; VELDKAMP, T.; HASS, A. Modelling potential landscape sediment delivery due to projected soybean expansion: A scenario study of the Balsas sub-basin, Cerrado, Maranhão state, Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 115, p. 270-277, 2012a

BARRETO, L.; VAN EUPEN, M.; KOK, K.; JONGMAN, R.H.G.; RIBEIRO, M.C.; VELDKAMP, A.; HASS, A.; OLIVEIRA, T.G. The impact of soybean expansion on mammal and bird, in the Balsas region, north Brazilian Cerrado. *Journal for Nature Conservation*, v. 20, p. 374-383, 2012b.

BARRIOS, F.M.C. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica andina sob cenários de mudanças climáticas, 2013.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, n.2, p. 213-229, 1998.

BONUMÁ, N.B.; CORSEUIL, C.W.; KOBIYAMA, M.; ZANIN, P.R. Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT. *Anais... XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. p. 1-8, 2013.

BORGES, C.K. Obtenção da evapotranspiração real diária através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no semiárido brasileiro. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande –PB, 2013.

BRASIL. Ministério de Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Nova delimitação do Semi-Árido brasileiro, 2005.

BRASIL. Projeto Rio São Francisco – O andamento das obras. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/o-andamento-das-obras>>. Acesso em: 17 set. 2019.

BRESSIANI, D.A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C.A.; MENDIONDO, E.M. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 8, 1–16, 2015.

BRIGHENTI, T.M.; BONUMÁ, N.B.; GRISON, F.; MOTA, A. DE A.; KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. *Ecol. Eng.* 127, 103–113, 2019.

BRITO NEVES, B.B.; VAN SCHMUS, W.R.; KOZUCH, M.; SANTOS, E.J.; PETRONILHO, L. A Zona Tectônica Teixeira Terra Nova - ZTTTN – Fundamentos da Geologia Regional e Isotópica. *Geologia USP*, v. 5, n. 1, p. 57-80, 2005.

CABRAL, L. O. Revisitando as noções de espaço, lugar, paisagem e território, sob uma perspectiva geográfica. *Revista de Ciências Humanas*, v. 41, n. 1-2, p. 141-155, 2007.

CARNEIRO, T.G.S. Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 109 f.; 2006.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. Plano estadual de recursos hídricos

(PLANERH). Fortaleza: SRH, 2005.

CERVELLI, E.; CAPOLUPO, A.; RECCHI, P.F.; PINDOZZI, S.; BOCCIA, L. Predicting land use change on a broad area: Dyna-CLUE model application to the Litorale Domizio-Agro Aversano (Campania, South Italy). *Journal of Agricultural Engineering*, v. 48, n.1, p. 27-35, 2017.

CHAPRA, S.C. *Surface water-quality modelling*. New York: McGraw-Hill, 1997.

CHEN, Y.; LI, X.; SU, W.; LI, Y. Simulating the optimal land-use pattern in the farming-pastoral transitional zone of Northern China. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 32, p. 407-414, 2008.

CIRILO, J.A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

CIRILO, J.A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

COELHO, A.S. Modelagem de dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal na região de Santarém, oeste do Pará. Programa Pós-Graduação em Ciências Ambient. Universidade Federal do Pará, 2009.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Nível dos açudes. Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br>. Acesso em: outubro de 2019.

CORBARI, C.; SALERNO, R.; CEPPI, A.; TELESCA, V.; MANCINI, M. Smart irrigation forecast using satellite LANDSAT data and meteo-hydrological modeling. *Agricultural Water Management*, v. 212, p. 283-294, 2019.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2003. CD- ROM.

CRUZ, J.C. Disponibilidade hídrica para outorga: Avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Programa Pós-Graduação em Eng. Recur. Hídricos e Saneam. Ambient. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

DANTAS, J.C.; DA SILVA, M.A.; DA SILVA, R.M.; VIANNA, P.C.G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da paraíba. *Geociencias*, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DEUS, L.A.B. Espaço e tempo como subsídios à construção de cenários de uso e cobertura da terra para o planejamento ambiental na Amazônia: o caso da bacia do Rio Acre. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 400 f.; 2013.

DUAN, Z.; ZHANG, Z.; GAO, H.; MEKONNEN, D.F.; LIU, J.; SONG, X.; YANG, L.; TUO, Y. Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, v. 569, p. 612-626, 2019.

EASTMAN, J.R. IDRISI Andes: Guide to GIS and image processing. Worcester, MA: Editora: Clark Labs da Clark University, 2006.

FERRIGO, S. Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF. 164 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FONSECA, A.F.Q. Vulnerabilidade socioambiental e de saúde da população dos municípios mineiros aos impactos das mudanças climáticas. Fundação Oswaldo Cruz, 2017.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Caracterização das bacias hidrográficas do estado do Ceará. Fortaleza, 2009.

GABIRI, G.; LEEMHUIS, C.; DIEKKRÜGER, B.; NÄSCHEN, K.; STEINBACH, S.; THONFELD, F. Modelling the impact of land use management on water resources in a tropical inland valley catchment of central Uganda, East Africa. *Science of The Total Environment*, v. 653, p. 1052-1066, 2019.

GALHARTE, C.A.; VILLELA, J.M.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p. 188-193, 2014.

GALHARTE, C.A. Estimativa do escoamento superficial e da produção de sedimentos em áreas de atividades agrossilvopastoris, no Estado de São Paulo, em função da mudança de uso e cobertura do solo. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

GALVÍNCIO, J.D.; SOUSA, F.A.S.; SRINIVASAN, V.S. Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 11, n. 3, p. 135-146, 2006.

GONDIM, R.S.; CASTRO, M.A.H.; EVANGELISTA, S.R.M.; TEIXEIRA, A.S.; JÚNIOR, S.C.F.F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 12, p. 1657-1664, 2008.

GONG, J.; HU, Z.; CHEN, W.; LIU, Y.; WANG, J. Urban expansion dynamics and modes in metropolitan Guangzhou, China. *Land Use Policy*, v. 72, p. 100-109, 2018.

GUERRA, P. de B. A Civilização da Seca, DNOCS. DNOCS, Fortaleza, 1981.

GUO, T.; GITAU, M.; MERWADE, V.; ARNOLD, J.; SRINIVASAN, R.; HIRSCHI, M.; ENGEL, B. Comparison of performance of tile drainage routines in SWAT 2009 and 2012 in an extensively tile-drained watershed in the Midwest. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, p. 89-110, 2018.

HAMDY, O.; ZHAO, S.; SALHEEN, M.A.; EID, Y.Y. Analyses the Driving Forces for Urban Growth by Using IDRISI Selva Models Abouelreesh – Aswan as a Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 9, n. 3, p. 25-37, 2017.

HERNANDES, T.A.D.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A. Assessment of impacts on basin stream flow derived from medium-term sugarcane expansion scenarios in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 259, p. 11-18, 2018.

HOYOS, N.; CORREA-METRIO, A.; JEPSEN, S.M.; WEMPLE, B.; VALENCIA, S.; MARSIK, M.; DORIA, R.; ESCOBAR, J.; RESTREPO, J.C.; VELEZ, M.I. Modeling streamflow response to persistent drought in a coastal tropical mountainous watershed, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Water*, v. 11, n. 1, 94, 2019.

HUANG, D.; HUANG, J.; LIU, T. Delimiting urban growth boundaries using the CLUE-S model with village administrative boundaries. *Land Use Policy*, v. 82, p. 422-435, 2019.

JIN, X.; JIN, Y.; MAO, X. Land Use/Cover Change Effects on River Basin Hydrological Processes Based on a Modified Soil and Water Assessment Tool: A Case Study of the Heihe River Basin in Northwest China's Arid Region. *Sustainability*, v. 11, n. 4, 107211, 2019.

KANNAN, N.; SANTHI, C.; WHITE, M.J.; MEHAN, S.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W. Some Challenges in Hydrologic Model Calibration for Large-Scale Studies: A Case Study of SWAT Model Application to Mississippi-Atchafalaya River Basin. *Hydrology*, v. 6, n. 1, 17, 2019

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting – Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, p. 507-532, 2015.

KHAWALDAH, H.A. A prediction of future land use/land cover in Amman area using GIS based Markov model and remote sensing. *Journal of Geographic Information System*, v. 8, p. 412-427, 2016.

KIM, K.B.; KWON, H.H.; HAN, D. Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 556, p. 194-210, 2018.

KUHN, C. Uma análise sistêmica das transformações de uso do solo como suporte à decisão para o planejamento de Unidades de Conservação. Estudo de caso: Parque Nacional do Superagui – PR. Dissertação de Mestrado em em Planejamento Urbano e Regional, 2005.

KUMAR, P.; DAS, P.; TRIPATHI, P.; SRIVASTAVA, S.K.; JOSHI, C.; DASH, T.; TRIPATHI, O.P.; DEKA, J.; KHAN, M.L.; BEHERA, P.R.; BEHERA, M.D.; KRISHNAMURTHY, Y.V.N.; ROY, P.S. Remote sensing based deforestation analysis in Mahanadi and Brahmaputra river basin in India since 1985. *Journal of Environmental Management*, v. 206, p. 1192-1203, 2017.

LAMPARTER, G.; NOBREGA, R.L.B.; KOVACS, K.; AMORIM, R.S.; GEROLD, G. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 18, p. 91-103, 2018.

LIEBERTRAU, A.M. Measures of association. Newbury Park, CA: Sage Publications. Quantitative, 1983.

LIMA, M.L.; ZELAYA, K.; MASSONE, H. Groundwater vulnerability assessment

combining the drastic and Dyna-CLUE model in the Argentine Pampas. *Environmental Management*, v. 47, p. 828-839, 2011.

LOPES, J. G. As especificidades de análise do espaço, lugar, paisagens e território na Geografia. *Geografia Ensino & Pesquisa*. v. 16, n. 2, p.23-30, 2012.

LUIZ, C.H.P. Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 141 f.; 2014.

MAGALHÃES, A.G.; MONTENEGRO, A.A. DE A.; ANDRADE, C.W.L. DE, MONTENEGRO, S.M.G.L.; FONTES JÚNIOR, R.V. de P. Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. *Revista Ambiente e Água*, v. 13, n. 6, 2018.

MALVEZZI, R. Semi-árido – uma visão holística. Brasília: Confea, 2007. 140p.

MEDEIROS, I.C. Modelagem espacial e temporal do balanço hídrico da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 2017.

MEDEIROS, S.S.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M.P.; TINÔCO, L.B.M.; SALCEDO, I.H.; PINTO, T.F. Sinopse do censo demográfico para o Semiárido Brasileiro. Campina Grande, PB, Brasil: INSA, 2012.

MEIRA NETO, A.A.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; WENDLAND, E. Improving Streamflow Prediction Using Uncertainty Analysis and Bayesian Model Averaging. *J. Hydrol. Eng.* 23, 05018004, 2018.

MELLO, E.L.; OLIVEIRA, F.A.; PRUSKI, F.F.; FIGUEIREDO, J.C. Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 4, p. 635–644, 2008.

MESGARI, I.; JABALAMELI, M.S. Modeling the spatial distribution of crop cultivated areas at a large regional scale combining system dynamics and a modified Dyna-CLUE: A case from Iran. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 15, n. 4, p. 1-11, 2017.

MILEWSKI, A.; SULTAN, M.; YAN, E.; BECKER, R.; ABDELDAYEM, A.; SOLIMAN, F.; GELIL, K.A. A remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. *Journal of Hydrology*, v. 373, p. 1-14, 2009.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. V.50. p. 885-900, 2007.

MOURA, E.M. Avaliação da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica no trecho do Rio Piranhas-Açu entre os açudes Coremas-Mãe D'Água e Armando Ribeiro Gonçalves. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, v. 1, p. 140, 2007.

MUHAMMAD, A.; EVENSON, G.R.; STADNYK, T.A.; BOLUWADE, A.; JHA, S.K.;

COULIBALY, P. Impact of model structure on the accuracy of hydrological modeling of a Canadian Prairie watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 21, p. 40-56, 2019.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2011. 647p.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. v. 77, p. 263-293, 1995.

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 37, p. 5005-5023, 2017.

PARAJULI, P.B.; JAYAKODY, P.; OUYANG, Y. Evaluation of Using Remote Sensing Evapotranspiration Data in SWAT. *Water Resources Management*, v. 32, p. 985–996, 2018.

PATI, A.; SEN, S.; PERUMAL, M. Modified Channel-Routing Scheme for SWAT Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 23, 04018019, 2018.

PEREIRA, D.R.; MARTINEZ, M.A.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 5, p. 149-163, 2016.

PIELKE SR.; R.A. ATMOSPHERIC SCIENCE: Land Use and Climate Change. *Science*, v. 310, n. 5754, p. 1625-1626, 2005.

PIJANOWSKI, B. C.; SHELLITO, B.; PITHADIA, S.; ALEXANDRIDIS, K. Forecasting and assessing the impact of urban sprawl in coastal watersheds along eastern Lake Michigan. *Lakes Reservoirs: Research and Management*, v. 7, p. 271-285, 2002.

POMÉON, T.; DIEKKRÜGER, B.; SPRINGER, A.; KUSCHE, J.; EICKER, A. Multi-objective validation of SWAT for sparsely-gauged West African river basins - A remote sensing approach. *Water*, v. 10, n. 4, 451, 2018

RIBEIRO, S.C. Etnogeomorfologia sertaneja: proposta metodológica para a classificação das paisagens da sub-bacia do rio Salgado/CE. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG, 2012. 284 p.

ROCHA, E. O. de. Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

ROSOLÉM, N.P.; ARCHELA, R.S. Geossistema, território e paisagem como método de análise geográfica. In: VI seminário Latino-Americano de Geografia Física e II seminário

Ibero-Americano de Geografia Física, Universidade de Coimbra, Portugal. 2010

SAMPAIO, D.M. Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 103 f., 2014.

SANGERMANO, F.; TOLEDANO, J.; EASTMAN, J.R. Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+ and endemic biodiversity. *Landscape Ecology*, v. 27, p. 571-584, 2012.

SANTANA, T.B. Impacto de mudanças climáticas sobre o regime de vazões e a geração hidrelétrica de energia. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, 137p. 2013.

SANTOS, C.A.S.; ROCHA, F.A.; RAMOS, T.B.; ALVES, L.M.; MATEUS, M.; DE OLIVEIRA, R.P.; NEVES, R. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid Watershed in Brazil. *Water*, v. 11, p. 1-17, 2019.

SANTOS, F.M.; OLIVEIRA, R.P.; MAUAD, F.F. Lumped versus Distributed Hydrological Modeling of the Jacaré-Guaçu Basin, Brazil. *Journal of Environmental Engineering*, v. 144, n. 8, p. 134-145, 2018.

SANTOS, J.Y.G. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 205 f., 2015.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; CARVALHO NETO, J.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, A.M. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: A case study of Tapacurá River basin, Brazil. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, v. 371, p. 189-193, 2015.

SHI, P.; ZHANG, Y.; REN, Z.; YU, Y.; LI, P.; GONG, J. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, v. 664, p. 984-994, 2019.

SHRESTHA, S.; BHATTA, B.; SHRESTHA, M.; SHRESTHA, P.K. Integrated assessment of the climate and landuse change impact on hydrology and water quality in the Songkhram River Basin, Thailand. *Science of the Total Environment*, v. 643, p. 1610-1622, 2018.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, p. 1203-1216, 2015.

SILVA, A.K.L. Impacto da expansão da Palma de óleo sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos nas sub-bacias hidrograficas não monitoradas dos rios Bujaru e Mariquita no nordeste do Estado do Pará, Amazônia oriental. Universidade de São Paulo, 2016.

SILVA, A.K.L.; FUSHITA, A.T.; PEREIRA, S.E.M.; SANTOS, J.T.S.; VENTURIERI, A.; SOUZA, A.M.L. DE, GALHARTE, C.A.; CRESTANA, S. Critérios para a definição

da área de estudo e do banco de dados destinados a modelagem dinâmica espacial de sub-bacias sob expansão da Palma do óleo na Amazônia brasileira, in: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária. pp. 1–4, 2014.

SILVA, J.F.C.B.C. Crise hídrica no abastecimento de água em campina grande: análise de cenários futuros no volume de água do reservatório Epitácio Pessoa entre 2020 e 2030. Tese de Doutorado em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2019.

SILVA, V.P.R.; SILVA, M.T.; SINGH, V.P.; SOUZA, E.P.; BRAGA, C.C.; HOLANDA, R.M.; ALMEIDA, R.S.R.; SOUSA, F.A.S.; BRAGA, A.C.R. Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena* 162, 166–176, 2017.

SOARES FILHO, B.S. Análise de paisagem: fragmentação e mudanças. Belo Horizonte: Departamento de Cartografia. Centro de Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências – UFMG, p. 90, 1998.

SOARES, A.S.D. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal Paraíba, 2014.

SOUSA, A.B. DE, SILVA, D.F. DA. Causas climáticas da variabilidade pluviométrica e tendências climáticas na Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). *Caminhos de Geografia*, v. 14, p. 101-117, 2013.

SUASSUNA, J.; AUDRY, P. A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino: Caracterização, variação sazonal e limitações de uso. *CNPq*, p. 128, 1995.

SUDENE, Resolução Nº 115 de 23 de novembro de 2017. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Ministério da Integração Nacional, Brasília – DF, Publicado em 05/12/2017, Edição 232, Seção 1, Páginas 26-27-34.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Org. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 668, 1998.

VALENCIA, L.I.O. Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo, Dissertação (Mestrado em Engenharia da computação), Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 93p. 2008.

VALENCIA, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P.; MARTORANO, L.G. Avaliação do modelo de mudança do uso do solo CLUE-S na presença de dependência espacial, in: *WV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. p. 6711-6718, 2011.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L.O. CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecol. Modell.* 85, 253–270, 1996.

VELDKAMP, T.I.E.; WADA, Y.; MOEL, H.; KUMMU, M.; EISNER, S.; AERTS, J.C.J.H.; WARD, P.J. Changing mechanism of global water scarcity events: Impacts of socioeconomic changes and inter-annual hydro-climatic variability. *Global Environmental Change*, v. 32, p. 18–29, 2015.

Verburg, P.; 1999. The CLUE-S model – Hands-on exercises, Institute for Environmental Studies – University Amsterdam.

VERBURG, P.H.; OVERMARS, K.P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology*, v. 24, p. 1167-1181, 2009.

VERBURG, P.H.; SOEPBOER, W.; VELDKAMP, A.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, V.; MASTURA, S.S.A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, v. 30, p. 391-405, 2002.

VERWEIJ, P.; CORMONT, A.; KOK, K.; VAN EUPEN, M.; JANSSEN, S.; TE ROLLER, J.; DE WINTER, W.; PÉREZ-SOBA, M.; STARITSKY, I.G. Improving the applicability and transparency of land use change modelling: The iCLUE model. *Environmental Modelling & Software*, v. 108, p. 81-90, 2018.

VERWEIJ, P.; JANSSEN, S.; BRAAT, L.; VAN EUPEN, M.; PÉREZ SOBA, M.; WINOGRAD, M.; DE WINTER, W.; CORMONT, A. QUICKScan as a quick and participatory methodology for problem identification and scoping in policy processes. *Environmental Science & Policy*, v. 66, p. 47-61, 2016.

VIEIRA, V.P.P.B. Desafios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Semiárido. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 717, 2003.

VIRGÍLIO, R.M. Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso da UHE Três Marias. Universidade Federal de Itajubá, 2018.

VOROGUSHYN, S.; UNGER-SHAYESTEH, K.; GAFUROV, A.; WEISE, S.M.; BARANDUN, M.; DUETHMANN, D.; KALASHNIKOVA, O.; HE, Z.; MERZ, B. Constraining hydrological model parameters using water isotopic compositions in a glacierized basin, Central Asia. *Journal of Hydrology*, v. 571, p. 332-348, 2019.

WAGNER, P.D.; FOHRER, N. Gaining prediction accuracy in land use modeling by integrating modeled hydrologic variables. *Environmental Modelling and Software*, v. 115, p. 155-163, 2019.

WANG, R.; KALIN, L.; KUANG, W.; TIAN, H. Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama. *Hydrological Processes*, v. 28, p. 5530-5546, 2014.

WANG, Y.; LI, X.; ZHANG, Q.; LI, J.; ZHOU, X. Projections of future land use changes: Multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan city, China. *Ecological Indicators*, v. 94, p. 430-445, 2018.

WILSON, C. O.; WENG, Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. *Science of The Total Environment*, v. 409, n. 20, p. 4387-4405, 2011.

XAVIER, A. Modelagem temporal da dinâmica do uso e ocupação do solo nas perdas e deposição de sedimentos na bacia do Rio Tapacurá (PE). *Dissertação (Mestrado em*

Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 110f.; 2017.

ZHANG, D.; LIN, Q.; CHEN, X.; CHAI, T. Improved curve number estimation in SWAT by reflecting the effect of rainfall intensity on runoff generation. *Water*, v. 11, n. 1, 163, 2019.

ZHOU, F.; XU, Y.; CHEN, Y.; XU, C.Y.; GAO, Y.; DU, J. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, v. 485, p. 113-125, 2013.