



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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE UMA  
BACIA DE CLIMA TROPICAL ÚMIDO SOB DIFERENTES  
CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA**

*Por*

***Maria Caroline Vitoriano Barros***

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

**João Pessoa – Paraíba**

**Março de 2023**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**

**AMBIENTAL**

**– MESTRADO/DOUTORADO –**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE UMA  
BACIA DE CLIMA TROPICAL ÚMIDO SOB DIFERENTES  
CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Maria Caroline Vitoriano Barros**

**Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos**

**João Pessoa – Paraíba**

**Março de 2023**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

B277a Barros, Maria Caroline Vitoriano.

Avaliação do comportamento hidrológico de uma bacia de clima tropical úmido sob diferentes cenários de uso e ocupação da terra / Maria Caroline Vitoriano Barros. - João Pessoa, 2023.  
60 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Abastecimento de água. 2. Sub-bacias do Rio Cupissura. 3. Bacias não-monitoras. I. Santos, Celso Augusto Guimarães. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.1(043)


***“AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NUMA BACIA LITORÂNEA PARAIBANA  
UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA E DINÂMICA ESPACIAL DO USO DO SOLO”***

**MARIA CAROLINE VITORIANO BARROS**  
Dissertação aprovada em 30 de junho de 2023

**Período Letivo: 2023.1**



**Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB**  
**Orientador**

Documento assinado digitalmente  
 **RICHARDE MARQUES DA SILVA**  
Data: 30/06/2023 20:33:16-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB**  
**Examinador Interno**

CAMILO ALLYSON SIMOES DE FARIAS:03542044407 Digitally signed by CAMILO ALLYSON  
SIMOES DE FARIAS:03542044407  
Date: 2023.06.30 15:00:56 -03'00'

**Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias – UFCG**  
**Examinador Externo**

**João Pessoa/PB**  
**2023**

Dedico este trabalho aos que acreditaram em sua realização.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela vida e pela oportunidade de cumprir mais uma etapa importante. Agradeço especialmente aos meus pais, Maria das Dores Vitoriano e Marcelino Barros, por todo o amor, apoio e ensinamentos ao longo da minha jornada acadêmica e pessoal. Sempre me incentivando e me dando forças para seguir em frente.

Também gostaria de agradecer aos meus irmãos, Marcela Barros e Anderson Barros, pela amizade, carinho e incentivo. Às minhas queridas avós, Maria Antônia da Conceição (in memoriam) e Antonieta Barros, pelo convívio, amor incondicional e pelos ensinamentos de vida que levo comigo.

Aos amigos que fiz durante o curso, agradeço pela companhia, amizade, conselhos e pelo apoio durante toda a trajetória acadêmica e pessoal. Desejo a todos vocês muito sucesso e felicidade.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Celso Augusto Guimarães Santos, por sua orientação, ensinamentos e ajuda no direcionamento correto para o desenvolvimento do estudo. Aos meus professores da pós-graduação, sou grato pelos ensinamentos indispensáveis que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço à banca examinadora, formada pelo Professor Dr. Richarde Marques Da Silva e pelo Professor Dr. Camilo Allyson Simões de Farias, pela disponibilidade, atenção e pelas contribuições valiosas durante a apresentação do trabalho. Muito obrigado a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O monitoramento dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas costeiras, particularmente na região Nordeste do Brasil, desempenha um papel essencial. Este monitoramento é fundamental devido aos determinantes ambientais e ao uso da terra, que influenciam o planejamento adequado do desenvolvimento dessas áreas, especialmente aquelas que contribuem para a formação de reservatórios de água. No entanto, a disponibilidade limitada de dados medidos sobre fluxo de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias bacias hidrográficas é uma questão premente. Nesse contexto, foi desenvolvido o modelo "Abordagem Baseada em Eventos para Bacias Pequenas e Não Monitoradas (EBA4SUB)" para auxiliar na avaliação dos processos hidrológicos e reduzir a subjetividade nas análises. Este estudo concentrou-se na análise do comportamento hidrológico de uma das sub-bacias do Rio Cupissura, recentemente selecionada para expansão do sistema de abastecimento de água da região metropolitana de João Pessoa-PB. A análise foi conduzida por meio de simulações utilizando um modelo hidrológico conceitual para bacias não monitoradas e a modelagem dinâmica do uso e ocupação do solo, com o objetivo de estimar o escoamento superficial em cenários futuros de uso do solo. Os resultados indicam que, nos três anos analisados, a sub-bacia foi predominantemente ocupada por agricultura e pastagem, abrangendo de 78% a 81% da área total. Além disso, as análises revelaram perdas significativas nas áreas de florestas e mosaico de agricultura e pastagem. Embora os hidrogramas simulados tenham mantido características semelhantes em sua forma, houve variações nas vazões de pico, indicando um aumento potencial nas vazões para o ano de 2038, o que sugere eventos extremos de chuva frequentes na bacia hidrográfica. Este estudo enfatiza a necessidade de investigar mais profundamente o impacto das mudanças no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, considerar medidas de mitigação possíveis e abordar a incerteza associada às projeções futuras. Em última análise, promove a integração eficiente dos recursos hídricos para garantir a sustentabilidade a longo prazo. Por fim, o estudo enfatiza a necessidade de considerar incertezas nas projeções e promove a integração eficiente dos recursos hídricos para garantir a sustentabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem hidrológica, modelagem dinâmica espacial, bacias não-monitoras.

## **ABSTRACT**

The monitoring of hydrological processes in coastal watersheds, particularly in the Northeast region of Brazil, plays an essential role. This monitoring is crucial due to the environmental factors and land use determinants that influence proper planning for the development of these areas, especially those contributing to the formation of water reservoirs. However, the limited availability of measured data on water flow and sediment transport for small and medium-sized watersheds is a pressing issue. In this context, the "Event-Based Approach for Small and Unmonitored Basins (EBA4SUB)" model was developed to assist in the assessment of hydrological processes and reduce subjectivity in the analyses. This study focused on the analysis of the hydrological behavior of one of the sub-basins of the Cupissura River, recently selected for the expansion of the water supply system for the metropolitan region of João Pessoa-PB. The analysis was conducted through simulations using a conceptual hydrological model for unmonitored basins and dynamic land use and land cover modeling, aiming to estimate surface runoff in future land use scenarios. The results indicate that, in the three years analyzed, the sub-basin was predominantly occupied by agriculture and pasture, covering from 78% to 81% of the total area. Additionally, the analyses revealed significant losses in forested areas and mosaic agriculture and pasture. Although the simulated hydrographs maintained similar shapes, there were variations in peak flows, indicating a potential increase in flows by the year 2038, suggesting frequent extreme rainfall events in the watershed. This study emphasizes the need for further investigation into the impact of land use and land cover changes in the watershed, considering possible mitigation measures and addressing the uncertainty associated with future projections. Ultimately, it promotes the efficient integration of water resources to ensure long-term sustainability. Finally, the study underscores the importance of considering uncertainties in projections and promotes the efficient integration of water resources to ensure sustainability.

**KEYWORDS:** hydrological modeling, dynamic spatial modeling, unmonitored basins.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo .....	22
Figura 2 - Metodologia utilizada na previsão do uso do solo.....	23
Figura 3 – Modelo Digital de Elevação para a área de estudo. ....	24
Figura 4 - Distribuição espacial dos dados TRMM 3B42V7 na sub-bacia do Rio Cupissura. .....	27
Figura 5 - Distribuição espacial das estações pluviométricas na bacia do Rio Cissura. ....	28
Figura 6 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 1998.....	39
Figura 7 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 2006.....	40
Figura 8 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 2006.....	40
Figura 9 - Função hidrográfica da unidade instantânea de largura (WFIUH) para os anos estudados. ....	42
Figura 10 - Precipitação bruta observada e vazão modelada no EBA4SUB para os eventos com duração de 6h.....	43
Figura 11 - Precipitação bruta observada e vazão modelada no EBA4SUB para os eventos com duração de 9h.....	44
Figura 13 - Precipitação bruta acumulada e vazão modeladas a partir da curva IDF para Tr 25 e 50 anos. ....	45
Figura 14 - Ganho e perda em quilômetros (km <sup>2</sup> ) por categoria de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Rio Cissura. ....	45
Figura 15 - Informações quantitativas de concordância e discordância entre as duas imagens.....	49
Figura 16 - Mapas do uso e ocupação do solo em 2018 partir da imagem de satélite observado e simulado pelo modelo LCM.....	50
Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo simulado para t4 (2028). ....	51
Figura 18 - Mapa de uso e ocupação do solo simulado para t5 (2038). ....	52
Figura 19 - Vazões simuladas para os cenários de uso do solo futuros.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações das imagens utilizadas no estudo.....	27
Tabela 2 - Resumo das características dos eventos selecionados.....	29
Tabela 3 - Áreas das classes de uso e ocupação do solo para 1998, 2006 e 2018 na sub- bacia.....	41
Tabela 4 - Variáveis explanatórias e o resultado do teste V de Cramer.....	46
Tabela 5- Matriz de transição do uso e ocupação do solo entre 1998 e 2006 com os percentuais de mudança e persistência .....	48
Tabela 6 - Índice Kappa de concordância (KIA) para todas as classes, utilizando 2018 simulado e observado .....	49
Tabela 7 - Áreas das classes de uso de ocupação do solo para 2018 observado e simulado. .....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS LITORÂNEAS .....	16
3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS LITORÂNEAS .....	17
3.3 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	20
<b>4 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>21</b>
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	23
5.1.1 Altimetria.....	23
5.1.2 Processamento digital de imagens .....	24
5.1.3 Segmentação, classificação e tratamento das imagens.....	25
5.1.4 Precipitação .....	26
5.1.4.1 Estações Virtuais (TRMM) .....	26
5.1.4.2 Estações Pluviométricas .....	27
5.1.4.3 Eventos .....	28
5.2 DESCRIÇÃO DO MODELO EBA4SUB.....	29
5.3 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL UTILIZANDO O LCM .....	32
5.3.1 PREVISÃO DO POTENCIAL DE TRANSIÇÃO.....	33
5.3.1.1 Avaliação da mudança na cobertura do solo.....	33
5.3.1.2 Identificação das transições entre as categorias de uso do solo .....	33
5.3.1.3 Teste e seleção das variáveis explanatórias.....	34
5.3.1.4 Modelagem de transição potencial por meio do método de Redes Neurais Multi Layer Perceptron (RNMLP).....	35
5.3.2 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	36
5.3.2.1 Cadeias de Markov.....	36
5.3.2.2 Validação da simulação de mudanças no uso e ocupação do solo.....	36
5.3.2.3 Simulação do uso e ocupação do solo para t4 (2028) e t5 (2038).....	38
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
6.1 MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA OS ANOS DE 1998, 2006 E 2018 .....	38
6.2 APLICAÇÃO DO MODELO EBA4SUB .....	41
6.3 MODELAGEM DOS CENÁRIOS FUTUROS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	45
6.3.1 Análise das alterações no uso e ocupação do solo em t1 (1998) e t2 (2006) usando o LCM.....	45
6.3.2 Variáveis explanatórias selecionadas após o teste V de Cramer.....	46
6.3.3 Matriz de probabilidade de transição para t1 (1998) e t2 (2006) .....	47
6.3.4 Validação da simulação do uso e ocupação do solo em 2018 utilizando o modelo LCM.....	48

<i>6.3.5 Cenários de uso e ocupação do solo simulados</i> .....	<i>51</i>
6.3.5.1 Uso e ocupação do solo simulado para t4 (2028) .....	51
6.3.5.2 Uso e ocupação do solo simulado para t5 (2038) .....	52
6.4 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA EVENTO DE CHUVA UTILIZANDO CURVA IDF NOS CENÁRIOS FUTUROS .....	53
<b>7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os espaços litorâneos costeiros brasileiros são de grande importância tanto em termos econômicos quanto ambientais. Eles desempenham um papel fundamental na economia do país, abrigando portos movimentados, indústrias, zonas turísticas e cidades densamente povoadas. Além disso, essas regiões costeiras abrigam uma rica biodiversidade e ecossistemas marinhos que desempenham um papel vital na regulação do clima global SILVA *et al.* (2019).

No entanto, como apontado por Pereira (2017), o aumento da urbanização e da atividade industrial ao longo da costa brasileira tem levado a desafios significativos, como a degradação dos ecossistemas costeiros e a poluição. Portanto, compreender a dinâmica e os desafios enfrentados pelos espaços litorâneos costeiros brasileiros é crucial para promover o desenvolvimento sustentável e a preservação desse patrimônio natural e econômico.

O gerenciamento das bacias hidrográficas costeiras representa um elemento de relevância incontestável na gestão ambiental das regiões litorâneas. Estas áreas confrontam-se com desafios de considerável complexidade, em virtude da interação intricada entre os sistemas hídricos de água doce e salgada, bem como das pressões decorrentes do processo de urbanização, desenvolvimento industrial e turismo costeiro. Consoante destacado por Smith *et al.* (2020), a abordagem integrada do gerenciamento das bacias hidrográficas costeiras desempenha uma função primordial na conservação dos recursos hídricos, na mitigação de eventos extremos, como inundações e tempestades, e na preservação dos ecossistemas litorâneos, intrinsecamente sensíveis.

Johnson (2019) aborda a importância de considerar os impactos das mudanças climáticas ao planejar estratégias para o manejo das bacias costeiras, em face da crescente ameaça representada pelo aumento do nível do mar e pela intrusão salina. Portanto, a abordagem metódica e integrada ao gerenciamento de bacias hidrográficas costeiras se erige como fator crítico para assegurar a sustentabilidade desses ecossistemas essenciais e a proteção das comunidades a eles associadas.

Estudos recentes têm explorado abordagens além do manejo para enfrentar os desafios na região costeira. Por exemplo, pesquisas conduzidas por Johnson *et al.* (2021) mostraram que a restauração de habitats costeiros, como manguezais e recifes de coral, desempenha um papel crucial na proteção e na resiliência costeira. Esses ecossistemas desempenham funções importantes na dissipação de ondas, no controle da erosão e na preservação da biodiversidade.

Além disso, a implementação de políticas de gestão integrada de zonas costeiras, envolvendo múltiplos setores e partes interessadas, tem se mostrado eficaz na abordagem holística dos problemas costeiros (JONES *et al.*, 2020). Essas abordagens englobam a consideração de aspectos sociais, econômicos e ambientais na tomada de decisões, visando um equilíbrio sustentável entre o desenvolvimento humano e a conservação dos ecossistemas costeiros.

Neste contexto, a importância das bacias hidrográficas costeiras, em particular, no Nordeste na perspectiva dos recursos hídricos, ocorre devido a sua localização geralmente ser próxima a grandes centros urbanos ou regiões periurbanas. Essas bacias, embora apresentem áreas moderadas, estão sujeitas a um desenvolvimento socioeconômico importante e crescente, principalmente baseado na expansão urbana e turística, mineração, atividades industriais e agrícolas (SILVA *et al.*, 2002).

Bezerra & Silva (2014) apontam que o intenso desenvolvimento em bacias hidrográficas costeiras na região Nordeste, especialmente as contribuintes para a formação de reservatórios fluviais destinados a sistemas de abastecimento de água, demandam um maior planejamento por parte do processo de ocupação, considerando seus determinantes ambientais e concordância com os distintos usos do solo.

Dessa forma, tendo em vista que o crescimento da utilização dos recursos hídricos disponíveis aumenta juntamente com as ações antrópicas, ocasionando uma alteração substancial no ciclo hidrológico, Stewart (2015) ratifica que o monitoramento hidrológico é fundamental ao planejamento, ao aproveitamento e à conservação dos recursos hídricos, uma vez que estes não podem ser gerenciados adequadamente a menos que se tenham informações sobre onde estão, em que quantidade e qualidade e o quão variáveis podem ser em um futuro previsível.

Apesar da importância do acompanhamento hidrológico, a disponibilidade de séries de dados medidos de vazões, bem como a avaliação de transporte de sedimentos, para as pequenas e médias bacias hidrográficas é limitada, com exceção de alguns trabalhos de pesquisa (CABRAL, 2011). Assim, para auxiliar a avaliação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, procurou-se desenvolver modelos a fim de simular e quantificar os processos de chuva, vazão e erosão. Na literatura, diversos modelos hidrológicos fornecem resultados diferentes quando aplicados a uma bacia específica. Logo, a escolha de um modelo de simulação adequado para uma região depende não somente dos fundamentos conceituais do modelo, mas também da sua robustez, precisão, consistência e facilidade de parametrização.

Recentemente, no contexto acadêmico, foi introduzido um modelo conceitual de chuva-vazão denominado "Abordagem Baseada em Eventos para Bacias Pequenas e Não Dimensionadas" (EBA4SUB), como documentado por Piscopia et al. (2015).

O modelo consiste em uma série de módulos típicos de procedimentos baseados em eventos: estimativa de precipitação bruta de projeto e seleção de hietograma de projeto, estimativa de excesso de chuva e transformação chuva-vazão. O principal objetivo do EBA4SUB é propor um framework que forneça resultados semelhantes quando aplicado por dois analistas em momentos diferentes para a mesma bacia hidrográfica e dados de entrada, minimizando a subjetividade do modelador (Petroselli *et al.*, 2020).

Considerando os questionamentos relacionados a ausência de medições de vazão e a aplicação de modelos hidrológicos, a pesquisa busca realizar a análise do comportamento hidrológico em uma das sub-bacias do Rio Cupissura frente às transformações causadas pelas ações naturais e antrópicas. A bacia estudada foi recentemente selecionada como área de ampliação do sistema de abastecimento de água da região metropolitana de João Pessoa-PB e é de bastante importância para a população rural residentes no seu entorno.

O estudo foi conduzido através de simulações de vazão superficiais e de pico utilizando um modelo hidrológico conceitual para bacias não aferidas, uma vez que as medições no local se encontram em estágio inicial. Esta pesquisa torna-se importante para o conhecimento do comportamento hídrico da região numa escala temporal visando um melhor planejamento e gerenciamento da área.

## **2 OBJETIVOS**

### **Geral**

Estimar o comportamento hidrológico de uma bacia de clima tropical úmido sob diferentes cenários de uso e ocupação da terra.

### **Específicos**

- ✓ Estimar por meio de eventos chuvosos o escoamento superficial e vazões de pico para diferentes períodos de retorno a partir de um modelo conceitual para bacias não aferidas;
- ✓ Analisar a evolução dos usos do solo na sub-bacia considerando a série temporal relativa aos anos 1998, 2006 e 2018;
- ✓ Simular cenários de uso e ocupação do solo para os anos de 2028 e 2038;
- ✓ Estimar e avaliar o escoamento superficial para cenários futuros de uso do solo.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Bacias Hidrográficas Litorâneas

A água é um recurso natural indispensável para a humanidade. No entanto, sua disponibilidade vem diminuindo devido às distintas práticas e usos inadequados dos corpos hídricos, bem como à insuficiente gestão desse recurso. As regiões costeiras estão entre as mais densamente povoadas do mundo, o que provoca elevada pressão sobre a demanda hídrica (SMALL & NICHOLLS, 2003). As influências naturais e induzidas pelo homem no litoral mantêm o território costeiro e seus recursos em um estado de mudança e transição contínuas (VALLEGA, 1999).

Beatley *et al.* (2002) afirmam que as unidades de bacias hidrográficas estão inseridas na região terrestre das áreas costeiras, onde a intensificação inadequada do uso do solo afeta consideravelmente essa unidade hidrológica. A bacia hidrográfica é composta fundamentalmente de um conjunto de superfícies vertentes e uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem seguindo contornos físicos e características geográficas até resultar em um único ponto de saída, o exutório (TUCCI, 2007).

No Nordeste brasileiro, o maior interesse com relação a essas bacias hidrográficas litorâneas em relação aos recursos hídricos está relacionado à proximidade dessa unidade a grandes centros urbanos ou até em regiões periurbanas. Nesse sentido, mesmo que essas bacias apresentem uma área de porte médio, elas podem estar sujeitas a um desenvolvimento socioeconômico importante e crescente, essencialmente baseado nas atividades agrícolas, de mineração, industriais, turísticas e até de expansão urbana (SILVA *et al.*, 2002).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (1997) especifica a importância da bacia hidrográfica como unidade territorial essencial para estudos hidrológicos científicos por meio de bacias experimentais e representativas, tanto para a realização do diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos quanto para a análise de cenários futuros de uso por meio de modelagem.

Nessa perspectiva, a análise precisa do escoamento de água em uma bacia é essencial para a melhor proteção e gerenciamento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e para o entendimento das condições abióticas do rio (WENNINGER *et al.*, 2008). Apesar disso, a escassez de informações dificulta a obtenção de tais conhecimentos. Essa ausência de dados e a necessidade de conhecê-los por toda a extensão da área de estudo, muitas vezes, limitam a execução de um adequado planejamento (ROCHA & SANTOS, 2018).

Os métodos utilizados na hidrologia na década de 50 limitavam-se a indicadores estatísticos dos processos envolvidos. A partir da consolidação da computação, ocorreu o aperfeiçoamento de técnicas numéricas e estatísticas, promovendo um desenvolvimento acelerado de diversos modelos (LOPES, 2010).

### **3.2 Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas Litorâneas**

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas litorâneas é um campo dinâmico, em constante evolução, que tem contribuído significativamente para a nossa compreensão dos desafios específicos enfrentados por essas zonas costeiras. Pesquisadores contemporâneos, como os autores Wagener *et al.* (2015), enfatizam a importância da integração de dados de sensoriamento remoto e técnicas de modelagem espacial para aprimorar a precisão dos modelos hidrológicos em áreas costeiras. Em paralelo, pesquisas recentes conduzidas por Li *et al.* (2019) ressaltam a necessidade premente de considerar os impactos das mudanças climáticas na intrusão salina em bacias costeiras, realçando o papel crucial da modelagem hidrológica na antecipação e mitigação desses efeitos. Além disso, Kumar *et al.* (2020) exploram inovações ao utilizar técnicas avançadas de aprendizado de máquina na previsão de eventos de inundação extrema em regiões litorâneas. Essas fontes de referência atuais exemplificam o progresso contínuo na pesquisa de modelagem hidrológica em bacias litorâneas, fornecendo valiosas perspectivas para a gestão sustentável dos recursos hídricos em ecossistemas costeiros cada vez mais vulneráveis.

Para Tucci (1998), um modelo é a representação de um objeto ou sistema em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Os modelos são necessários para simular o comportamento de sistemas naturais, possibilitando prever sua resposta a diferentes ações.

Nesse sentido, um modelo hidrológico é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros permanecem com seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Portanto, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que ele não possa variar espacialmente (SEIBT, 2013).

O modelo hidrológico pode ser classificado e conceituado sobre padrões matemáticos para hidrologia, de acordo com diferentes aspectos. De maneira geral, o modelo pode ser classificado como determinístico, estocástico, empírico, conceitual, fundamental, concentrado, distribuído e contínuo.

Na modelagem de bacias hidrográficas litorâneas, diversos modelos hidrológicos têm sido utilizados, cada um com suas particularidades e vantagens. Um dos modelos mais utilizados é o modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desenvolvido por Arnold *et al.* (1998). Este modelo foi projetado para prever a quantidade de água, sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas, utilizando dados climáticos, geográficos e de uso da terra.

Outro modelo muito utilizado é o modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers (USACE). Este modelo é projetado para modelar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, considerando a interação entre os processos hidrológicos e a topografia da área de estudo (USACE, 2016).

O modelo hidrológico SWAT e o modelo hidrológico HEC-HMS são bastante utilizados na modelagem hidrológica de bacias hidrográficas litorâneas, mas outros modelos também têm sido empregados, como o modelo hidrológico MIKE SHE (Mikes Hydrological Simulation Environment), desenvolvido pelo DHI (Danish Hydraulic Institute), que leva em consideração a interação entre os processos hidrológicos, a geologia e a topografia da área de estudo (DHI, 2021).

Além disso, existem modelos hidrológicos mais específicos para as bacias hidrográficas litorâneas, como o modelo hidrológico J2000, desenvolvido por Jørgensen (1997), projetado para simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas com alta frequência de tempestades. Particularmente, os modelos conceituais são baseados em equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético, podendo ou não ser baseados no processo real, e são considerados modelos agregados comumente aplicados na modelagem hidrológica. Assim, eles funcionam com distintos armazenamentos, mas mutuamente interconectados, ilustrando características físicas em uma bacia hidrográfica (ALMEIDA & SERRA, 2017; ABDULKAREEM *et al.*, 2018).

Os modelos conceituais são amplamente utilizados em estudos nacionais e internacionais, aplicados a pesquisas sobre a hidrologia de bacias hidrográficas, procurando detalhar os processos e transformações ocorridas nesse ambiente. A escolha do modelo depende dos objetivos do seu uso, da quantidade de dados disponíveis, das características da bacia e sua ocupação, da familiaridade do usuário com o modelo e do orçamento e cronograma previstos (TUCCI, 1998). Nesse sentido, o modelo utilizado para este estudo foi o EBA4SUB (Event-based Approach for Small and Ungauged Basins).

O EBA4SUB foi desenvolvido por Grimaldi & Petroselli (2015) para bacias não avaliadas, com a proposta de apresentar uma estrutura baseada em eventos para a estimativa de hidrogramas de projeto aplicados nas mesmas condições complexas em que a fórmula racional é utilizada. Seus módulos são caracterizados da seguinte forma: estimativa de precipitação bruta, seleção de hietógrafo de projeto, estimativa de precipitação líquida e transformação direta do escoamento superficial.

Sivapalan (2003) define uma bacia não avaliada como "aquela com registros inadequados em relação a dados relacionados à quantidade e qualidade de observações hidrológicas para permitir o cálculo de variáveis de interesse nas escalas espacial e temporal apropriadas e com precisão considerável para aplicações práticas".

Essa escassez de dados nas bacias se deve ainda ao gradual desenvolvimento da construção mundial de estações hidrológicas, em que existem muitas bacias pequenas sem estações de monitoramento pluviométrico e fluviométrico (WAGENER & MONTANARI, 2011). Por conseguinte, um dos principais problemas enfrentados pela comunidade hidrológica nas últimas décadas tem sido as previsões de escoamento em bacias não aferidas (AYZEL, 2018).

A previsão de vazão em bacias sem medição é um tema científico relevante e surge como um grande desafio para a hidrologia. As séries de vazões normalmente previstas para bacias hidrográficas não avaliadas fazem uso de modelos de escoamento pluviométrico ou métodos orientados a dados, com abordagens baseadas em regressão. Nessas abordagens, as séries de fluxo não são estimadas por modelos hidrológicos, mas são baseadas em características fisiográficas e/ou meteorológicas das bacias e modelos orientados a dados (RAZAVI & COULIBALY, 2017).

A modelagem hidrológica para bacias não monitoradas tem sido estudada com o objetivo de realizar previsões de informações, como hietogramas e hidrogramas, promovendo assim o conhecimento sobre o comportamento hidrológico nesses ambientes, como detalhado nos seguintes estudos (IBRAHIM *et al.*, 2015; PETROSELLI *et al.*, 2020).

Ibrahim *et al.* (2015) desenvolveram uma abordagem de previsão para determinar a descarga mensal em oito bacias hidrográficas não monitoradas. O método desenvolvido neste estudo auxiliou na estimativa de séries temporais de escoamento importantes para projetar estruturas hidráulicas.

Petroselli *et al.* (2020) aplicou o modelo conceitual de chuva-vazão EBA4SUB em seis bacias hidrográficas no Irã, tendo como objetivo testá-lo na reconstrução de hidrogramas

de escoamento superficial e fornecer uma alternativa adequada para a revisão e atualização da estimativa de pico de fluxo no Irã.

### **3.3 Modelagem Dinâmica Espacial do Uso e Ocupação do Solo**

A modelagem é uma abordagem amplamente utilizada na busca por uma melhor compreensão de eventos em uma ampla variedade de áreas, incluindo estudos ambientais, graças à natureza analítica dos modelos. Ao usar modelos espaciais de mudanças no uso e cobertura do solo, é possível estimar não apenas a quantidade, mas também o momento e o local em que essas mudanças ocorrem. Essa abordagem permite prever possíveis formas de uso e demandas de ocupação futuras para esses espaços (MACEDO, ALMEIDA, et al., 2013).

De acordo com Rossetti (2011), os modelos são capazes de representar o comportamento da realidade baseado nos dados observados, permitindo assim a predição de eventos que ocorrem em determinadas circunstâncias. Além disso, por meio desses modelos, é possível estabelecer teorias e hipóteses sobre o futuro, assim como verificar hipóteses relacionadas ao passado.

Para monitorar as mudanças no uso e cobertura do solo, são empregados modelos computacionais ou plataformas de detecção de mudança do tipo LUCC (*Land Cover and Use Change*). A análise de mudanças no uso e cobertura da terra LUCC é uma importante ferramenta para compreender as alterações na paisagem e seus impactos no meio ambiente e na sociedade. Esse conceito é definido como "a conversão de uma cobertura ou uso da terra para outro, seja por atividades humanas ou por processos naturais" (Lambin et al., 2003). Para realizar a análise de LUCC, existem diversas ferramentas disponíveis na literatura, como o software Dinamica EGO, o modelo CLUE-S, o GeoPAT e o Teerset - Land Change Modeler. Essas ferramentas utilizam técnicas de análise espacial e de modelagem para identificar e quantificar as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo.

Segundo Benedetti (2010), a modelagem dinâmica por meio de modelos LUCC tem como objetivo simular as mudanças espaço-temporais nos atributos do meio ambiente, em relação a um território geográfico. Isso permite entender os mecanismos que causam a mudança e avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de variáveis definidas pelo modelador.

A modelagem dinâmica espacial do uso e ocupação do solo tem sido amplamente aplicada em estudos ambientais. Dentre as ferramentas de modelagem mais utilizadas,

destaca-se o modelo Land Change Modeler (LCM). Esse modelo apresenta diversas vantagens, como uma interface computacional acessível e menor tempo para aprendizagem da linguagem específica de modelagem (YIN *et al.*, 2021).

Diversos estudos têm utilizado o LCM para estimar mudanças no uso e cobertura do solo em diferentes regiões do mundo. Na China, por exemplo, foi utilizado o LCM para prever mudanças no uso do solo em áreas urbanas. Os resultados indicaram que a expansão urbana afetará áreas agrícolas e florestais (YU *et al.*, 2020).

Em outro estudo, realizado na Indonésia, o LCM foi utilizado para avaliar o impacto das políticas de conservação da floresta tropical na mudança do uso do solo. Os resultados mostraram que a implementação de políticas de conservação contribuiu para a redução do desmatamento e da conversão de florestas em áreas agrícolas (WIDAYATI *et al.*, 2020).

Além do LCM, outras ferramentas de modelagem dinâmica espacial têm sido utilizadas em estudos de mudança no uso e cobertura do solo. Na Austrália, por exemplo, foi utilizado o modelo Dinamica EGO para avaliar a mudança do uso do solo em uma bacia hidrográfica. Os resultados indicaram que a mudança do uso do solo afetou a qualidade da água e o fluxo de nutrientes na bacia hidrográfica (MILLER *et al.*, 2021).

Outra pesquisa realizada na Amazônia brasileira, utilizando o Dinamica EGO avaliou os impactos das mudanças no uso do solo na biodiversidade. Os resultados mostraram que a expansão da fronteira agrícola e a construção de estradas têm causado perda de habitat e fragmentação de florestas, o que afeta negativamente a biodiversidade (FELDPAUSCH *et al.*, 2019).

O LCM tem sido amplamente empregado em estudos de mudança do uso e cobertura do solo, apresentando diversas vantagens, tais como uma interface computacional acessível e menor tempo de aprendizagem da linguagem específica de modelagem. No presente estudo, optou-se pelo uso do LCM como modelo de simulação, tendo em vista seus benefícios e sua adequação aos objetivos do estudo.

#### **4 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO**

A área a ser estudada encontra-se ao sul do estado da Paraíba e ao norte do estado de Pernambuco, compreendendo a região entre os municípios de Caaporã e Itambé. Esta área é delimitada pelas coordenadas geográficas que variam de 7°23'51"S a 7°29'45"S de latitude e de 34°53'19"O a 35°06'38"O de longitude, abrangendo uma extensão territorial de aproximadamente 109,95 km².

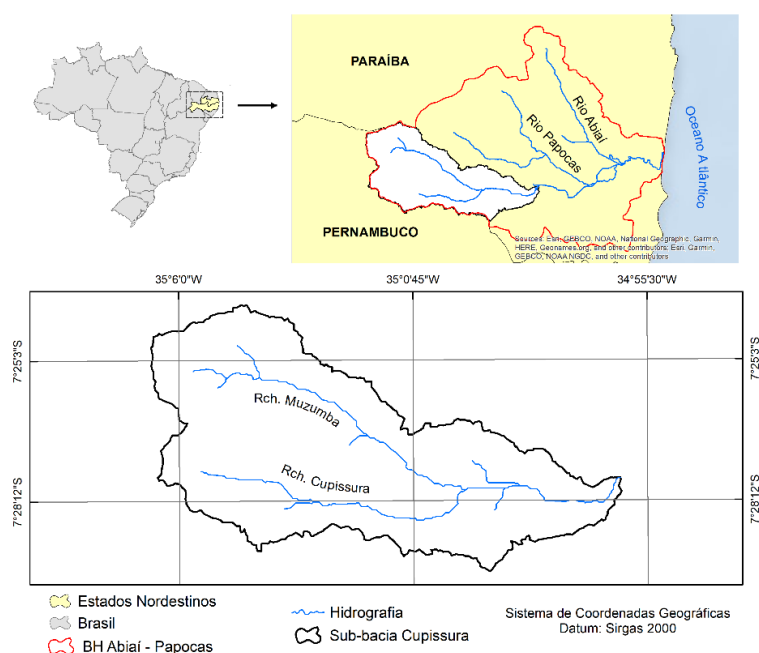
O local faz parte de uma das sub-bacias do Rio Cupissura cujo o exultório foi determinado com base em medições iniciais de vazão e nível na bacia, conforme indicado no estudo conduzido pela Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia (SCIENTEC, 2020). A Figura 1, apresentada neste contexto, oferece uma representação cartográfica da localização precisa da área de estudo mencionada anteriormente.

A área de estudo está localizada em uma região costeira do Nordeste brasileiro, caracterizada por uma geologia predominantemente sedimentar formada por rochas da Formação Barreiras. A geomorfologia é marcada por um relevo de baixas altitudes, com elevações que variam de 0 a 200 metros acima do nível do mar, formando uma planície costeira intercalada por morros isolados e serras baixas. A vegetação nativa da região é composta por áreas de Mata Atlântica, com destaque para as florestas ombrófilas de terras baixas, além de áreas de manguezais e restingas (PARAÍBA, 2010).

O clima da região é classificado como tropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e temperatura média anual em torno de 26°C. Os meses de abril a julho são os mais chuvosos, enquanto os meses de setembro a dezembro são geralmente mais secos (BRASIL, 2015).

As recentes medições hidrológicas dão subsídio ao conjunto de estudos para a construção da barragem Cupissura, que será implementada para ampliação do abastecimento de água da Grande João Pessoa. A barragem terá sua localização próximo às comunidades de Cupissura e Retirada, no município de Caaporã-PB (PARAÍBA, 2019).

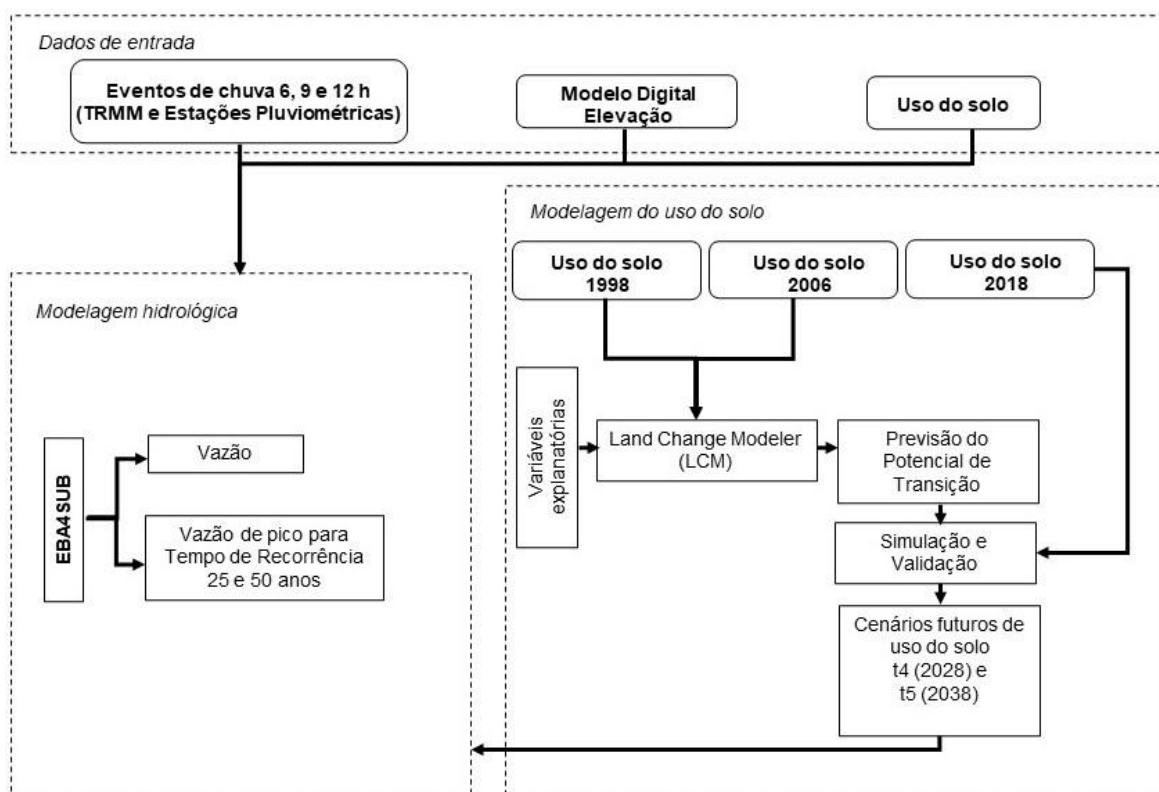
**Figura 1 - Localização da área de estudo**



## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução dos modelos, faz-se necessário possuir diversos dados em relação à área de estudo, como por exemplo: dados pluviométricos, topográficos e uso e ocupação do solo. Nesta seção, conforme Figura 2, além da descrição dos dados necessários para a modelagem e sua organização, será também descrito os modelos anteriormente citados .

**Figura 2 - Metodologia utilizada na previsão do uso do solo**



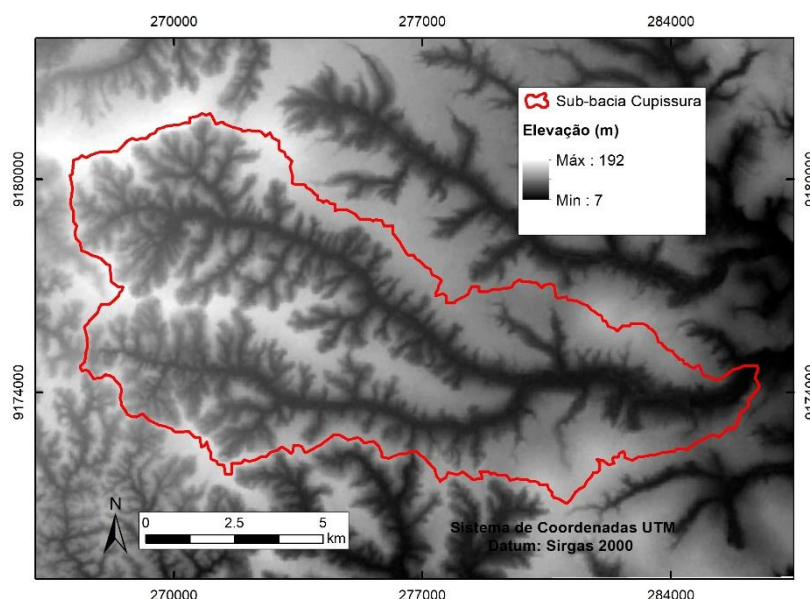
### 5.1 Aquisição de dados

#### 5.1.1 Altimetria

Como parte dos dados de entrada para a modelagem hidrológica, foi utilizado no estudo o Modelo Digital de Elevação (MDE), como observa-se na Figura 3, o mesmo foi obtido por meio do portal *United States Geological Survey* (USGS). Esse MDE constituiu em um dado adquirido na *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e apresenta resolução espacial de 30 m.



**Figura 3 – Modelo Digital de Elevação para a área de estudo.**



### *5.1.2 Processamento digital de imagens*

Os cenários de uso e ocupação do solo e seus respectivos agentes espaciais e distintas formas de inserção na sub-bacia do Rio Cupissura foram analisados por meio da elaboração e interpretação de mapas temáticos. Foi realizado um levantamento de dados que consistiu em pesquisar imagens de satélites Landsat apropriadas, com resolução espacial de 30 m.

A região estudada situa-se no litoral, assim é comum que ocorra forte quantidade de nuvens na imagem. Dessa forma, para a escolha das cenas de melhor qualidade, foram considerados os seguintes critérios: a mínima cobertura de nuvens e a espacialização de anos diferentes, porém, com datas próximas para verificação temporal do uso e ocupação do solo. As imagens adquiridas localizam-se na órbita 214, ponto 65 e foram obtidas por meio do catálogo de imagens do *United States Geological Survey* (USGS), para diferentes satélites Landsat. Para o satélite Landsat-5, sensor TM, foram obtidas imagens datadas dos dias 14/06/1998 e 26/08/2006 e para o satélite Landsat-8, sensor OLI/TIRS foi obtida a cena para o dia 27/08/2018.

Para a melhor identificação dos elementos espaciais nas imagens do Landsat, foram realizadas composições coloridas. Nos anos de 1998 e 2006 a composição satisfatória para o estudo foi 5(R)4(G)3(B). Em 2018, a composição que obteve o máximo de representação para a identificação espacial da região foi a composição colorida 6(R)5(G)4(B).

Em seguida, utilizando o *software* SPRING 5.4.3 realizou-se o georreferenciamento das imagens por meio da ferramenta “registro”, onde, foram adicionados os 25 pontos de

controle para cada imagem, gerando um erro quadrático médio aceitável, uma vez que após georreferenciadas as imagens obtiveram um erro abaixo de 1 pixels, no qual se pode verificar 0,76 pixels para os anos de 1998 e 2006, 0,78 pixels para o ano 2018. O sistema de projeção de coordenadas utilizado no estudo foi o UTM (*Universal Transversa de Mercator*), *South American, Sirgas 2000*, zona 25 S.

### 5.1.3 Segmentação, classificação e tratamento das imagens

A segmentação e classificação das imagens foi realizada utilizando o *software* SPRING 5.4.3. Esse procedimento foi realizado pelo método do algoritmo segmentação, sendo a similaridade e área 5 e 30 pixels a que melhor representou as feições da região, principalmente dos Corpos hídricos, Área florestada e Área urbana.

Posteriormente, iniciou-se o a classificação supervisionada, que consistiu nas seguintes etapas: a) definição das classes de mapeamento; b) escolha das amostras de treinamento; c) aplicação do algoritmo de classificação e d) edição da classificação. Esse método permitiu que os pixels de uma imagem se alocassem em classes definidas pelo analista, necessitando que o usuário identifique pixels amostrais.

Com a etapa anterior concluída foi iniciada a definição das classes de uso e ocupação do solo para bacia sub-bacia do Rio Cupissura, sendo elas definidas como: Área urbana, Área florestada, Culturas diversas, Cana-de-açúcar e Corpos hídricos. Algumas regiões na área da bacia foram analisadas, por meio do *software* Google Earth Pro 7.3.3, a fim de definir incertezas acerca da informação de uso do solo. Este software apresenta um mosaico de imagens de satélite de alta resolução, com delimitação de datas de aquisição, além da praticidade de utilização na hora eliminar dúvidas em algumas áreas. Essa fase é fundamental e normalmente aparecem conflitos sobre o uso do solo na leitura das imagens de satélites, que por sua vez devem ser corrigidos.

O classificador utilizado na etapa de classificação das imagens foi o *Battacharya* com limiar de 99,9 %. Esse tipo de classificador utiliza a informação espectral dos pixels baseados nas propriedades espaciais, onde, o algoritmo da máxima verossimilhança, avalia a variância e a covariância das categorias de padrões de resposta espectral quando classifica um pixel desconhecido.

Após um resultado satisfatório na classificação supervisionada, executou-se a transformação da imagem do formato *raster* para *vetor* por meio da ferramenta “Matriz-Vetor” e na sequência sua exportação em *shapefile*. Por fim, com a criação do arquivo

*shapefile*, o mesmo foi levado ao *software* ArcGis 10.5®, onde se realizou a interpretação e a edição das classes, calculando suas respectivas áreas.

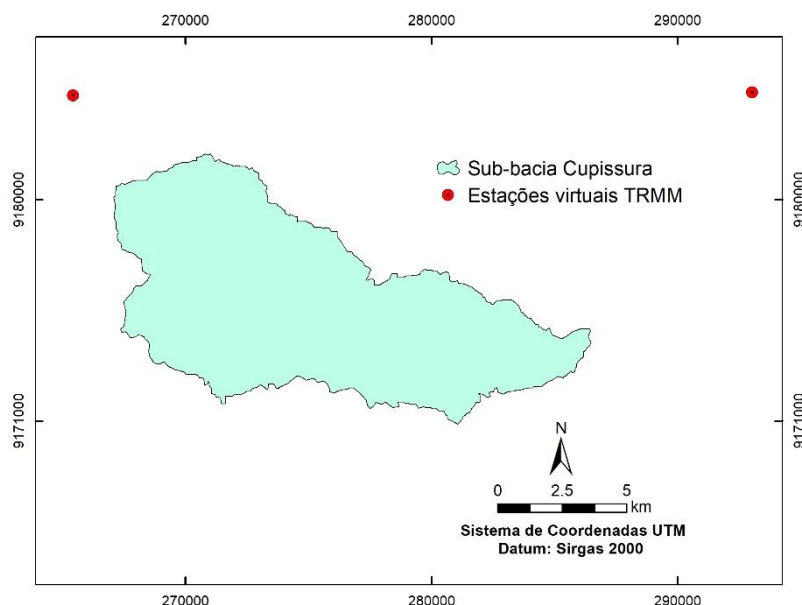
#### 5.1.4 Precipitação

As informações de precipitação pluviométrica utilizadas na modelagem hidrológica foram obtidas a partir de dados em estações pluviométricas e dados estimados pelo satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

##### 5.1.4.1 Estações Virtuais (TRMM)

O produto TRMM utilizado como fonte de dados pluviométricos foi o 3B42V7, disponibilizado pela NASA em diferentes plataformas e formatos. Para o estudo esse dado foi adquirido por meio do site, <<https://disc.gsfc.nasa.gov/>>, onde essa informação corresponde ao pixel sobreposto a estação real, com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , aproximadamente 25 km, para latitudes  $50^\circ\text{N}$  e  $50^\circ\text{S}$  e longitudes  $180^\circ\text{O}$  e  $180^\circ\text{E}$  e com resolução temporal de 3 horas (01:30, 04:30, 07:30, 10:30, 13:30, 16:30, 19:30 e 22:30). Na sub-bacia do Rio Cupissura, estão presentes duas quadrículas do TRMM 3B42V7, como observa-se na espacialização dos centróides da Figura 4. Para a modelagem hidrológica utilizou-se os dados pluviométricos referentes ao ano 1998 e 2006.

**Figura 4 - Distribuição espacial dos dados TRMM 3B42V7 na sub-bacia do Rio Cupissura.**



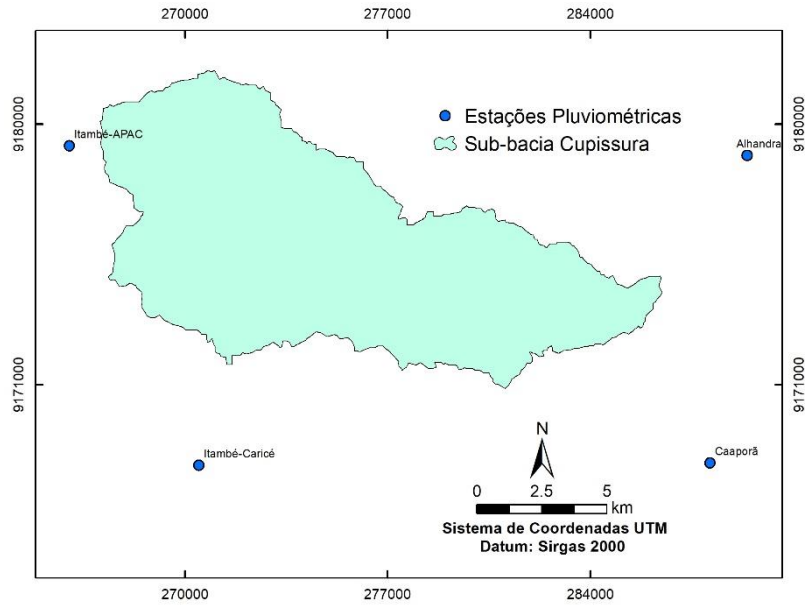
#### 5.1.4.2 Estações Pluviométricas

Os dados dos pluviômetros foram provenientes na plataforma do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemadem). Foram obtidas informações de registros de ocorrência ou não de chuva em um intervalo horário e sub-horário ao longo do ano de 2018 por pluviômetros automáticos. A partir disso, ocorreu a acumulação dos dados de chuva para os intervalos de tempo seguindo o comportamento das precipitações observadas para o TRMM, ou seja, acumulada para o intervalo de 3 horas em 3 horas. Para a área de estudo utilizou-se no total três postos, apresentados na Tabela 1, com suas localizações próximas a área de influência da sub-bacia do Rio Cupissura, como mostra a Figura 5.

**Tabela 1 - Informações das imagens utilizadas no estudo.**

<b>Estações</b>	<b>Código da estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Responsável</b>
Itambé - APAC	260765301A	-7,42	-35,12	CEMADEN
Itambé - Caricé	260765302A	-7,52	-35,08	CEMADEN
Caaporã - Centro	250300101A	-7,52	-34,92	CEMADEN

**Figura 5 - Distribuição espacial das estações pluviométricas na bacia do Rio Cissura.**



Além das estações pluviométricas utilizou-se a curva IDF para estação Alhandra obtida por Campos *et al.* (2017), com o objetivo de se calcular vazões para os períodos de retorno estudados ( $Tr = 25$  e  $Tr = 50$ ) anos. A equação a seguir apresenta os parâmetros correspondentes a curva.

$$i = \frac{973.248.T_r^{0.207}}{(t+10.327)^{0.751}} \quad (1)$$

onde,  $i$  é a precipitação máxima média (mm/h),  $Tr$  o período de retorno (em anos),  $t$  duração da chuva (min).

#### 5.1.4.3 Eventos

Considerando a distribuição espacial e temporal da rede pluviométrica presente na bacia, caracterizada pelos dados TRMM e estações pluviométricas, considerou-se o método de Thiessen para o cálculo da precipitação média dos eventos estudados, buscando uma distribuição uniforme.

Assim, a precipitação foi calculada pela média ponderada, entre a precipitação  $P_i$  de cada estação e o peso a ela atribuído  $A_i$  que é a área de influência de  $P_i$ .

$$P_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A} \quad (2)$$

onde,  $P_{med}$  é a precipitação média na bacia (mm),  $P_i$  é a precipitação no posto  $i$  (mm),  $A_i$  é a área do respectivo polígono, dentro da bacia (km<sup>2</sup>),  $A$  é a área total da bacia (km<sup>2</sup>).

O cálculo da precipitação média foi realizado para série temporal estudada, em que, foi obtida a precipitação média horária no intervalo de 3h em 3h horas para cada ano estudado. Com isso, foi possível selecionar os eventos chuvosos. Para o estudo, o critério adotado foi a escolha de eventos ocorridos com duração de 6,9 e 12 horas como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Resumo das características dos eventos selecionados.**

<b>Evento</b>	<b>Duração (h)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Data e Hora do Início dos Eventos</b>
1	6	66,97	19/07/1998 04:30
2		98,81	11/06/2006 19:30
3		100,61	13/04/2018 04:30
4	9	68,13	16/06/1998 19:30
5		110,02	23/05/2006 para 24/05/2006 22:30:00
6		78,04	09/05/2018 07:30
7	12	77,87	09/07/1998 13:30
8		67,03	09/04/2006 01:30
9		67,65	11/04/2018 01:30

## 5.2 Descrição do modelo EBA4SUB

O modelo EBA4SUB foi desenvolvido por Grimaldi & Petroselli (2015) para determinar o hidrograma de projeto em bacias hidrográficas não avaliadas, além de permitir a estimativa da precipitação bruta e excessiva, vazão de pico e seu respectivo hidrograma atribuído a um período de retorno. A aplicação da metodologia empregada no modelo é recomendável para bacias hidrográficas menores que 500 km<sup>2</sup>, onde se considera uma precipitação espacialmente homogênea.

Os dados de entrada necessários para simulação no modelo são o evento de chuva, uso do solo, topografia (MDE) e propriedades do solo. As etapas descritas a seguir são (a) estimativa de chuva bruta, (b) determinação do excesso de chuva e (c) transformação chuva-vazão que consistem nos procedimentos necessários para obtenção da informação de saída utilizando o EBA4SUB.

Na etapa (a) o analista pode empregar dados de chuvas observados registrados em postos pluviométricos, bem como dados de precipitação com base hietógrafos sintéticos e suas respectivas curvas IDF (*Intensity-Duration-Frequency*). Considerando essas

afirmações, nesse estudo, aplicou-se as chuvas medidas em pluviômetros, bem como o hietógrafo de Chicago, onde as seguintes equações são empregadas para estimativa da chuva bruta.

$$\begin{aligned} i(t, T_r) &= a(T_r)n(T_r) \left( \frac{t_p - t}{r_c} \right)^{n-1} && \text{para } t \leq t_p \\ i(t, T_r) &= a(T_r)n(T_r) \left( \frac{t_p - t}{r_c} \right)^{n-1} && \text{para } t > t_p \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $i$  é a intensidade da precipitação (mm/h),  $t$  é o tempo (h),  $T_r$  é o período de retorno (anos),  $a$  e  $n$  são os coeficientes da IDF,  $t_p$  é o horário de pico e  $r_c$  é a razão entre o horário de pico e a duração das chuvas.

O tempo de concentração ( $T_c$ ), foi estimado a partir do MDE, aplicando a fórmula de Giandotti (1934). Recentes estudos de Grimaldi et al (2010, 2012b) sugeriram estimar o tempo de atraso ( $T_1$ ) da bacia assumindo que o analista só precisa vincular o tempo de concentração ( $T_c$ ) através da relação  $T_1 = 0,5T_c$ . Para esse estudo o tempo atraso especificado foi de 0,5.

Além disso, o fator de redução da área proposto por Leclerc & Schaake (1972), foi utilizado, transformando as informações de chuva espacialmente uniformes em toda a bacia por meio da equação:

$$ARF = \frac{AR}{PR} = 1 - e^{(-1.1 \cdot 1^{0.25})} + e^{(-1.1 \cdot 1^{0.25} - 0.0259 A)} \quad (4)$$

onde  $AR$  representa a precipitação acumulada na área (mm),  $PR$  é a precipitação acumulada no ponto (mm),  $t$  é a duração da precipitação (h) e  $A$  é a área da bacia (km<sup>2</sup>).

No módulo (b) o excesso de chuva é estimado a partir do hietógrafo bruto, usando o procedimento Curva Número para Green-Ampt (CN4GA) (GRIMALDI et al., 2013). Esse método consiste em duas etapas. A primeira usa o método empírico Curva Número (NRCS, 2008), para determinar o tempo de reflexão e o volume acumulado do excesso de chuva, observado na equação a seguir:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} && \text{se } P > I_a = \lambda S \\ P_e &= 0 && \text{se } P \leq I_a \end{aligned} \quad (5)$$

em que  $P_e$  é o excesso acumulado de chuva,  $P$  é a precipitação bruta acumulada,  $I_a$  é a abstração inicial,  $\lambda$  é a taxa de abstração inicial, no estudo considerou-se 0,2, como

empregado na formulação original e  $S$  é a retenção potencial relacionada apenas ao valor de CN.

Na segunda etapa do procedimento CN4GA, o excesso acumulado de chuva total fornecido pelo método SCS-CN como entrada para o esquema de infiltração com base física Green-Ampt é aplicado, promovendo assim a calibração dos parâmetros da equação automaticamente:

$$\begin{aligned} q_0(t) &= K_s \left( 1 + \frac{\Delta\theta\Delta H}{I(t)} \right) & \text{se } t > t_p \\ q_0(t) &= i(t) & \text{se } t < t_p \end{aligned} \quad (6)$$

onde  $q_0$  é a taxa de infiltração,  $i$  é a intensidade de precipitação bruta,  $I$  é a infiltração cumulativa,  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada,  $t_p$  é o tempo de reflexão,  $\Delta H$  é a diferença entre a altura de sucção na frente de molhamento em movimento e na superfície do solo e  $\Delta\theta$  é a diferença entre os conteúdos úmidos inicial e final do solo.

Dessa forma, o CN4GA permite que o excesso acumulado de chuva, estimada com o método SCS-CN, seja distribuída ao longo do tempo em uma resolução subdividida, de acordo com uma equação de infiltração com base física.

O módulo (c) realiza a transformação do excesso de precipitação em escoamento superficial por meio do WFIUH-1par (hidrograma de unidade instantânea baseado na função de largura monoparamétrica) (GRIMALDI; et al., 2012a). O WFIUH-1par é um modelo cinemático que estima a distribuição do tempo de todas as células do MDE até a saída, graças à determinação da velocidade do fluxo superficial:

$$WFIUH(t) = \frac{L_c(x)}{v_c(x)} + \frac{L_h(x)}{v_h(x)} \quad (7)$$

sendo  $L_c$  e  $L_h$  o caminho de drenagem na célula do canal e ao longo da célula de encosta, respectivamente, relacionados à célula  $x$  do MDE da bacia hidrográfica, e  $v_c$  e  $v_h$  os valores de velocidade que são assumidos no canal e na encosta.

Finalmente, o hidrograma de projeto é estimado executando a convolução integral entre WFIUH e excesso de precipitação determinado pelo método CN4GA:

$$q(t) = A \int_0^t WFIUH(t - \tau) * P_n(\tau) d\tau \quad (8)$$



sendo  $A$  a área de contribuição da bacia ( $\text{km}^2$ ),  $t$  a duração da precipitação (h),  $\tau$  o intervalo de tempo na duração da precipitação (h) e  $P_n(\tau)$ , o excesso de precipitação determinado pelo método CN4GA (mm).

### 5.3 Modelagem dinâmica espacial utilizando o LCM

O Land Change Modeler é um módulo disponibilizado no software IDRISI TerrSet desenvolvido pela *Clark Labs*, foi utilizado na avaliação da modelagem de mudanças no uso do solo. O modelo permitiu analisar as tendências na dinâmica de mudança do solo com base em dados históricos e principais vetores de mudanças, além de possibilitar a previsão de configurações espaciais e implicações ambientais para cenários futuros (EASTMAN, 2016).

As previsões para os cenários futuros de 2028 e 2038 foram realizadas em três etapas:

- i. Análises das mudanças: As mudanças são caracterizadas por transições de uma condição de cobertura do solo para outra;
- ii. Modelagem Potencial de Transição: Durante esse processo, é avaliado o potencial de mudança em todas as classes de uso do solo, e identificadas aquelas que apresentam transições mais relevantes, denominadas de potenciais. Estas classes são organizadas em um submodelo;
- iii. Previsão das mudanças: O modelo possibilita a realização de previsões de cenários futuros para uma data específica. Para isso, são utilizadas as taxas históricas correspondentes aos períodos  $t_1$  e  $t_2$  para análise das mudanças, com o auxílio do modelo de potencial de transição, visando a realização da predição dos cenários.

A metodologia utilizada para prever o uso e cobertura do solo para os períodos  $t_4$  (2028) e  $t_5$  (2038) no município de Pitimbu, com base no modelo LCM, consistiu em três processos distintos: previsão do potencial de transição, simulação e validação. O procedimento empregado nas três etapas foi baseado nos seguintes dados de entrada: (i) uso e ocupação do solo no período  $t_1$  (1998); (ii) uso e ocupação do solo no período  $t_2$  (2006); (iii) variáveis explanatórias; e (iv) uso e ocupação do solo no período  $t_3$  (2018), este último utilizado para validar a simulação para o período  $t_3$  (2018).

### 5.3.1 Previsão do potencial de transição

Durante a etapa de previsão do potencial de transição, foram executados os seguintes procedimentos: (i) análise da mudança do uso do solo; (ii) definição das transições; e (iii) teste e seleção das variáveis explanatórias. Em seguida, a seleção das variáveis explanatórias por meio do teste V de Cramer foi realizada, seguida da metodologia para a modelagem do potencial de transição em relação a t3 (2018) usando uma *Rede Neural Multi-Layer Perceptron* (RNMLP).

#### 5.3.1.1 Avaliação da mudança na cobertura do solo

A avaliação das mudanças na cobertura do solo com o uso do LCM foi conduzida utilizando mapas de uso e ocupação do solo em formato *raster* para t1 (1998) e t2 (2006). Esses mapas foram usados para gerar um gráfico de perdas e ganhos por categoria de uso e ocupação do solo, o que permitiu identificar as mudanças na área de cada classe de uso e ocupação do solo ao longo do tempo. Esse gráfico também ajudou a identificar a classe de cobertura do solo mais significativa para cada um dos tempos da análise. A análise das perdas e ganhos é uma ferramenta útil para a formulação de hipóteses sobre as mudanças e para a compreensão da dinâmica dessas mudanças de uso do solo na área de estudo.

#### 5.3.1.2 Identificação das transições entre as categorias de uso do solo

A partir da análise das mudanças observadas na cobertura e uso do solo nos anos t1 (1998), t2 (2006) e t3 (2018), foram identificadas as transições de interesse para compor o submodelo no LCM. As escolhas dessas transições foram baseadas na redução da área ocupada pela classe de cobertura mosaico de agricultura e pastagem para a expansão das áreas destinadas à formação florestal, infraestrutura urbana e cana-de-açúcar, bem como a transição da classe mosaico de culturas para mosaico de agricultura e pastagem. Desta forma, as transições selecionadas foram:

- (i) Mosaico de culturas para Mosaico de agricultura e pastagem
- (ii) Mosaico de agricultura e pastagem para Formação florestal
- (iii) Mosaico de agricultura e pastagem para Infraestrutura urbana
- (iv) Mosaico de agricultura e pastagem para Cana de açúcar

### 5.3.1.3 Teste e seleção das variáveis explanatórias

Uma vez definidas as transições de interesse, as variáveis explanatórias da mudança são testadas e selecionadas para a entrada e calibração do submodelo de transição potencial. Para selecionar as variáveis explanatórias da mudança, foi utilizado o teste V de Cramer, disponibilizado no LCM.

O teste estatístico V de Cramer é uma ferramenta não paramétrica que permite avaliar a força de associação entre duas variáveis, independentemente da sua distribuição (LIEBERTRAU, 1983; LUIZ, 2014). Na presente pesquisa, esse teste foi aplicado com o objetivo de medir a associação entre as variáveis explanatórias e as transições de interesse previamente definidas. A fórmula utilizada para calcular o V de Cramer foi a Equação (9):

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{n(q-1)}} \quad (9)$$

Em que:  $V$  = índice V de Cramer;  $X^2$  = o coeficiente Chi-quadrado  $((O - E)^2 / E)$ ;  $O$  = frequência observada para uma categoria;  $E$  = frequência esperada na categoria correspondente;  $n$  = o tamanho da amostra e  $q$  = o menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura da terra.

De acordo com Eastman (2016), um valor elevado de Cramer indica uma forte associação entre a variável explanatória e a transição, indicando um potencial explicativo satisfatório. No entanto, isso não garante um desempenho ideal do modelo. Ainda assim, é um indicador positivo de que a variável pode ser útil para explicar as transições. Portanto, as variáveis explanatórias que apresentam valores de V de Cramer acima de 0,15 indicam uma forte relação, o que sugere que a variável deve ser incluída como explanatória no submodelo de transição potencial.

As variáveis explanatórias (i) distância de cursos d'água, (ii) distância da área urbana, (iii) distância de áreas florestadas, (iv) distância de culturas diversas, (v) distância de cana-de-açúcar, (vi) distância de cursos d'água (vii) declividade e (viii) altitude foram testadas com base nas mudanças observadas no uso e cobertura do solo na área de estudo.

Para esse propósito, utilizou-se o comando Distance no software IDRISI TerrSet, gerando uma nova imagem na qual o valor armazenado em cada célula representa a menor distância entre ela e a feição mais próxima. Esse procedimento foi realizado para todas as variáveis explanatórias de distância utilizadas na pesquisa. As variáveis de declividade e

altitude foram adquiridas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 m, obtido junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As variáveis explanatórias nem sempre apresentam relações lineares, porém a sua transformação pode facilitar a resolução do modelo LCM em alguns casos. Dessa forma, a transformação logarítmica natural é frequentemente utilizada para linearizar variáveis de decaimento de distância, como foi aplicada às variáveis utilizadas neste estudo.

#### *5.3.1.4 Modelagem de transição potencial por meio do método de Redes Neurais Multi Layer Perceptron (RNMLP).*

A modelagem do potencial de transição utilizando RMNLP refere-se ao uso de uma Rede Neural Multi-Layer Perceptron, a qual é uma técnica de modelagem baseada em redes neurais artificiais que estabelece conexões múltiplas entre as variáveis e as camadas de entrada do modelo, utilizando uma rede de neurônios artificiais. Essas redes neurais de múltiplas camadas diferem-se das redes neurais simples pelo número de camadas intermediárias entre as camadas de entrada e saída, conforme descrito por Haykin (2001).

O modelo LCM foi implementado com a técnica RNMLP, que inicialmente emprega todas as variáveis no modo automático. Em um segundo momento, até nove transições de previsão podem ser especificadas. Portanto, todas as transições observadas e descritas na seção 5.4.1.2 foram consideradas na modelagem. A configuração padrão recomendada foi utilizada neste estudo, em que o número máximo de iterações é fixado em 10.000 e a taxa de acurácia deve ser superior a 80%, já que a curva de erro tende a diminuir sob essas condições.

Para alcançar o valor de acurácia desejado, é fundamental que haja uma boa relação entre a iteração das variáveis explanatórias e as transições consideradas. Por isso, foram realizados diversos testes para obter uma acurácia maior do que a previamente estabelecida. Se ocorrerem oscilações significativas no erro expresso em RMS após as primeiras 100 iterações, o processo deve ser reiniciado. Após o término do processamento, um relatório foi gerado com informações sobre as variáveis utilizadas.

### 5.3.2 Simulação e Validação

#### 5.3.2.1 Cadeias de Markov

Mediante a aplicação do modelo de potencial de transição, foi definido o período t3 (2018), no qual a simulação de uso do solo foi realizada. Neste sentido, a probabilidade de mudança foi estabelecida utilizando a Cadeia de Markov (CM), que está incorporada na modelagem do LCM.

O LCM emprega a técnica de Cadeias de Markov para prever a matriz de transição de mudança na cobertura do solo (EASTMAN, 2016). Nesse sentido, a CM no LCM foi definida por meio da probabilidade de mudança na cobertura do solo de um período para outro, utilizando a construção da matriz de probabilidade de transições.

A matriz de tabulação cruzada foi utilizada para avaliar as mudanças entre dois mapas, apresentando as categorias no tempo t1 nas linhas e as categorias no tempo t2 nas colunas.

#### 5.3.2.2 Validação da simulação de mudanças no uso e ocupação do solo.

Em seguida à obtenção da matriz de transição por meio da Cadeia de Markov, foi gerado o mapa simulado de uso e ocupação do solo para o período t3 (2018). Posteriormente, procedeu-se à validação do modelo LCM por meio da técnica RNMLP, utilizando o mapa simulado.

No presente contexto, a validação é definida como um método para avaliar a concordância entre duas imagens, sendo uma delas um mapa observado ou de "referência", e outra gerada ou "simulada", para o período de tempo t3. Esse processo de validação tem como objetivo responder a duas questões fundamentais: (1) como os mapas concordam em termos de quantidade de áreas; e (2) como as classes em estudo estão distribuídas geograficamente no mapa simulado em relação ao mapa de referência.

O coeficiente Kappa, também denominado índice Kappa ou coeficiente de concordância de Kappa, é uma medida estatística amplamente empregada para avaliar a concordância entre dois observadores independentes ou entre dois conjuntos de dados categóricos.

O índice Kappa assume valores em uma escala que varia de -1 a 1, sendo que diferentes valores representam diferentes graus de concordância:

Kappa = 1: Representa uma concordância perfeita entre os observadores ou sistemas.

Kappa > 0.8: Indica uma concordância substancial.

0.6 < Kappa < 0.8: Sugere uma concordância moderada.

0.4 < Kappa < 0.6: Reflete uma concordância fraca.

Kappa < 0.4: Denota uma concordância pobre ou insignificante.

Kappa = 0: Representa uma concordância que é equivalente ao que seria esperado ao acaso.

A fórmula geral para o cálculo do índice Kappa é expressa da seguinte maneira:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (10)$$

Onde:  $P_0$  = proporção observada;  $P_e$  = proporção preparada.

É importante notar que o índice Kappa é uma métrica relevante, pois incorpora a noção de concordância aleatória, proporcionando, assim, uma avaliação mais precisa da concordância entre observadores ou sistemas do que a mera percentagem de concordância bruta.

O teste de concordância Kappa, também conhecido como coeficiente Kappa, foi desenvolvido por Jacob Cohen em 1960 com o propósito de mensurar o grau de concordância entre proporções de amostras dependentes (FLEISS, 1981). Este índice é utilizado para avaliar a precisão e confiabilidade do mapa simulado em relação ao mapa de referência. O valor do Kappa pode variar de 0 a 1, sendo que um valor de 1 indica uma concordância perfeita entre os dois mapas (KOTZ e JOHNSON, 1983).

A validação do LCM foi conduzida utilizando o módulo Validate do IDRISI TerrSet, que permite a análise de estatísticas mais detalhadas do que apenas o índice Kappa, considerando diferentes variações de concordância e discordância na quantidade e alocação incorreta de categorias. O resultado final da validação apresenta a precisão da simulação dos mapas. O módulo fornece índices adicionais, como o Kno, que avalia a precisão geral da simulação, o Kstandard, que avalia a simulação em relação a uma classificação perfeita, o Klocation, que avalia a capacidade da simulação em especificar a localização, e o KlocationStrata, que indica a precisão da localização das células da grade dentro dos estratos.

Além disso, essas estatísticas fornecem informações sobre o grau de concordância entre o mapa gerado e o mapa de referência, identificando as áreas de acordo e desacordo

entre as duas imagens por meio dos seguintes componentes: concordância aleatória; concordância em termos de quantidade; concordância em termos de localização estratificada; concordância em termos de localização da célula da grade; desacordo em termos de localização da célula da grade; desacordo em termos de localização estratificada; desacordo em termos de quantidade.

#### *5.3.2.3 Simulação do uso e ocupação do solo para t4 (2028) e t5 (2038)*

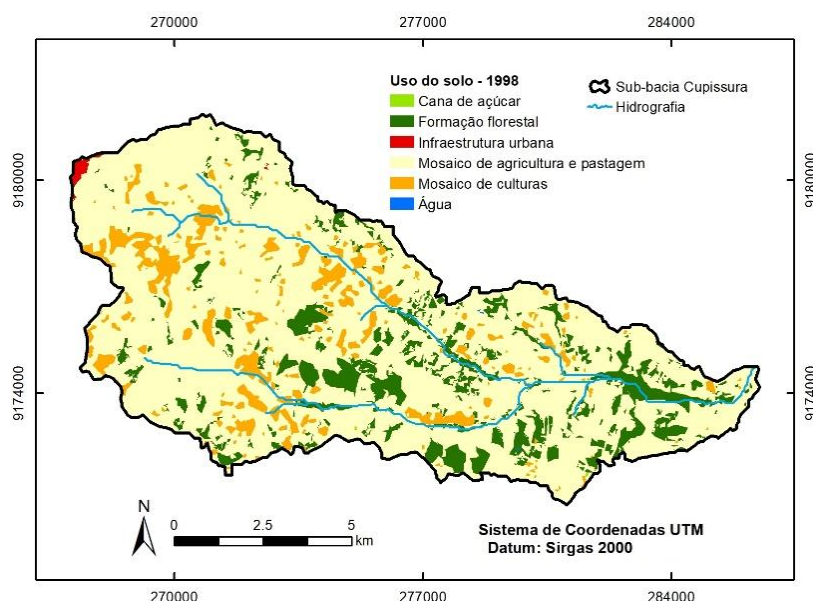
A simulação da cobertura do solo para os períodos de t4 (2028) e t5 (2038) foi realizada mediante a previsão do potencial de transição, bem como a predição e validação para o período de t3 (2018). Destarte, ambos os cenários foram simulados pelo método LCM baseados nas tendências identificadas na área de estudo durante os períodos de t1 (1998), t2 (2006) e t3 (2018).

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Mudanças no uso e ocupação do solo para os anos de 1998, 2006 e 2018**

Os usos do solo para a sub-bacia do Rio Cupissura foram identificados após a classificação supervisionada e representados nos mapas para cada período analisado. Para o ano de 1998, como mostrado na Figura 6, observa-se em sua espacialização que a classe mosaico de agricultura e pastagem ocupa maior parte da sub-bacia com 78,27%, além das classes área mosaico de culturas (9,23%) formação florestal (12,20%) e cana-de-açúcar (0,01%), como mostrado na Tabela 3. A classe infraestrutura urbana apenas ocupava 0,31 km<sup>2</sup>, ocorrendo numa pequena porção ao oeste da área de estudo.

**Figura 6 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 1998.**

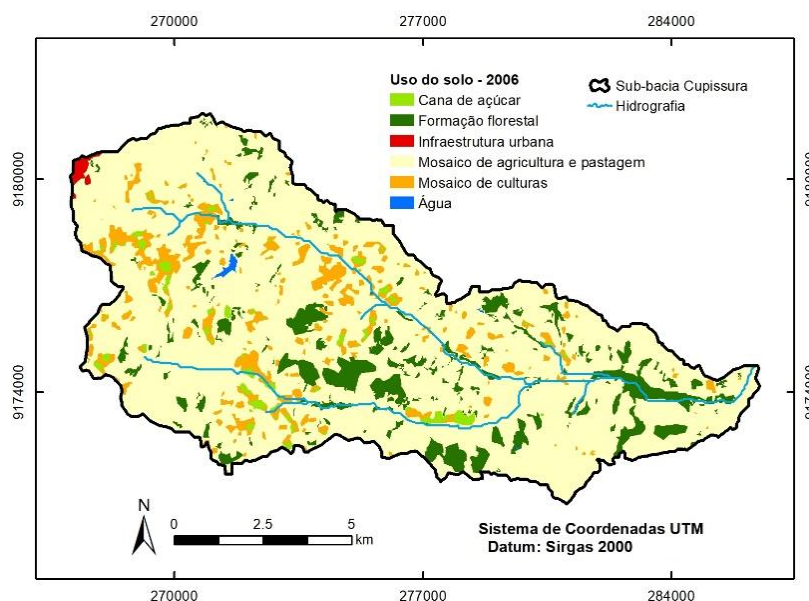


A Figura 7 apresenta o mapa obtido para o ano de 2006, os valores de áreas e percentuais encontram-se na Tabela 3. Nesse período, a classe de mosaico de agricultura e pastagem seguiu como o tema de uso com maior percentual de área na sub-bacia, 80,60%. Durante esse período, a classe mosaico de culturas apresentou uma redução para o percentual de 7,68%, o uso formação florestal representou 9,60% do total, enquanto a classe cana-de-açúcar correspondeu a apenas 1,65%.

Além disso, constatou-se que a classe de formação florestal, apresentou redução partindo de 13,40 km<sup>2</sup> em 1998, para 10,55 km<sup>2</sup> em 2006. Essa diminuição é constatada em decorrência da expansão e, sobretudo da intensificação da atividade de cana-de-açúcar e de agricultura e pastagem ao decorrer de toda sub-bacia. Ainda nesse ano, uma pequena região de corpo hídrico é identificada e representa apenas 0,15% da área total estudada. A infraestrutura urbana segue com um crescimento gradativo passando de 0,31 km<sup>2</sup> em 1998, para 0,36 km<sup>2</sup> em 2006.

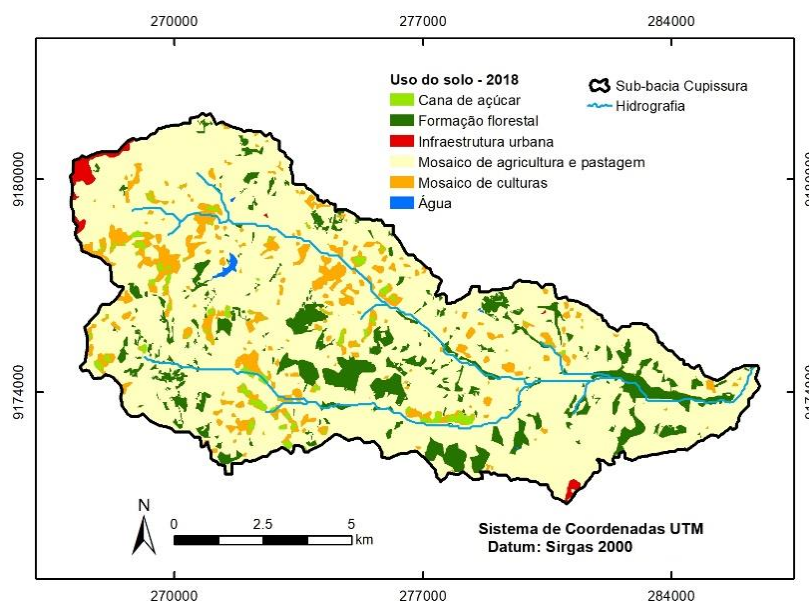


**Figura 7 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 2006.**



Na Figura 8 é apresentado o mapa temático do uso do solo para o ano de 2018, onde nesse período a formação florestal apresentou uma área total de 11,59 km<sup>2</sup>, isto é, uma redução de área ocupada de aproximadamente 13,50%, comparado ao ano de 1998. Verificou-se ainda para o ano de 2018 que as áreas das classes de agricultura e pastagem e cana-de-açúcar, foram respectivamente 86,97 km<sup>2</sup> e 1,78 km<sup>2</sup>.

**Figura 8 - Mapa de uso do solo da sub-bacia do Rio Cupissura para o ano de 2006.**



Dessa forma, os usos do solo na sub-bacia do Rio Cupissura foram analisados em diferentes períodos e representados em mapas. O mapa referente a 1998 demonstrou que a

classe de mosaico de agricultura e pastagem ocupava a maior parte da sub-bacia, seguida pela formação florestal e mosaico de culturas. É importante salientar que a infraestrutura urbana também teve aumento gradativo ao longo dos anos.

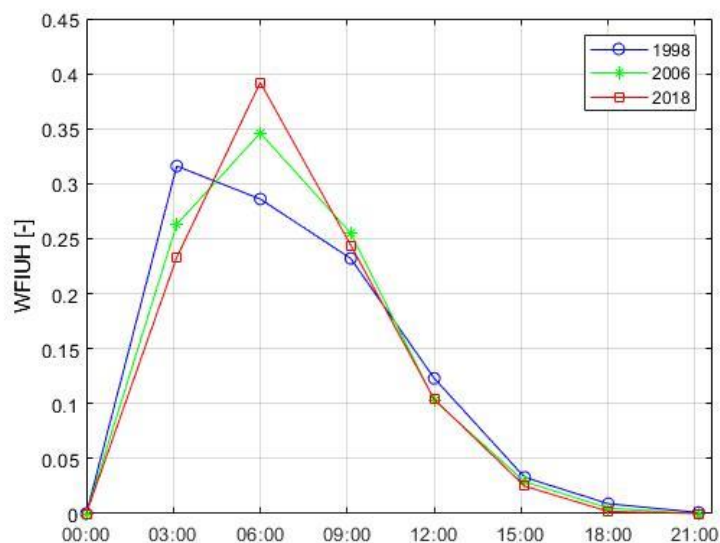
**Tabela 3 - Áreas das classes de uso e ocupação do solo para 1998, 2006 e 2018 na sub-bacia**

Uso do solo	1998		2006		2018	
	Área (km <sup>2</sup> )	Percentual (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Percentual (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Percentual (%)
Formação Florestal	13.40	12.2	10.55	9.60	11.59	10.55
Mosaico de Agricultura e Pastagem	86.03	78.2	88.59	80.60	86.97	79.13
Mosaico de Culturas	10.14	9.23	8.44	7.68	8.507	7.74
Água	0.011	0.01	0.162	0.15	0.185	0.17
Cana-de-açúcar	0.012	0.01	1.809	1.65	1.783	1.62
Infraestrutura Urbana	0.312	0.28	0.365	0.33	0.862	0.78
Total	109.9	0.0	109.9	100.0	109.9	100.0

## 6.2 Aplicação do modelo EBA4SUB

A Figura 9 caracteriza a forma do hidrograma por meio da metodologia WFIUH. Cada informação descrita no gráfico fornece um hidrograma de projeto caracterizado por um pico de descarga, que é determinado por uma combinação de tempo de concentração (Tc), CN e tipo de hidrograma sintético escolhido em relação ao período de uso do solo estudado, fornecendo um hidrograma de projeto caracterizado por um pico de descarga. Para a sub-bacia do Rio Cupissura, observa-se que o ano de 2018 é o que apresenta maior valor em relação a sua WFIUH e o maior valor de CN, ocasionando um aumento do Tc e causando maior profundidade acumulada das chuvas. No entanto, pode ocorrer com esse aumento um pico mais baixo na WFIUH, portanto as descargas de pico diminuem.

**Figura 9 - Função hidrográfica da unidade instantânea de largura (WFIUH) para os anos estudados.**

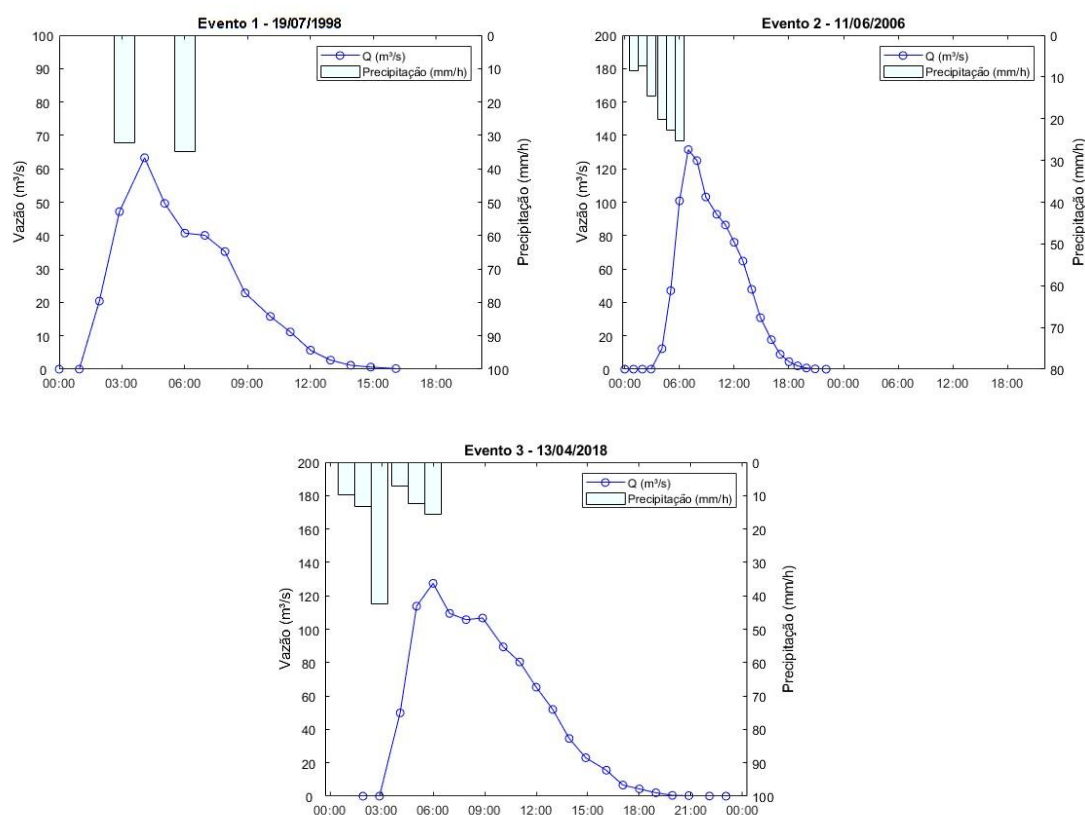


Os eventos de chuva-vazão para as escalas horárias estudadas mostrados nas Figuras 10, 11 e 12, apresentam comportamentos diferentes, porém com variação de precipitação bruta acumulada ( $P$ ) entre 63,33 a 104,04 mm e excesso de chuva acumulada ( $P_e$ ) na faixa de 0,003 a 70,80 mm. As descargas de pico para os eventos apontam valores moderados (61,98 m<sup>3</sup>/s) a valores altos (146,76 m<sup>3</sup>/s).

Para os eventos em escala horária de 6 horas em todos os períodos de uso do solo constatou-se que os hidrogramas simulados são aproximadamente semelhantes em relação a sua forma, muito embora as distinções existam, a exemplo das vazões de pico obtidas. Essas diferenças são associadas a vários fatores, como o procedimento de estimativa de excesso de chuva ou a resposta da bacia aos tipos de  $CN$  para cada uso do solo, que nesse estudo foi de 63,30 m<sup>3</sup>/s, 131,47 m<sup>3</sup>/s e 127,46 m<sup>3</sup>/s para os respectivos anos de 1998, 2006 e 2018.

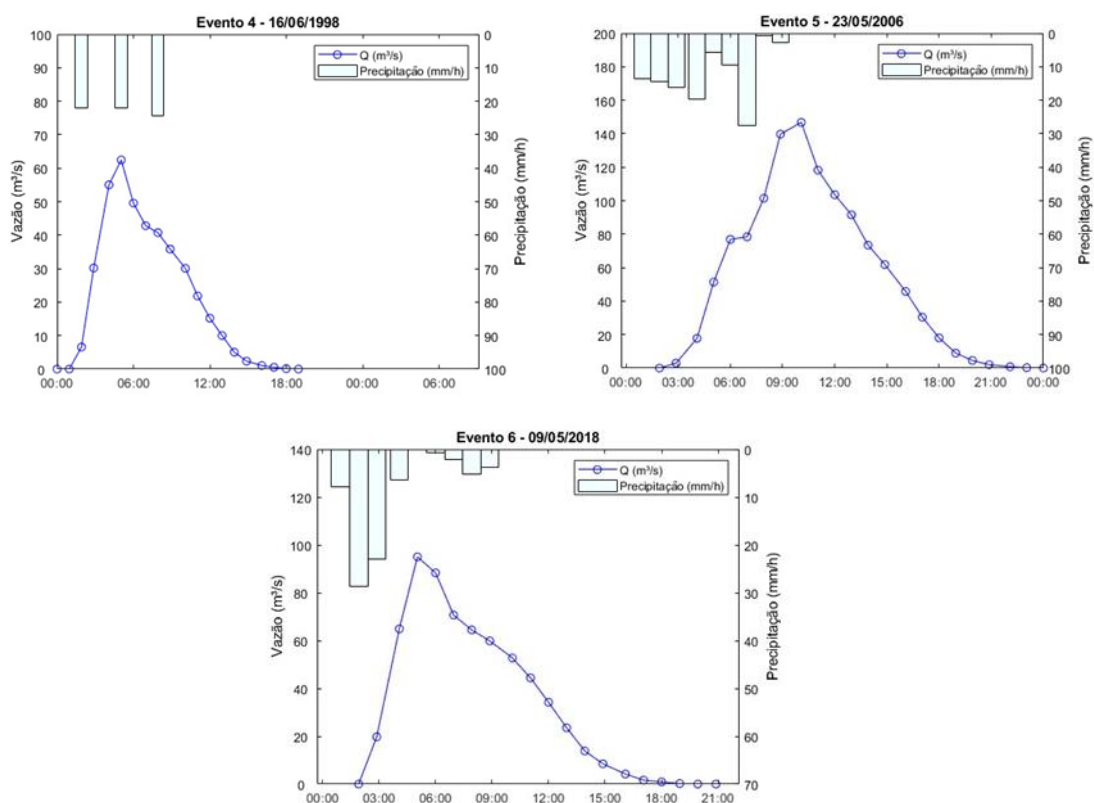
Em relação aos eventos com duração de 9 horas observou-se que a simulação realizada para o evento 5 ocorrido no ano de 2006, foi o que apresentou maior volume de escoamento superficial, além da maior vazão de pico. Evidencia-se ainda que para essa faixa horária, os três eventos simulados mostraram valores distintos para suas vazões de pico quando comparados a simulação dos eventos com 6h de duração e que apenas o evento do ano de 1998 apresenta decréscimo em seu escoamento superficial.

**Figura 10 - Precipitação bruta observada e vazão modelada no EBA4SUB para os eventos com duração de 6h.**

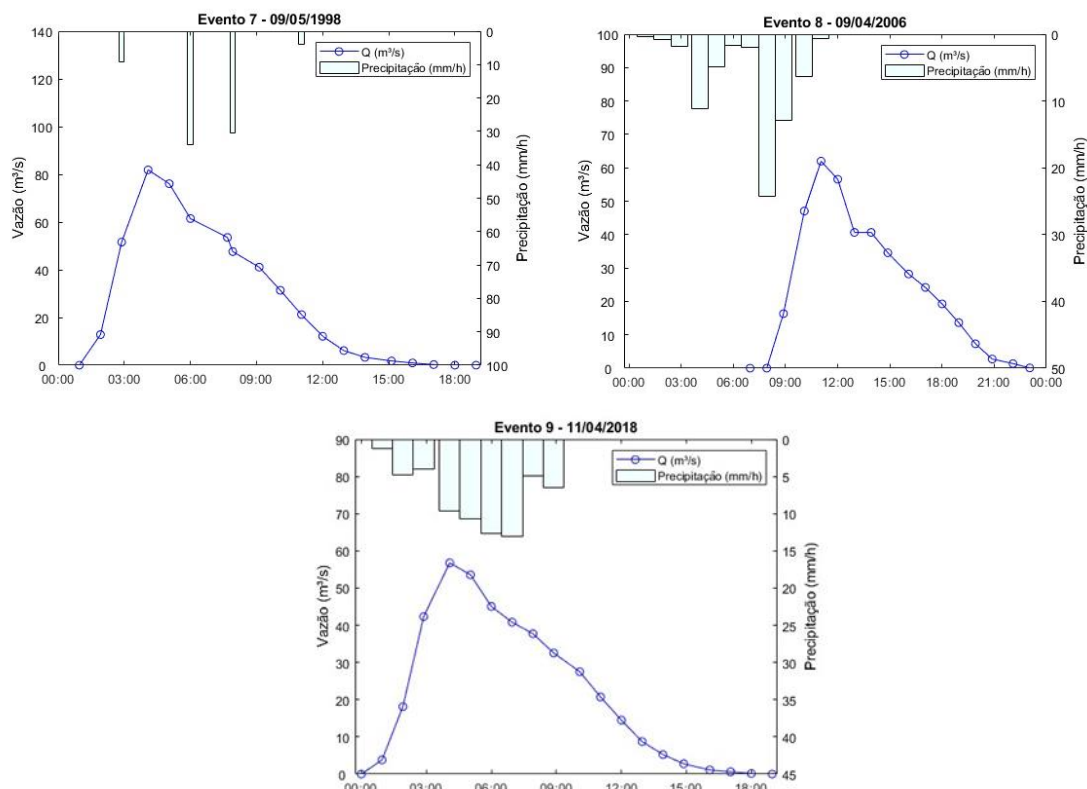


Os hidrogramas modelados a partir dos eventos de precipitação com duração de 12h visualmente são semelhantes quando comparados a vazão simulada nos eventos de 6 e 9 horas apresentados anteriormente. Entretanto, as vazões observadas para essa duração (Figura 11), apontam um volume de escoamento menor para os anos de 2006 (61,98  $\text{m}^3/\text{s}$ ) e 2018 (56,77  $\text{m}^3/\text{s}$ ) com a maior vazão sendo para o ano de 1998 (81,84  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Essas diferenças em relação às vazões das durações anteriores podem ser atribuídas a vários fatores, como o procedimento de estimativa de excesso de chuva ou a resposta cinemática da bacia à chuva, que é afetada por as velocidades de fluxo de superfície estimadas por cada pixel DEM.

**Figura 11 - Precipitação bruta observada e vazão modelada no EBA4SUB para os eventos com duração de 9h.**

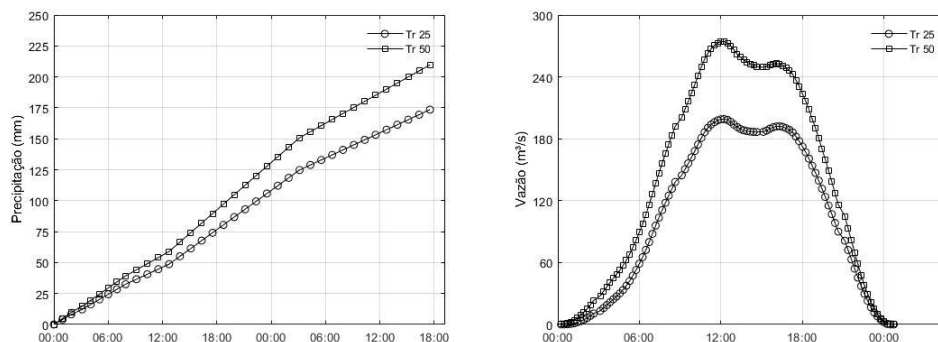


**Figura 12 - Precipitação bruta observada e vazão modelada no EBA4SUB para os eventos com duração de 12h.**



Os resultados da modelagem hidrológica para os períodos de retorno estudados por meio da curva IDF são observados na Figura 13. No que diz respeito as chuvas, observa-se as curvas e sua relação entre a duração da chuva, a profundidade cumulativa da chuva e o período de retorno. Como resposta a modelagem, o hidrograma de projeto obtido é caracterizado por uma vazão de pico, onde para  $T_r$  25 anos a vazão foi 199,08 m<sup>3</sup>/s e para  $T_r$  50 anos a descarga foi de 274,22 m<sup>3</sup>/s, apresentando assim uma considerável variação para as vazões máximas de projeto. Essa variação por sua vez apresenta influência nas áreas e volumes alagados na sub-bacia.

**Figura 12 - Precipitação bruta acumulada e vazão modeladas a partir da curva IDF para  $T_r$  25 e 50 anos.**

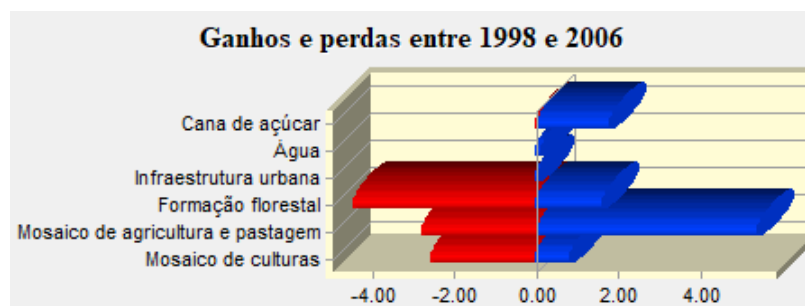


### 6.3 Modelagem dos cenários futuros de uso e ocupação do solo

#### 6.3.1 Análise das alterações no uso e ocupação do solo em t1 (1998) e t2 (2006) usando o LCM

Durante a modelagem do uso do solo com o auxílio do LCM, buscou-se identificar as mudanças mais relevantes e considerar a matriz de usos existente. Para tanto, foram comparados os mapas correspondentes aos períodos t1 (1998) e t2 (2006), o que permitiu gerar a Figura 14, referente as perdas e ganhos para cada classe de uso do solo.

**Figura 13 - Ganho e perda em quilômetros (km<sup>2</sup>) por categoria de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Rio Cissura.**



Foi constatado que houve perdas mais significativas de áreas ocupadas nas classes formação florestal e mosaico de agricultura e pastagem, enquanto os maiores ganhos de área ocupada foram observados na classe mosaico de agricultura e pastagem e infraestrutura urbana.

### 6.3.2 Variáveis explanatórias selecionadas após o teste V de Cramer

Os resultados dos testes do coeficiente V de Cramer para as variáveis explanatórias selecionadas estão apresentados na Tabela 4. Foram escolhidas as variáveis com valores acima de 0,15.

Conforme os resultados, as variáveis altitude, declividade e distância de água apresentaram valores de V de Cramer iguais a 0,8824, enquanto a distância da infraestrutura urbana obteve um valor de 0,6764. Por outro lado, a distância de formação florestal obteve um valor de 0,7118, a distância de mosaico de culturas apresentou um valor de 0,6000 e a distância de cana-de-açúcar apresentou um valor de 0,6765.

**Tabela 4 - Variáveis explanatórias e o resultado do teste V de Cramer**

<b>Variável explanatória</b>	<b>Transformação</b>	<b>Resultados do Teste V de Cramer</b>
Altitude	Natural log	0,8824
Declividade	Natural log	0,8824
Distância de água	Natural log	0,8824
Distância da infraestrutura urbana	Natural log	0,6764
Distância de formação florestal	Natural log	0,7118
Distância de mosaico de culturas	Natural log	0,6000
Distância de cana-de-açúcar	Natural log	0,6765

Esses resultados sugerem que variáveis topográficas, como altitude e declividade, e a proximidade de cursos d'água são fatores importantes que afetam as mudanças no uso do solo em questão. Por outro lado, a distância da infraestrutura urbana, formação florestal e cana-de-açúcar também tiveram uma influência significativa nas mudanças observadas. Já a

distância da mosaico de agriculturas apresentou uma correlação fraca e, portanto, pode ter tido menos influência nas mudanças no uso do solo do que outras variáveis.

Após a previsão do potencial de transição utilizando a Rede Neural Multi-Layer Perceptron (RNMLP), foram implementados submodelos de transição para dar continuidade ao processo de simulação. Diversos testes foram realizados para avaliar as interações entre as variáveis explanatórias selecionadas, e o melhor resultado obtido apresentou uma acurácia de 90,20%, com 10.000 iterações. Essa alta precisão tornou possível a realização de previsões da quantidade de mudanças esperadas em 2018.

### *6.3.3 Matriz de probabilidade de transição para t1 (1998) e t2 (2006)*

Os resultados da Cadeia de Markov obtidos a partir do modelo LCM revelam os coeficientes de transição de cada classe de uso do solo para si mesma ao longo do tempo. Observou-se que a transição de mosaico de Culturas para si mesma possui um coeficiente de 0,6202, o que indica que essa classe de uso do solo apresenta um nível moderado de estabilidade ao longo do tempo. Já a transição de mosaico de agriculturas e pastagem para si mesma apresenta um coeficiente de 0,9519, o que indica um alto nível de estabilidade dessa classe de uso do solo.

Por outro lado, a transição de formação florestal para si mesma apresenta um coeficiente de 0,5209, o que sugere uma baixa estabilidade dessa classe de uso do solo ao longo do tempo. A transição de Infraestrutura urbana para si mesma, por sua vez, apresentou um coeficiente de 0,9139, indicando um alto nível de estabilidade.

A classe de uso do solo Água apresentou um coeficiente de transição de 1,0000, o que indica que a classe permaneceu estável ao longo do tempo, sem qualquer mudança significativa. Por fim, a transição de Cana de açúcar para si mesma obteve um coeficiente de 0,0007, indicando que essa classe apresentou uma baixa estabilidade, com alta probabilidade de mudança para outras classes de uso do solo.

A dinâmica do uso do solo na área estudada é importante para a compreensão área, pois permite identificar as classes de uso do solo mais e menos estáveis ao longo do tempo, o que pode ser útil para o planejamento e gestão de recursos naturais e do território.

Além disso, foram identificadas transições significativas na mudança do uso e cobertura da terra no estudo. Dentre as transições mais relevantes, destacam-se a mudança de mosaico de culturas para cana-de-açúcar, com um coeficiente de transição de 0,1383,



indicando que uma pequena proporção do mosaico de culturas foi convertida em cana-de-açúcar durante o período avaliado.

Por outro lado, a transição de cana-de-açúcar para mosaico de culturas apresentou um coeficiente de transição de 0,9784, indicando que a maior parte da área de cana-de-açúcar foi convertida em mosaico de culturas. Além disso, a transição de formação florestal para mosaico de Culturas apresentou um coeficiente de transição de 0,4744, evidenciando que uma proporção significativa da formação florestal foi convertida em mosaico de culturas durante o período estudado.

**Tabela 5- Matriz de transição do uso e ocupação do solo entre 1998 e 2006 com os percentuais de mudança e persistência**

	<b>Mosaico de culturas</b>	<b>Mosaico de agricultura e pastagem</b>	<b>Formação florestal</b>	<b>Infraestrutura urbana</b>	<b>Água</b>	<b>Cana-de-açúcar</b>
<b>Mosaico de culturas</b>	0.6202	0.2401	0.0013	0.0000	0.0001	0.1383
<b>Mosaico de agricultura e pastagem</b>	0.0144	0.9519	0.0274	0.0012	0.0028	0.0022
<b>Formação florestal</b>	0.0036	0.4744	0.5209	0.0001	0.0004	0.0005
<b>Infraestrutura urbana</b>	0.0003	0.0851	0.0006	0.9139	0.0000	0.0000
<b>Água</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
<b>Cana-de-açúcar</b>	0.0065	0.9784	0.0129	0.0005	0.0011	0.0007

#### *6.3.4 Validação da simulação do uso e ocupação do solo em 2018 utilizando o modelo LCM*

Verificou-se que a estimativa do uso do solo por meio da RNMLP apresentou resultados satisfatórios, com destaque para os valores obtidos no teste V de Cramer (0,7248) e no coeficiente Kappa geral (0,7866), indicando uma boa associação entre os mapas para o uso e ocupação do solo de 2018 referente ao mapa observado e simulado. Tais resultados confirmam a representatividade do modelo utilizado na simulação do uso e ocupação do

solo, evidenciando sua eficácia na reprodução das características espaciais da área em estudo.

A Figura 15 apresenta os índices calculados pelo Kappa e as estatísticas correspondentes, além de um relatório com informações quantitativas.

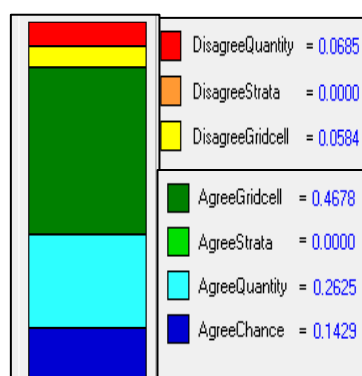
Com base nas informações descritas anteriormente, foi reafirmado por meio da análise estatística que o mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2018, gerado a partir do modelo proposto, está em conformidade com o mapa de referência. Os índices Kappa obtidos foram superiores a 0,7866, indicando uma representação boa de acordo com os critérios estabelecidos por Kotz e Johnson (1983).

**Tabela 6 - Índice Kappa de concordância (KIA) para todas as classes, utilizando 2018 simulado e observado**

Classes	KIA
Mosaico de culturas	0,8925
Mosaico de agricultura e pastagem	0,8981
Formação florestal	0,8325
Infraestrutura urbana	0,8142
Água	0,0639
Cana-de-açúcar	0,0001

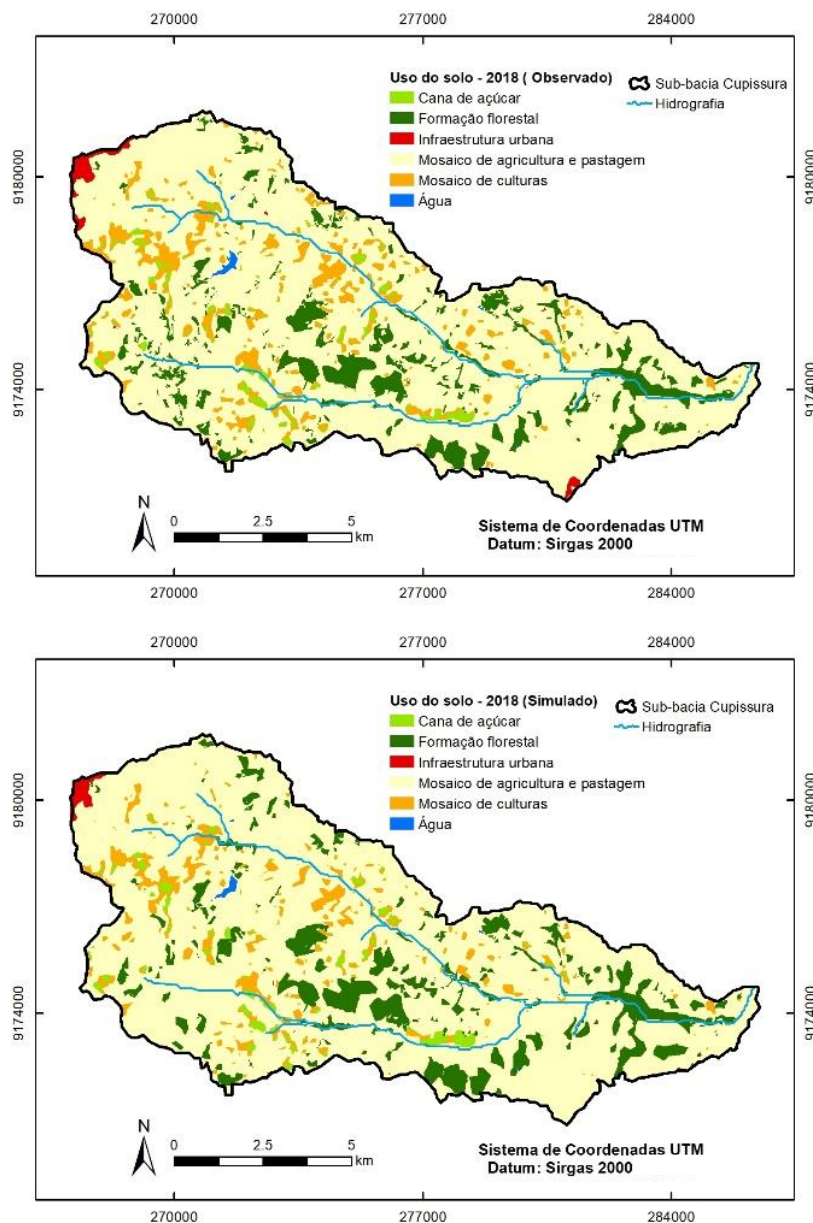
Ao especificar a concordância e discordância na área de estudo, foram obtidos os seguintes resultados: uma concordância de 14,29% devido ao acaso, 26,25% devido à quantidade, e 46,78% no nível da célula da grade. Além disso, o desacordo no nível da célula da grade foi de 0,0584%, e o desacordo de quantidade foi menor que 1%.

**Figura 14 - Informações quantitativas de concordância e discordância entre as duas imagens**



De acordo com resultados obtidos, a validação do mapa projetado é aceitável, uma vez que a quantidade de células da grade no mapa simulado é distribuída com percentagens similares entre as categorias e a classificação percentual é adequada. A Figura 16 apresenta os mapas de 2018, observado (referência) e simulado (projetado), com suas respectivas classes de uso e ocupação do solo.

**Figura 15 - Mapas do uso e ocupação do solo em 2018 partir da imagem de satélite observado e simulado pelo modelo LCM**



**Tabela 7 - Áreas das classes de uso de ocupação do solo para 2018 observado e simulado.**

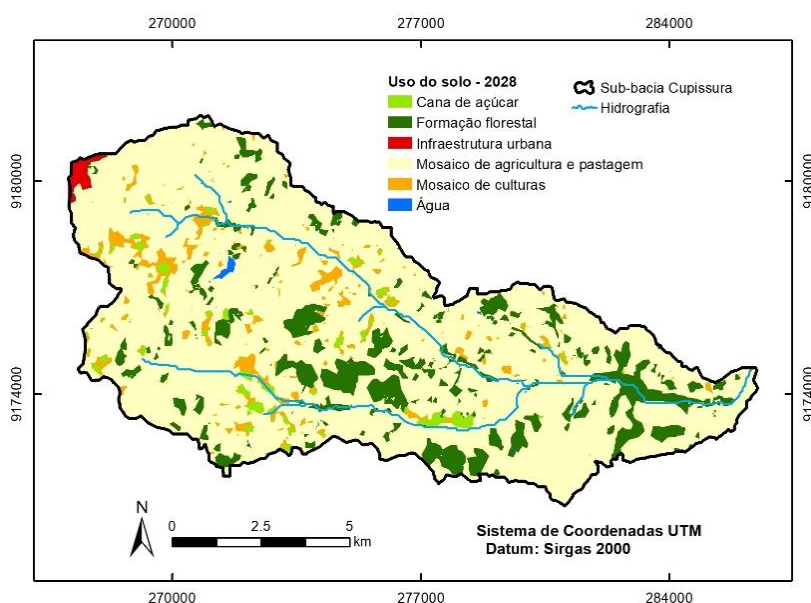
Uso do solo	2018 observado		2018 simulado	
	Área (km <sup>2</sup> )	Percentual (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Percentual (%)
Formação Florestal	11.59	10.55	12.75	11.61
Mosaico de Agricultura e Pastagem	86.97	79.13	88.01	80.08
Mosaico de Culturas	8.50	7.74	6.53	5.95
Água	0.185	0.17	0.157	0.14
Cana-de-açúcar	1.783	1.62	1.928	1.75
Infraestrutura Urbana	0.862	0.78	0.501	0.46
	109.9	100	109.9	100

### 6.3.5 Cenários de uso e ocupação do solo simulados

#### 6.3.5.1 Uso e ocupação do solo simulado para t4 (2028)

A classe com maior percentual de ocupação foi mosaico de agricultura e pastagem, com um valor de 88,71%. Esse resultado pode estar relacionado à atividade econômica predominante na região, que pode estar voltada para a produção agropecuária. Em seguida, temos a formação florestal, com um percentual de 13,75 %, indicando que ainda existe uma área considerável de cobertura florestal na região.

**Figura 16 - Mapa de uso e ocupação do solo simulado para t4 (2028).**



A classe mosaico de culturas apresentou um valor de 4,64%, representando uma área de uso diversificado, com a presença de diferentes culturas agrícolas. A classe de água apresentou uma porcentagem de 0,15%, sugerindo que a região possui poucas regiões com visíveis na classificação utilizada.

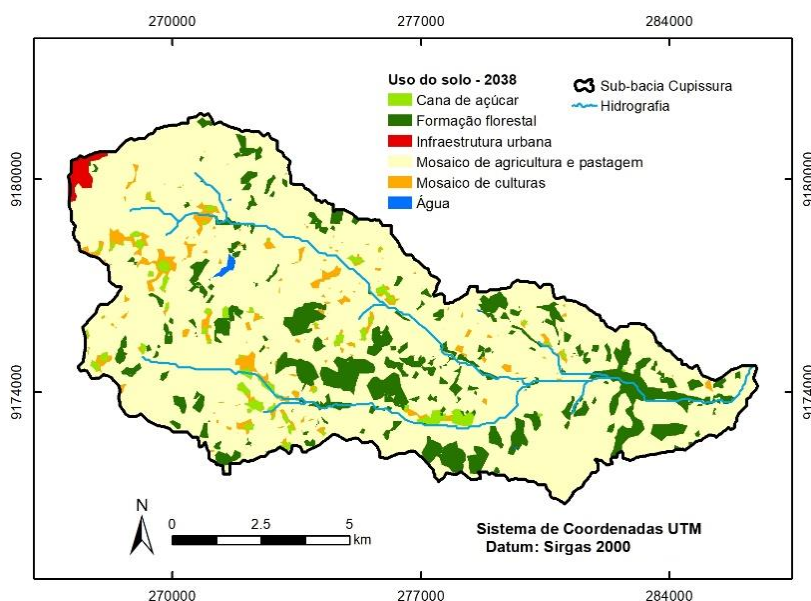
A classe de cana-de-açúcar apresentou um percentual de 2,06, indicando uma presença significativa dessa cultura agrícola na região. Por fim, a classe de infraestrutura urbana apresentou um valor de 0,57%, sugerindo que a área possui uma baixa densidade populacional e poucos empreendimentos urbanos.

#### 6.3.5.2 Uso e ocupação do solo simulado para t5 (2038)

Os resultados obtidos para as áreas de uso e ocupação do solo indicam a predominância da atividade agropecuária na região em questão, com destaque para o mosaico de agricultura e pastagem que ocupa 89,237% da área estudada. A formação florestal corresponde a 14,317% da área, seguida pelo cultivo de cana de açúcar com 2,171%. A área destinada à infraestrutura urbana representa apenas 0,645%. A presença de água na região é relativamente baixa, correspondendo a somente 0,156% da área total.

Destaca-se que a predominância da atividade agropecuária pode acarretar impactos ambientais significativos, tais como a perda da biodiversidade e a degradação dos solos. A presença de áreas de formação florestal pode ser considerada positiva, uma vez que essas áreas podem ser importantes para a manutenção da qualidade do solo e dos recursos hídricos.

**Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo simulado para t5 (2038).**



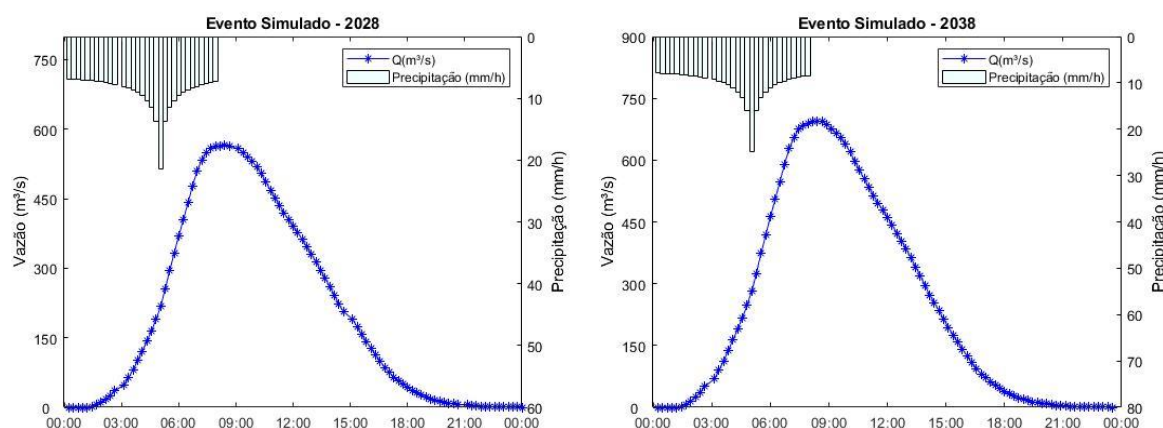
Comparando as áreas de uso e ocupação do solo entre os dois períodos, observa-se um aumento percentual na área de formação florestal (4,1%), mosaico de culturas (26,9%) e na cana-de-açúcar (5,0%) para o ano de 2038 em relação a 2028. Por outro lado, houve uma diminuição percentual na área de mosaico de agricultura e pastagem (0,6%) e infraestrutura urbana (10,4%) em 2038 em relação a 2028. Já a área de água manteve-se praticamente inalterada entre os dois anos.

Esses resultados sugerem possíveis mudanças no padrão de uso e ocupação do solo ao longo do tempo, o que pode ter implicações ambientais, sociais e econômicas. A preservação da formação florestal é de extrema importância para a manutenção da biodiversidade e regulação do clima, enquanto o aumento da área de mosaico de culturas pode ser resultado da expansão da produção agrícola. A redução na área de mosaico de agricultura e pastagem pode estar associada a mudanças no mercado e políticas públicas para preservação ambiental, enquanto a diminuição da área de infraestrutura urbana pode ser resultado de políticas de planejamento urbano mais sustentáveis.

#### 6.4 Simulação do escoamento superficial para evento de chuva utilizando curva IDF nos cenários futuros

Os resultados apresentados representam as vazões estimadas para um modelo hidrológico para um período de 1 ano (2028 ou 2038) em uma bacia hidrográfica litorânea. Essas vazões são calculadas com base em uma curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência), que representa a relação entre a intensidade da chuva, a duração da chuva e a frequência da chuva, e é usada para estimar as vazões de pico em uma determinada bacia hidrográfica.

**Figura 18 - Vazões simuladas para os cenários de uso do solo futuros.**



No geral, pode-se observar que as vazões para 2038 são maiores do que as vazões para 2028. Isso pode ser devido a uma maior precipitação na bacia hidrográfica nesse período, o que leva a uma maior contribuição de água na bacia hidrográfica e, portanto, a maiores vazões.

As vazões de pico aumentam gradualmente até atingir um valor máximo e, em seguida, diminuem gradualmente em função da variação da intensidade e da duração da chuva. Isso é consistente com o comportamento esperado em uma bacia hidrográfica. As vazões de pico aumentam à medida que a chuva aumenta e, em seguida, diminuem à medida que a chuva diminui.

Os valores máximos das vazões de pico aumentam de 563,82 m<sup>3</sup>/s em 2028 passando para 694,80 m<sup>3</sup>/s em 2038. Isso pode indicar que eventos extremos de chuva frequentes na bacia hidrográfica.

Além disso, é importante notar que as vazões de pico são calculadas para diferentes níveis de intensidade de chuva e durações, e os resultados apresentados representam a vazão de pico para um evento de uma determinada duração e intensidade. Portanto, a aplicação desses resultados em um estudo de dimensionamento de estruturas hidráulicas (como pontes, bueiros, canais de drenagem, entre outros) deve ser feita com cuidado, avaliando sempre a adequação do evento crítico utilizado.

A ocorrência de eventos extremos de chuva não é a única explicação possível para o aumento das vazões máximas, outros fatores como mudanças na cobertura vegetal ou nas condições geológicas, também podem estar influenciando os resultados.

O uso e ocupação do solo têm uma grande influência nas vazões descritas, uma vez que afetam diretamente a quantidade de água que é absorvida pelo solo, infiltrada e armazenada nos aquíferos e cursos d'água.

A formação florestal, por exemplo, tende a aumentar a infiltração de água no solo, o que pode resultar em uma maior recarga de aquíferos e, consequentemente, em maiores vazões em rios e córregos. Por outro lado, áreas urbanas e de cultivo intenso podem reduzir a capacidade de infiltração do solo, aumentando a escorrência superficial de água e, consequentemente, reduzindo as vazões em rios e córregos.

## 7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos na análise das alterações no uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rio Cupissura, evidenciou-se a preeminência da atividade agropecuária na área, destacando-se a classe de agricultura e pastagem em mosaico. Adicionalmente, registrou-se uma redução significativa na cobertura florestal ao longo do período considerado, presumivelmente atribuível ao incremento da produção de cana-de-açúcar e à expansão das áreas destinadas à agricultura e pastagem.

Face a esses resultados, torna-se manifesta a urgência de equilibrar a atividade econômica com a preservação ambiental na região. Impõe-se, assim, a imperatividade de os agentes públicos e os detentores de propriedades rurais adotarem práticas de manejo sustentável que possibilitem o desenvolvimento econômico da área sem prejuízo à biodiversidade local e aos recursos naturais.

Adicionalmente, recomenda-se enfaticamente a continuidade da vigilância sobre o uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rio Cupissura, de modo a aferir a eficácia das medidas implementadas e detectar novas tendências e desafios emergentes. Nesse contexto, revela-se fundamental promover a conscientização da comunidade local acerca da relevância da conservação ambiental e da utilização responsável dos recursos naturais. Somente mediante tal abordagem será factível garantir a sustentabilidade da região a longo prazo.

O estudo constatou que os hidrogramas simulados eram aproximadamente semelhantes em forma para eventos horários, embora diferenças fossem observadas nas vazões de pico devido a fatores como o procedimento de estimativa de precipitação excedente ou a resposta da bacia a diferentes valores de CN. Os hidrogramas simulados para eventos de 12 horas foram visualmente semelhantes aos de eventos de 6 e 9 horas, mas as vazões de pico variaram para diferentes anos, o que foi atribuído a fatores como as velocidades de fluxo de pixels DEM. O estudo também estimou vazões de pico para diferentes períodos de retorno, e os valores obtidos variaram consideravelmente, o que poderia influenciar as áreas e volumes de inundação na sub-bacia.

O modelo LCM para analisar as mudanças no uso da terra na sub-bacia do Rio Cupissura entre 1998 e 2006, identificando a perda significativa de formação florestal e mosaico de classes de agricultura e pastagem. As variáveis topográficas e a proximidade de cursos d'água foram fatores importantes que afetaram as mudanças no uso da terra, bem como a distância da infraestrutura urbana, formação florestal e cana-de-açúcar. Foi possível prever a quantidade esperada de mudanças em 2018 com alta precisão.



Este estudo não apenas destaca a pertinência no âmbito da gestão hídrica e da disponibilidade de água, mas também contribui significativamente para pesquisas hidrológicas relacionadas a empreendimentos de infraestrutura hídrica, como barragens, pontes e canais. Os resultados apresentados demonstram inequivocamente que as variações no uso e ocupação do solo exercem impacto substancial nas vazões máximas na bacia hidrográfica, o que se reveste de extrema relevância para o planejamento e dimensionamento dessas estruturas.

Por fim, o presente estudo ressalta a necessidade premente de se considerar a incerteza associada às projeções futuras e a exigência de uma planificação eficiente e integrada dos recursos hídricos a fim de assegurar a sustentabilidade da gestão hídrica em uma bacia hidrográfica. Consequentemente, este trabalho assume-se como um guia de valor inestimável, não somente para gestores ambientais, mas também para engenheiros e planejadores envolvidos em projetos de infraestrutura hídrica em regiões de clima tropical úmido, sujeitas a distintos cenários de uso e ocupação da terra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULKAREEM, J. H. et al. Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 4, n. 4, p. 1577–1605, 2018.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista da FAE*, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- AYZEL, G. V. Runoff Predictions in Ungauged Arctic Basins Using Conceptual Models Forced by Reanalysis Data. *Water Resources*, v. 45, n. 2, p. 1–7, 1 dez. 2018.
- BEATLEY, T.; BROWER, D. J.; SCHWAB, A. K. *An Introduction to Coastal Zone Management*. Washington, DC: Island Press, 2002.
- BEZERRA, I.; SILVA, T. Análise de riscos à perda de solo para diferentes cenários de uso e ocupação na bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 195–204, 2014.
- BENEDETTI, A. et al. Dinâmica espacial da mudança do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, n. 2, p. 255-268, 2010.
- BRASIL. Secretaria de Estado da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos, do Meio Ambiente e da Ciência e Tecnologia. *Plano Municipal de Saneamento Básico de Pitimbu – PB*. [S.l.]: Governo do Estado da Paraíba, 2015.
- BRASIL. Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/macrodiagnostico#2o-macrodiagnostico-da-zc>>. Acesso em: 13 jul. 2020.
- CABRAL, S. L. Avaliação dos processos sedimentológicos na bacia do rio Jacarecica, em Maceió-AL. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal de Alagoas, 2011.
- CAMPOS, A. R. et al. Estimate of intense rainfall equation parameters for rainfall stations of the Paraíba State , Brazil. *Pesq. Agropec. Trop.*, v. 47, n. 1, p. 15–21, 2017.
- DHI. MIKE SHE. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/water-management/products/mike-she>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- EASTMAN, J. R. IDRISI Taiga tutorial. Clark Labs, Clark University, 2009.
- FLEISS, J.L. *Statistical methods for rates and proportions*. New York: John Wiley, 1981, p. 212-236.
- FELDPUSCH, T.R.; LICONA, J.C.; RIPPLE, W.J.; RIOUX, B.; CHAZDON, R.L.; JOHNSON, M.O. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area

and light environment. *Ecology Letters*, v. 22, p. 347-355, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ele.13213>. Acesso em: 28 fev. 2023.

GIANDOTTI, M. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. Istituto Poligrafico Dello Stato, p. 8, 107–117, 1934.

GOODRICH, D. C. et al. Kineros2/AGWA: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1561–1574, 2012.

GRIMALDI, S. et al. Flow time estimation with spatially variable hillslope velocity in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, v. 33, n. 10, p. 1216–1223, 2010.

GRIMALDI, S. et al. Temps de concentration: un paradoxe dans l'hydrologie moderne. *Hydrological Sciences Journal*, v. 57, n. 2, p. 217–228, 2012.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, v. 60, n. 1, p. 67–77, 2015.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; NARDI, F. A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, v. 57, n. 1, p. 73–83, 2012.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; ROMANO, N. Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins: Parameter sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 8, p. 1265–1275, 2013.

HAYKIN, S. *Redes neurais*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001, 900p.

IBGE. IBGE Cidades. Banco de dados, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: jul. 2017.

IBGE. BDIA - Banco de Dados de Informações Ambientais. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

IBRAHIM, B. et al. Hydrological predictions for small ungauged watersheds in the Sudanian zone of the Volta basin in West Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, p. 386–397, 1 set. 2015.

JONES, P., et al. Integrated coastal zone management: A global review. *Ocean & Coastal Management*, 184, 105001, 2020.

JØRGENSEN, L. B. Development of the J2000 model. *Journal of Hydrology*, v. 191, n. 1-4, p. 288-302, 1997.

JOHNSON, S., et al. Coastal habitat restoration for climate change adaptation and mitigation: A global synthesis. *Marine Policy*, 124, 104345, 2021.

JOHNSON, P. R. Impactos das Mudanças Climáticas nas Bacias Hidrográficas Costeiras: Estratégias de Adaptação e Gerenciamento. *Revista de Estudos Ambientais*, 22(3), 45-59, 2019.

KOTZ, S.; JOHNSON, N.L. *Encyclopedia of statistical sciences*. v. 4. New York: John Wiley & Sons, 1983, p. 352-354.

KUMAR, A. et al. Aplicação de Técnicas de Aprendizado de Máquina na Previsão de Inundações em Bacias Costeiras. *Revista de Engenharia Ambiental*, v. 30, n. 2, p. 112-126, 2020.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J.; LEPPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 28, n. 1, p. 205-241, 2003.

LECLERC, G.; SCHAAKE, J. . Derivation of Hydrologic Frequency Curves. Technol, MA: Mass. Inst. of, p. 142, 1972.

LOPES, G. R. Estudos Hidrológicos E Hidrossedimentológicos Na Bacia Do Córrego Do Capão Comprido , Df. Universidade de Brasília. Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.sília, 2010.

LI, X. et al. Mudanças Climáticas e Intrusão Salina em Bacias Costeiras: Um Estudo de Caso na Região de XYZ. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 25, n. 4, p. 511-525, 2019.

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

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, 2014, 141p.

MILLER, S. N. et al. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, n. 4, p. 915–929, 2002.

MILLER, J.D.; WESTERN, A.W.; FRANCIS, R.A.; MOORE, A.K. Modeling catchment-scale land-use change: Impacts on water balance and quality. *Journal of Hydrology*, v. 598, p. 126324, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126324>. Acesso em: 28 fev. 2023.

MILLER, S. N. et al. The Automated Geospatial Watershed Assessment tool. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 365–377, 2007.

NRCS. *National engineering handbook - part 630, hydrology*. Washington, DC, 2008.  
PARAÍBA. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA Implatação da Barragem Cupissura, 2019.

PARAÍBA. Plano Territorial de Desenvolvimento rural sustentável – PTDRS.Território da Zona da Mata Sul - PB. [S.l.], 2010.

- PDRH. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame. João Pessoa, 2001.
- PEREIRA, F. G. Urbanização e impactos ambientais nos espaços litorâneos brasileiros. *Cadernos de Geografia*, 23(4), 78-95, 2017.
- PETROSELLI, A. et al. Comparison of design peak flow estimation methods for ungauged basins in Iran. *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, n. 1, p. 127–137, 2020.
- PETROSELI, A. et al. A generalization of the EBA4SUB rainfall–runoff model considering surface and subsurface flow. *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, p- 2390-2401, 2020.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. An evaluation of regionalization and watershed classification schemes for continuous daily streamflow prediction in ungauged watersheds. *Canadian Water Resources Journal*, v. 42, n. 1, p. 2–20, 2 jan. 2017.
- ROCHA, P. C.; SANTOS, A. A. DOS. Hydrological Analysis in Water Basins. *Mercator*, v. 17, n. 11, p. 1–18, 15 nov. 2018.
- ROSSETTI, D. F. Modelagem hidrológica com uso do SWMM em duas microbacias hidrográficas na cidade de Londrina, Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 3, p. 173-187, 2011.
- SCIENTEC. Monitoramento das vazões do rio Cupissura e Afluente. João Pessoa, 2020
- SEIBT, A. C. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Córrego do Botafogo - Goiânia - GO. Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós- graduação Stricto em Engenharia do Meio Ambiente, 2013.
- SILVA, T. et al. Planejamento dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, Uma Bacia Litorânea do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, p. 121–134, 2002.
- SILVA, A. B., et al. Desenvolvimento econômico e conservação ambiental em espaços costeiros no Brasil. *Revista de Geografia Costeira*, 12(2), 45-61, 2019.
- SMITH, J. A. et al. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas Costeiras: Conservação de Recursos Hídricos e Ecossistemas Fragilizados. Editora Ambiental, 2020.
- SIVAPALAN, M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 15, p. 3163–3170, 2003.
- SMALL, C.; NICHOLLS, R. J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, v. 19, n. 3, p. 584–599, 2003.
- STEWART, B. Measuring what we manage-the importance of hydrological data to water resources management. 11th Kovacs Colloquium, Paris, France. *Anais...IAHS Publ*, 2015.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

- VALLEGA, A. Fundamentals of Integrated Coastal Management. Springer, 1999.
- USACE. Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), 2016.
- WAGENER, T.; MONTANARI, A. Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, v. 47, n. 6, 1 jun. 2011.
- WAGENER, T. et al. Modelagem Hidrológica em Bacias Litorâneas: Uso de Dados de Sensoriamento Remoto e Modelagem Espacial. *Revista de Recursos Hídricos*, v. 42, n. 3, p. 345-358, 2015.
- WENNINGER, J. et al. Identification of runoff generation processes using combined hydrometric, tracer and geophysical methods in a headwater catchment in South Africa. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53, n. 1, p. 65–80, fev. 2008.
- WIDAYATI, A.; DWIYANI, F.N.; FAHMI, F.; RUSITA, R. Land change modeling and its implications for forest conservation policy in West Kalimantan, Indonesia. *Forest Policy and Economics*, v. 113, p. 102134, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102134>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- YIN, C. et al. Assessment of the Effects of Urban Expansion on Ecological Environment Based on the LCM Model: A Case Study of Langfang City, China. *Sustainability*, v. 13, n. 4, p. 1963, 2021. DOI: 10.3390/su13041963.
- YU, D. et al. Future urban growth and land-use change analysis using the LCM model in China: A case study of Nanjing City. *Habitat International*, v. 104, p. 102223, 2020. DOI: 10.1016/j.habitatint.2020.102223.