



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



MURILO PEREIRA BORGES

**ANÁLISE DA ALTERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PELA
TENDÊNCIA DE EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO USANDO
CADEIA DE MARKOV E ANÁLISE ESPACIAL PARA BACIA DO CÓRREGO
DE SÃO PEDRO, UBERLÂNDIA/MG**

Uberlândia, 2020

MURILO PEREIRA BORGES

**ANÁLISE DA ALTERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PELA
TENDÊNCIA DE EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO USANDO
CADEIA DE MARKOV E ANÁLISE ESPACIAL PARA BACIA DO CÓRREGO
DE SÃO PEDRO, UBERLÂNDIA/MG**

Defesa apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia Urbana (Geomática)

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B732a
2020

Borges, Murilo Pereira, 1991-
Análise da alteração do escoamento superficial pela tendência de
evolução do uso e ocupação do solo usando Cadeia de Markov e análise
espacial para Bacia do Córrego de São Pedro, Uberlândia/MG [recurso
eletrônico] / Murilo Pereira Borges. - 2020.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3617>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon, 1978-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Nelson Marcos Ferreira - CRB-6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------|------------|-----------------------|-------------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Engenharia Civil | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, 251, PPGEC | | | | |
| Data: | 05 de março de 2020 | Hora de início: | 14h 00 min | Hora de encerramento: | 16 h 06 min |
| Matrícula do Discente: | 11812ECV009 | | | | |
| Nome do Discente: | Murilo Pereira Borges | | | | |
| Título do Trabalho: | Análise da alteração do escoamento superficial pela tendência de evolução do uso e ocupação do solo usando Cadeia de Markov e Análise Espacial para a Bacia do Córrego de São Pedro, Uberlândia/MG | | | | |
| Área de concentração: | Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental | | | | |
| Linha de pesquisa: | Planejamento e Infraestrutura Urbana e de Transportes | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Análise espacial ambiental | | | | |

Reuniu-se na Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Luciene Stamato Delazari – PPGCG/UFPR, Rodrigo Mikosz Gonçalves – CTG/UFPE e Marcio Augusto Reolon Schmidt - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Augusto Reolon Schmidt, Coordenador(a)**, em 05/03/2020, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Mikosz Gonçalves, Usuário Externo**, em 05/03/2020, às 17:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciene Stamato Delazari, Usuário Externo**, em 06/03/2020, às 09:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1874850** e o código CRC **7510E153**.

RESUMO

A bacia de São Pedro em Uberlândia - MG é um local com predominância de setores comerciais e residenciais, além de possuir uma via de importante acesso às outras regiões do município. A bacia hidrográfica, no entanto, possui um histórico expressivo de inundações, que mostram danos significativos diretos e indiretos à sociedade. Saber como a vazão do escoamento superficial irá progredir durante os anos, caracteriza-se como uma importante informação para os órgãos públicos, e configura como medidas não estruturais, e preventivas para futuros projetos de drenagem urbana. Neste contexto o objetivo deste trabalho é a aplicação do processo estocástico Cadeia de Markov para simular diferentes cenários de evolução do uso e ocupação da bacia urbana do São Pedro em Uberlândia. Para tanto, foram realizadas classificações por segmentação de imagens da bacia para os anos de 1998, 2008 e 2018 em imagens da série Landsat para se determinar a expansão da mancha urbana na bacia e identificar os eixos de propagação. Com a cadeia de Markov foram previstos os mapas de uso e ocupação para os decênios 2028, 2038, 2048 e 2058. Os resultados foram utilizados para modelagem hidráulica e hidrológica com a adoção do método de distribuição por blocos alternados, e a criação de um hidrograma de projeto pelo Método Santa Bárbara. Os resultados apontam que o uso da Cadeia de Markov permite uma análise de tendência de crescimento, estimando o sentido e a quantidade de áreas de expansão urbana na bacia Hidrográfica de São Pedro em cenários futuros de uso e ocupação do solo.

Palavras-chave: SIG – Análise Espacial - Método Santa-Bárbara – Classificação de imagens – Escoamento Superficial – Análises preditivas.

ABSTRACT

The São Pedro watershed in Uberlândia - MG is a place with a predominance of commercial and residential sectors, in addition to having an important access road to other regions of the municipality. The watershed, however, has a significant history of flooding, which shows significant direct and indirect damage to society. Knowing how the flow of runoff will progress over the years is characterized as important information for public management and is configured as non-structural and preventive measures for future urban drainage projects. In this context the objective of this research is the application of the Markov Chain stochastic process to simulate different scenarios of evolution of the land use and occupation of the urban basin of São Pedro in Uberlândia-MG. For this purpose, the image classifications were carried out by segmenting method of the basin for the years 1998, 2008 and 2018 in images from the Landsat series to determine the expansion of the urban spot in the basin and to identify the propagation directions. With the Markov Chain, land use and occupation maps were predicted for the 2028, 2038, 2048 and 2058 decades. The results were used for hydraulic and hydrological modeling with the adoption of the alternate block distribution method, and the development of a hydrograph by the Santa Barbara Method. The results show that using the Markov Chain allows an analysis of the growth trend, estimating the direction and the amount of urban expansion areas in the São Pedro Hydrographic Basin in future land use and occupation scenarios.

Keywords: GIS - Spatial Analysis - Flooding - Image Classification - Makov Chain - Predictive Analytics

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fatores que influenciam na formação do clima urbano..... | 17 |
| Figura 2 - Inundação na avenida Rondon Pacheco..... | 18 |
| Figura 3 - Estrutura de dados sobre o espaço urbano para análises espaciais no SIG.... | 21 |
| Figura 4 - Grafo apresentando um sistema simples de cadeia de Markov | 27 |
| Figura 5 – Figura do mapa da localização da área de estudo. | 42 |
| Figura 6 - Modelo de elevação da bacia de São Pedro..... | 45 |
| Figura 7 - Modelo de elevação da bacia de São Pedro..... | 47 |
| Figura 8 - Metodologia para a extração da bacia de São Pedro | 48 |
| Figura 9 - Sensoriamento remoto aplicado para viabilizar a classificação dos mapas... | 49 |
| Figura 10 - Procedimento para o método de classificação de imagens por segmentação | 50 |
| Figura 11 - Etapas do cálculo do tempo de concentração em cada ano | 52 |
| Figura 12 - Etapas do cálculo dos hietogramas. | 53 |
| Figura 13 - Etapas do cálculo de vazões no exutório. | 54 |
| Figura 14 - Procedimentos para modelagem da predição do uso do solo com a Cadeia de Markov. | 56 |
| Figura 15 – Figura do mapa de hierarquização dos cursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Pedro. | 59 |
| Figura 16 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 1998. 60 | 60 |
| Figura 17 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2008. 60 | 60 |
| Figura 18 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2018. 61 | 61 |
| Figura 19 – Figura do mapa de vias da bacia do Córrego do São Pedro..... | 63 |
| Figura 20 - Figura do mapa de distância de acesso às vias. | 64 |
| Figura 21 - Figura do mapa de perda e ganho da classe vegetação entre 1998 e 2018.. 66 | 66 |
| Figura 22 - Figura do mapa de perda e ganho da classe solo exposto entre 1998 e 2018. | 66 |
| Figura 23 - Tendência espacial de mudança de vegetação para área urbana com polinômio de 3º grau. | 67 |
| Figura 24 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 3º grau..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Tendência espacial de mudança de todas as classes para área urbana com polinômio de 3º grau..... | 68 |
| Figura 26 - Tendência espacial de mudança de vegetação para área urbana com polinômio de 4º grau..... | 69 |
| Figura 27 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 4º grau..... | 69 |
| Figura 28 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 4º grau..... | 70 |
| Figura 29 - Figura do mapa de potencial de transição de áreas de vegetação para áreas urbanas..... | 73 |
| Figura 30 - Figura do mapa de potencial de transição de áreas de solo exposto para áreas urbanas..... | 74 |
| Figura 31 - Figura do mapa de predição para ao ano de 2018..... | 76 |
| Figura 32 - Figura do mapa e acerto, erro e falso alerta para a predição de 2018..... | 77 |
| Figura 33 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2028..... | 79 |
| Figura 34 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2038..... | 79 |
| Figura 35 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2048..... | 80 |
| Figura 36 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2058..... | 80 |
| Figura 37 - MDE da bacia de São Pedro e identificação dos talvegues..... | 82 |
| Figura 38 – Figura do mapa da identificação solos para cálculo do CN..... | 83 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Evolução do uso do solo em relação às outras classes..... | 62 |
| Gráfico 2 - Queda do valor n de Manning até 2058..... | 85 |
| Gráfico 3 – Estimativa do aumento da velocidade do escoamento superficial..... | 86 |
| Gráfico 4 - Tempo de concentração para o ano de 1998 | 88 |
| Gráfico 5 - Tempo de concentração para o ano de 2008 | 88 |
| Gráfico 6 - Tempo de concentração para o ano de 2028 | 89 |
| Gráfico 7 -Tempo de concentração para o ano de 2038 | 89 |
| Gráfico 8 -Tempo de concentração para o ano de 2048 | 90 |
| Gráfico 9 - Tempo de concentração para o ano de 2058 | 90 |
| Gráfico 10 - Distribuição temporal por blocos alternados TR = 25..... | 92 |
| Gráfico 11 - Hietograma de chuva total de projeto. | 94 |
| Gráfico 12 - Hidrograma para o uso do solo em 1998. | 94 |
| Gráfico 13 - Hidrograma para o uso do solo em 2008. | 95 |
| Gráfico 14 - Hidrograma para o uso do solo em 2018. | 95 |
| Gráfico 15 - Hidrograma para o uso do solo em 2028. | 96 |
| Gráfico 16 - Hidrograma para o uso do solo em 2038 | 96 |
| Gráfico 17 - Hidrograma para o uso do solo em 2048 | 96 |
| Gráfico 18 - Hidrograma para o uso do solo em 2058. | 97 |
| Gráfico 19 – Comparação do tempo de retorno no aumento da vazão pela impermeabilização..... | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas. | 36 |
| Tabela 2 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas. | 38 |
| Tabela 3 - Crescimento populacional de Uberlândia - MG entre 1980 e 2018..... | 43 |
| Tabela 4 - Características dos dados de sensoriamento remoto | 45 |
| Tabela 5 - Teste de Cramer nas variáveis de expansão do uso e ocupação do solo | 71 |

| | |
|--|----|
| Tabela 6 - Resultado da execução do modelo em rede neural MPL no TerrSet. | 72 |
| Tabela 7 - Probabilidade de transição das demais classes de uso do solo para área urbana. | 75 |
| Tabela 8 - Características físicas dos talvegues..... | 82 |
| Tabela 9 – Comparação dos trabalhos de Andrade (2005) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para cálculo do CN médio. | 84 |
| Tabela 10 - Média ponderadas do valor de Manning das sessões | 84 |
| Tabela 11 - Memorial de cálculo para a determinação do hietograma por blocos alternados TR = 25..... | 91 |
| Tabela 12 - Memorial de cálculo para a determinação do hietograma por blocos alternados TR = 50..... | 92 |
| Tabela 13 - comparação da fração impermeável com o aumento da vazão durante os anos. | 98 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Equações para o tempo de concentração..... | 32 |
| Quadro 2 - Grupo de solos e características do solo..... | 36 |
| Quadro 3 - Interpretação da validação local..... | 77 |
| Quadro 4 - Interpretação da validação local..... | 78 |
| Quadro 5 - Tipos e portes de bacias hidrográficas para cálculo de tc | 87 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|---|
| P_{ij} | - Probabilidade fixada |
| i | - Um estado qualquer inicial |
| j | - Um estado qualquer final |
| M_t | - Distribuição de cada classe de uso e ocupação em um tempo |
| t | - Um tempo qualquer |
| S | - Retenção máxima potencial após o início do escoamento |
| CN | - <i>Curver number</i> |
| N | - Coeficiente de Manning |
| tc | - tempo de concentração de uma bacia hidrográfica |
| L | - Comprimento do talvegue |
| S | - Declividade do talvegue |
| V | - Velocidade média na seção |
| R | - Raio hidráulico |
| S | - Declividade do canal |
| Im | - Intensidade máxima média de precipitação |
| TR | - Tempo de retorno em anos |
| T | - Duração da precipitação em minutos |
| K | - Parâmetros de cálculo para as curvas IDF |
| a | - Parâmetros de cálculo para as curvas IDF |
| b | - Parâmetros de cálculo para as curvas IDF |
| c | - Parâmetros de cálculo para as curvas IDF |
| Pef | - Precipitação efetiva |
| Ia | - Perdas por abstração inicial |
| I | - Ordenada do hidrograma instantâneo em m^3/s |
| i | - Intensidade de precipitação em milímetros |
| d | - Parcada de área impermeável |
| i_e | - Precipitação excedente da área permeável em milímetros por hora |
| Ad | - Área total de drenagem em km^2 |
| $Q(t)$ | - Quantidade de vazão efluente |
| (Δt) | - Estante de tempo |
| K_r | - Coeficiente de amortecimento |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – *Intensity-Duration-Frequency*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE – Modelo Digital de Elevação

OLI - *Operational Land Imager*

RGB – *Red Green Blue*

SCS-CN – *Soil Conservation Service - Curve Number*

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SRTM - Missão Topográfica Radar *Shuttle*

TauDEM - *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*

TM - *Thematic Mapper*

UFV – Universidade Federal de Viçosa

USGS - *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> | 15 |
| 1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> | 15 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 EXPANSÃO URBANA E DESAFIOS NA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA | 16 |
| 2.2 A VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS URBANOS ATRAVÉS DOS SIG – SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS | 20 |
| 2.2.1 <i>A transformação da paisagem urbana</i> | 21 |
| 2.2.2 <i>Sensoriamento remoto e técnicas de classificação do uso do solo</i> | 22 |
| 2.3 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS EM ANÁLISES ESPACIAIS | 24 |
| 2.4 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMAS DE PROJETO PARA BACIAS URBANAS | |
| 30 | |
| 2.4.1 <i>Cálculo do tempo de concentração (tc)</i> | 31 |
| 2.4.2 <i>Determinação das curvas IDF (intensidade-duração-frequência)</i> | 33 |
| 2.4.3 <i>Definição do tempo de retorno</i> | 34 |
| 2.4.4 <i>Método de distribuição: Método por blocos alternados</i> | 34 |
| 2.4.5 <i>Estimativa da CN para a área urbana da bacia de São Pedro</i> | 35 |
| 2.4.6 <i>Determinação do coeficiente de Manning para obtenção do hidrograma e simulações</i> 37 | |
| 2.4.7 <i>Aplicação do método Santa Bárbara SBUH para a obtenção do hidrograma da simulação</i> 39 | |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO | 41 |
| 3.2 MATERIAIS..... | 44 |
| 3.3 METODOLOGIA..... | 46 |
| 3.3.1 <i>Extração da área de estudo</i> | 48 |
| 3.3.2 <i>Obtenção das imagens por sensoriamento remoto</i> | 49 |
| 3.3.3 <i>Classificação de imagens por segmentação</i> | 50 |
| 3.3.4 <i>Processo de determinação do hidrograma para a simulação</i> | 51 |

| | |
|---|------------|
| <i>3.3.5 Metodologia para a aplicação da cadeia de Markov na modelagem do uso do solo para o ano de 2028.....</i> | 54 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 58 |
| 4.1 ANÁLISE DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NOS ANOS DE 1998 E 2008 | 64 |
| 4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SUB MODELO DE TRANSIÇÃO MPL REDES NEURAIS | 71 |
| 4.3 CÁLCULO DO HIDROGRAMA DE PROJETO..... | 81 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 99 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 104 |
| APÊNDICE A – MAPAS | 111 |
| APÊNDICE B – TABELAS E QUADROS | 137 |

1 INTRODUÇÃO

No processo do planejamento urbano compreender a alteração do escoamento superficial ao dos anos contribui para a elaboração de medidas de controle, e auxilia no planejamento da infraestrutura de drenagem urbana em regiões sujeitas a inundações (CANHOLI, 2014).

Neste contexto, as análises espaciais proporcionadas por softwares diversos são capazes de utilizar informações espaciais e relacioná-las com os modelos de inundações. Por meio desta alternativa, Kar et al. (2018) mostram que dados de uso do solo e hidrogramas de chuva-vazão podem ser combinados para analisar simulações de inundações. No entanto, alinhada à estas análises, avaliar mudanças futuras no uso e ocupação, contribui para identificar a alteração das características de inundações em um cenário urbano (ROMALI, 2018). Entretanto a carência destas análises espaciais, e a precariedade de dados pluviométricos, dificulta a realização de estudos que antecedem o planejamento urbano, pois são variáveis indispensáveis para a elaboração de medidas preventivas.

Considerando que o gerenciamento de sistemas de drenagem urbana no Brasil requer altos investimentos para sua construção, e requer estudos de grandes proporções, a ausência destes acarreta vários prejuízos diretamente e indiretamente a sociedade. Estes prejuízos encontram-se em danos físicos a construções, bem como na alocação de custos para correção de danos após as inundações, além de perdas de vidas humanas (VAZ, 2015).

No entanto, a eficiência dos sistemas de drenagem é um importante indicador de desempenho e esse deve ser controlado com medidas estruturais e não-estruturais. Tucci (2007), expõe que as primeiras estão ligadas às modificações de recursos hídricos por meio de obras, e as demais visam a conformidade da população com eventos de inundações, sem que haja alteração dos meios físicos, focando em medidas preventivas, que são indispensáveis no planejamento urbano.

Contando que as cidades são organismos vivos e que se modificam cotidianamente no sentido do planejamento urbano, estimar ritmo, densificação e direções de crescimento urbano proporciona ir muito além dos Planos Diretores Municipais, com a delimitação e o monitoramento de áreas de risco à inundações (GROSTEIN, 2001). Em

outras palavras, à medida que as cidades se urbanizam e reduzem a área natural em uma bacia hidrográfica, são geradas alterações no padrão, intensidade e no período de ocorrência de cheias, por esse motivo há importância na análise dos fatos anteriores.

Chang e Huang (2015) reforçam que entre estas alterações, estão o aumento da velocidade no escoamento superficial e o aumento da magnitude de inundações, tornando as regiões vulneráveis a estes eventos.

Com o avanço das análises espaciais em conjunto com Sistema de Informações Geográficas (SIG), é possível a realização de estudos complexos sobre uma região pode alterar o escoamento superficial ao longo dos anos levando em consideração variáveis como a geomorfologia e o uso do solo a fim de aplicar os resultados em análises preditivas para avaliar mudanças temporais. Portanto, esta pesquisa adota a hipótese de que modelos preditivos baseados em Cadeia de Markov, associadas a técnicas de análise espacial em SIG, permitem a definição de áreas susceptíveis a mudanças no padrão de uso e ocupação de uma bacia hidrográfica. Como objetivo, esta pesquisa busca analisar a tendência de crescimento urbano em cenários futuros de uso e ocupação e como este processo pode alterar o escoamento superficial na bacia hidrográfica de São Pedro localizada no município de Uberlândia-MG a fim de estimar a quantidade e o sentido de crescimento do uso e ocupação do solo para os decênios contados a partir de 2018 até 2058.

Para isso, em primeiro lugar observa-se a mudança de uso e ocupação do solo nos anos de 1998, 2008, e 2018, através da classificação por segmentação e análise de tendência de crescimento. Para entender o sentido da expansão urbana, os dados relacionados ao uso do solo foram submetidos ao processo estocástico denominado como Cadeia de Markov para caracterizar a transição futura das classes de uso do solo da área urbana na bacia hidrográfica de São Pedro a partir do uso do solo nos anos anteriores.

O resultado da predição foi avaliado estatisticamente com base na precisão do modelo estatístico em prever áreas de transição já existentes em uma imagem presente. Com base na classificação de anos passados, 1998 e 2008 foi desenvolvida a predição para 2018 e assim verificada a significância dos resultados. Por fim, a criação de hidrogramas sintéticos de chuva-vazão pelo método de Santa Barbara possibilitou estimar a evolução da vazão no exutório da bacia em cenários futuros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral do presente trabalho é analisar a tendência de crescimento do uso e ocupação do solo na microbacia do rio São Pedro obtido pela Cadeia de Markov para os decênios a partir de 2018 até 2058, e como essa tendência de crescimento implica no aumento do escoamento superficial dentre outras variáveis hidráulicas ligadas ao mesmo.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- A. Avaliar o uso e ocupação do solo na Bacia do rio São Pedro em Uberlândia nos anos 1998, 2008 e 2018;
- B. Realizar uma análise preditiva com a Cadeia de Markov por meio do software de análises espaciais Terrset, para obter a previsão do uso e ocupação do solo nos anos de 2028, 2038, 2048 e 2058 para a bacia do Córrego do São Pedro;
- C. Criar hidrogramas de chuva-vazão para cada ano analisado;
- D. Analisar estatisticamente os resultados.

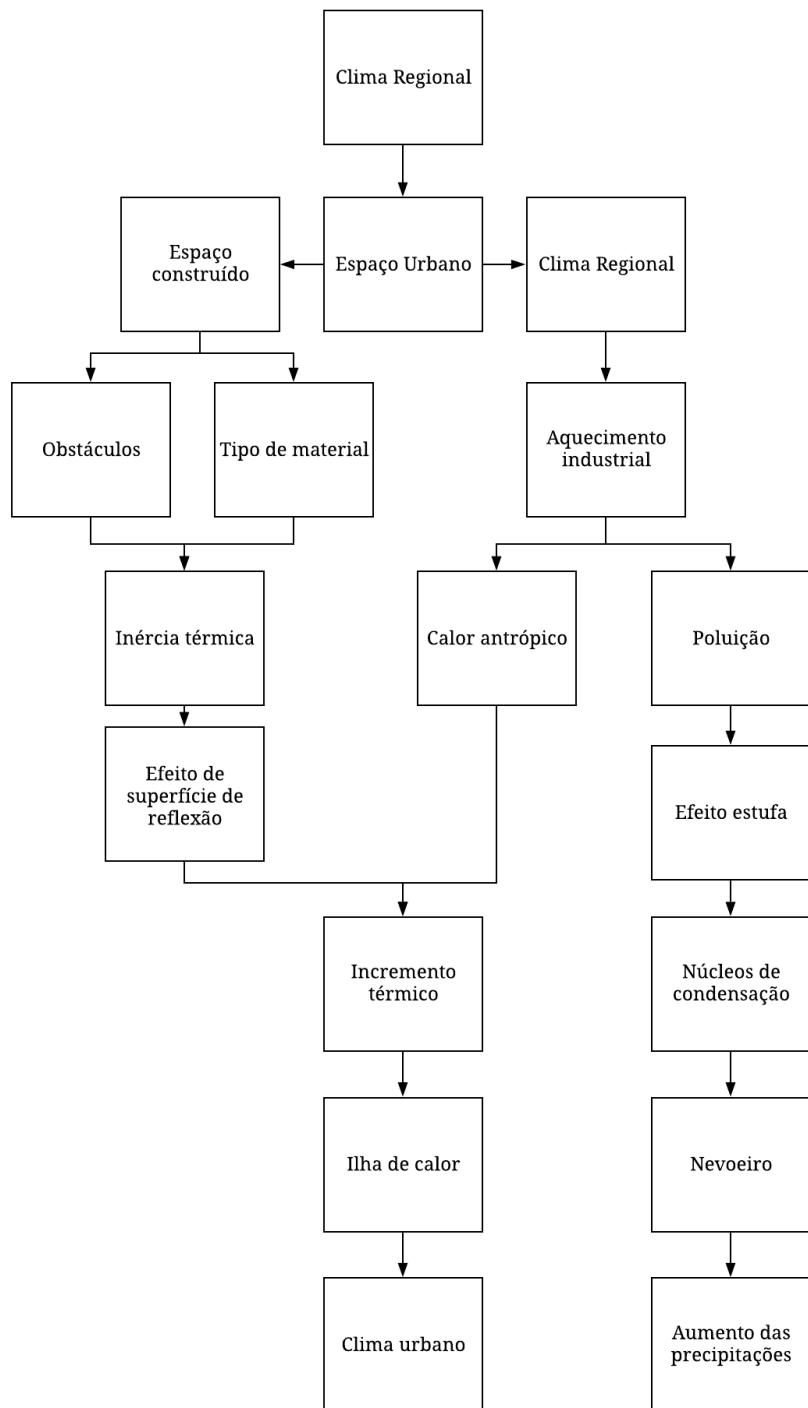
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EXPANSÃO URBANA E DESAFIOS NA INFRAESTRUTURA DE DRENAGEM URBANA

Nas cidades a precipitação é um fenômeno climático que depende da movimentação atmosférica e das características topográficas do espaço urbano (Borzenkova, 2015). Entretanto os processos de expansão urbana, acompanhados do aparecimento de indústrias e a impermeabilização de superfícies, originam ilhas de calor e alteram as precipitações. Porangaba (2015), relata que a formação de ilhas de calor afeta o clima urbano (Figura 1), e alteram as condições naturais do meio ambiente, em específico o aumento da concentração das precipitações.

A figura 1, apresenta fatores que relacionam o clima regional com o espaço urbano, e como este é afetado pelo o aparecimento de ilhas de calor. O aparecimento de ilhas de calor também altera fenômenos hidrológicos e resulta no aumento das precipitações, fatos que estão ligados não só pelo clima, mas também pela expansão urbana. No decorrer dos processos de expansão urbana constata-se uma série de eventos que afetam o bem-estar social, e conduz as cidades a transtornos causados por inundações em períodos de precipitação intensa.

Figura 1 - Fatores que influenciam na formação do clima urbano.



Fonte: Porangaba, 2015.

Portanto para evitar estes transtornos o planejamento urbano deve considerar que as alterações no clima tratadas anteriormente vão influenciar nos projetos de drenagem urbana. Este fato é esclarecido pelos autores Zhou et al., (2019) que devido

a essas alterações, a precipitação produz um aumento nas características de escoamento superficial. Estas alterações no escoamento potencializam as inundações, e torna os sistemas de drenagem insuficientes (Figura 2).

Figura 2 - Inundação na avenida Rondon Pacheco



Fonte: G1, 2013.

A figura 2 acima mostra uma enchente na avenida Governador Rondon Pacheco, localizada no município de Uberlândia – MG em consequência de um evento de precipitação conforme página do G1 (2013). Dado um evento extremo de precipitação sistemas de drenagem insuficientes tornam zonas urbanas impermeabilizadas vulneráveis aos danos causados por inundações. Logo conclui-se que a elaboração dos sistemas de drenagem deve contemplar e desenvolver-se, por meio das particularidades de cada espaço urbano e sua expansão no decorrer dos anos.

Além dos desafios citados anteriormente sobre a expansão urbana e elaboração de sistemas de drenagem, Lengler e Mendes (2015), explicam que implantar e gerenciar sistemas de drenagem urbana no Brasil requer uma alocação expressiva de recursos financeiros, e na falta de recursos problemas como deslizamentos e inundações não são evitados, além disso estes problemas são desprovidos de planos de segurança e medidas para a redução de danos.

Planos de segurança e medidas para redução de risco são definidas no parcelamento do uso do solo, em que Kilvington e Saunders (2019) evidenciam que se

avalia até que ponto residências, indústrias, bem como a sociedade como um todo está sob a exposição a eventos de risco, e com base nesse critério delimita-se regiões mais restritivas a urbanização a medida que o risco aumenta no passar dos anos. No entanto Haque e Asami (2014), expõem que existe dificuldade da gestão pública no parcelamento do espaço urbano, pois comumente os critérios utilizados na tomada de decisões são confrontados por outras prioridades. Os autores explicam que dentre estas prioridades estão interesses individuais das partes envolvidas no processo de parcelamento do uso do solo, o que dificulta o mesmo.

Mediante o que exposto anteriormente entende-se que cidades carentes de gestão organizacional e políticas públicas de desenvolvimento urbano, encontram desafios na expansão organizada do seu território (HAQUE e ASAMI, 2014). Grostein (2001), no que se refere aos desafios da expansão urbana apresenta os seguintes aspectos. A autora diz que o problema da urbanização de territórios está associado na forma que esta ocorre, e não aos fatores como a velocidade ou a escala de expansão.

Grostein (2001) também explica que os modelos de ocupação de território, a oferta e o atendimento às necessidades da população por moradia, os equipamentos sociais, e a disponibilidade de recursos hídricos, são algumas variáveis que devem ser viabilizadas por políticas que asseguram o desenvolvimento do espaço urbano. Além disso uma estrutura de monitoramento que disponibilize o histórico de precipitações por regiões, bem como a medição de dados de escoamento superficial em zonas propícias a inundações, deve constituir no banco de dados das cidades afim promover análises e projetos estruturais.

Conforme Sobral *et al.*, (2017), a relevância destes estudos observacionais são para monitorar os regimes de chuva e entender como é a variação pluviométrica nas regiões do país. Ainda de acordo com os autores, o Brasil é um dos países que mais sofre com extremos climáticos, o que torna estes estudos mais relevantes ainda. Nesse sentido, a percepção da evolução de cheias urbanas e o uso de dados reais que antecede a realização de projetos de sistema de drenagem, torna-os mais eficientes. Entretanto com a falta de registros históricos de inundações urbanas fica difícil conduzir estes projetos.

Mesmo que no Brasil, sites como ANA – Agência Nacional das Águas e INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, possuam dados organizados sobre precipitação, a utilização destes dados em cálculos hidráulicos para projetos de drenagem urbana

necessitam de flexibilidade na duração monitorada que em algumas situações não são compatíveis com a demanda dos projetos de drenagem. A dificuldade, no entanto, não está apenas na flexibilidade destes registros, pois levando em conta os dados de precipitação disponibilizados por órgãos especializados na internet, a confiabilidade destes dados deve ser validada antes para utilização nas avaliações. É importante reforçar que em um cenário ideal seria que os órgãos especializados neste monitoramento abranjam não só dados históricos de precipitação, mas também dados sobre vazões, para contribuir com expansão futura de zonas em cidades e para o planejamento dos projetos de drenagem urbana (HUANG et al., 2018).

Tingsanchali (2012) conclui que coleta e a organização destas informações, referentes a frequência de inundações e suas características (amplitude, profundidade, duração e velocidades de fluxo), permite a verificação das áreas que estarão sujeitas a riscos de inundações, e que requerem atenção na implantação de medidas estruturais.

Para o estudo sobre os aspectos existentes em um determinado espaço urbano o presente trabalho propõe a utilização de análises espaciais que são procedimentos existentes nos SIG. Abdulrazzak et al. (2019) esclarecem que combinando essas tecnologias é possível montar uma estrutura analítica para a determinação e o planejamento de diversos fenômenos urbanos. Sobre esta estrutura é possível, portanto, a realização de análises espaciais associadas com análises estocásticas.

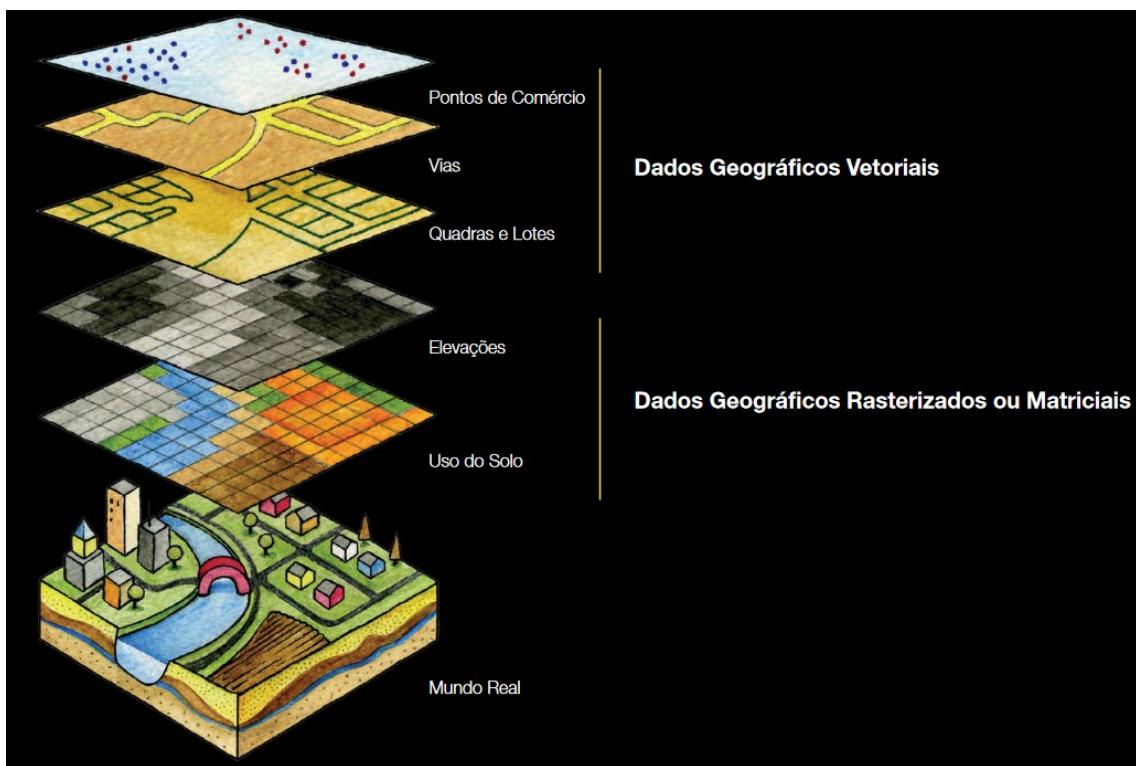
2.2 A VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS URBANOS ATRAVÉS DOS SIG – SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O uso do SIG proporciona às entidades governamentais a visualização de informações integradas ao espaço urbano. A gestão dessas áreas pode ser facilitada com medidas de mitigação na ocorrência de catástrofes (JOHNSON, 2000). Desta forma Kar *et al.* (2018) mostram que dados provenientes de diferentes fontes, podem ser combinados para analisar e avaliar as mudanças que ocorreram em um contexto urbano.

Sendo assim é possível elaborar uma estrutura com as camadas de dados que compõem o espaço urbano, e analisar a correlação entre eles para entender estes fenômenos urbanos, ou monitorar mudanças neste contexto. Essa estrutura compõe

camadas de informações e são representadas por meio de imagens no formato matricial ou *raster*, ou vetoriais. (Figura 3).

Figura 3 - Estrutura de dados sobre o espaço urbano para análises espaciais no SIG.



Fonte: Duarte, 2019.

A figura 3 acima mostra a estrutura básica da organização de dados no SIG e que é possível analisar e avaliar mudanças no contexto urbano o que viabiliza o planejamento e a gestão urbana na tomada de medidas de correção, e ajuda na verificação de zonas de risco urbano. Este contexto pode se relacionar à uma bacia hidrográfica que segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9433 de 08 de janeiro de 1997), é definida como uma unidade territorial onde aplica-se o planejamento e a gestão urbana, além de ser um local que sofre transformações físicas e naturais ao passar dos anos.

2.2.1 *A transformação da paisagem urbana*

A partir do histórico de cheias nas cidades brasileiras, e dos danos causados por estes eventos, é possível evidenciar que durante os anos a gestão urbana não acompanha

crescimento das cidades. Este crescimento que por sua vez não é suportado pelas características naturais já existentes, e resulta em problemas ambientais urbanos, como por exemplo inundações em decorrência do aumento das precipitações e do escoamento superficial respectivamente. Desta maneira é importante verificar como se deu a transformação de áreas naturais de uma bacia hidrográfica por áreas de ocupação e como estas áreas foram comprometidas.

Nota-se, portanto, que as transformações que ocorrem no cenário urbano se dão pelas relações socioculturais, econômicas e ambientais (FERREIRA, 2012). Neste contexto para entender as modificações no escoamento superficial, Santiago, Sales e Silva (2017) explicam que os aspectos geomorfológicos auxiliam na caracterização do uso e ocupação do solo. Com isso o clima, e a velocidade de escoamento vão se associar à altitude, e aos níveis de declividade respectivamente. Sendo assim associando estes fatores descritos anteriormente à uma bacia hidrográfica é possível analisar previamente quais destes aspectos podem influenciar ou não em fenômenos naturais como o escoamento superficial.

Neste sentido, o sensoriamento remoto como sendo a tecnologia que contribui para o entendimento das mudanças históricas na superfície terrestre, além da observação de variáveis que compõem um determinado local de estudo. Estas verificações tornam-se indispensável no planejamento urbano, e na tomada de decisões para solução de problemas futuros.

2.2.2 *Sensoriamento remoto e técnicas de classificação do uso do solo*

A tecnologia que envolve o sensoriamento remoto está na aquisição de imagens da superfície terrestre a distâncias remotas pela relação entre os objetos a superfície imageada, e a radiação eletromagnética (MENEZES et al. 2012). Essas radiações são transformadas em imagens representando estreitas faixas do espectro eletromagnético refletidas pelos objetos e feições na superfície da Terra para, em um momento posterior, serem compostas em imagens coloridas na tela do usuário. Para Fitz (2008) a classificação destas imagens multiespectrais permite a identificação de elementos e informações existentes de forma automática e detalhada pela associação dos valores de cada pixel da imagem a uma determinada classe de uso do solo preestabelecida pelo pesquisador.

De acordo com Mahmon et al. (2015) nota-se que para o viabilizar estas classificações leva em conta as combinações de bandas no espaço RGB das imagens. Esta combinação espectral ajuda a identificar as características terrestres e Fontoura Neto et al. (2013) explicam que o método de classificação de imagens quantifica essas características levando em conta suas propriedades espectrais. No entanto os autores ressaltam que a classificação se trata de um processo subjetivo, pelo motivo que o usuário não tem como apoio à diferenciação das características do mundo real com as obtidas pela radiação eletromagnética, além disso estas ocasionalmente diferem da percepção de usuário um para outro.

No entanto, existe uma variedade de métodos de classificação e estes segundo Santos, Peluzio e Saito (2010), não se limitam a um que seja o ideal para todas as situações, pois as características das imagens e as condições delas variam de estudo para estudo. Portanto dentre estes métodos, os que classificam por região ou segmentação se caracterizam por relacionar a informação espectral de cada pixel e a informação espacial automaticamente por um algoritmo. Em outras palavras, este algoritmo faz uma varredura nas propriedades espectrais e espaciais das imagens automaticamente selecionando-as (SANTIAGO; SALES e SILVA, 2017).

De acordo com Menezes (2012), a segmentação de imagens consiste num processo de agrupamento de pixels que possuem características espectralmente semelhantes. Segundo o autor, este processo decompõe a imagem em regiões discretas, contíguas e que não se interceptam, constituindo, semanticamente, segmentos significativos. Dessa forma, o processo de segmentação faz com que o contexto em que se encontra inserido o pixel seja considerado na classificação, isso é, leva em conta as características do meio (regiões) e não exclusivamente, os valores espectrais dos pixels. Como as condições texturais a classificação por segmentação se aproxima mais daquela feita, de forma qualitativa, por intérpretes humanos, acabando por produzir índices de exatidão mais elevados.

Harder (2015), explica que este procedimento de classificação de imagens compõe uma análise espacial que é um processo que se inicia com o conhecimento prévio sobre o problema. E a capacidade de compreensão dos dados para a análise espacial determinará a tomada de decisões, bem como ter a compreensão sobre quais intervenções

no espaço urbano irão afetar o planejamento (WENG, 2001; HONG; ADLER; HUFFMAN, 2007).

Para Johnson (2000), a capacidade de determinar estas mudanças em um cenário urbano dá clareza para a elaboração de medidas mitigatórias neste contexto. Estas medidas que por sua vez carecem de informações sobre áreas afetadas para as devidas intervenções. Ter o apoio de tecnologias que propiciam estudo amplos sobre áreas afetadas por fenômenos urbanos visa reduzir ou remediar problemas, como por exemplo por inundações. Logo, conhecendo informações sobre como a expansão urbana pode influenciar negativamente o zoneamento urbano, é fundamental levar em consideração, fatores naturais e socioeconômicos (características do solo, topografia, polos industriais, estruturas físicas), estes que possam vir a prejudicar, ou dificultar a execução de medidas preventivas. Para avaliar a alteração de fatores naturais como escoamento superficial Jonkman et al., (2008) afirma que a combinação de informações hidrológicas, hidráulicas, além de simulações, fornecem o comportamento e a distribuição no que se espera de possíveis cheias em centros urbanos.

Portanto, para se ter estas informações primeiramente é necessário coletar as características físicas de uma determinada bacia hidrográfica urbana, bem como entender o comportamento das precipitações para a realização dos cálculos hidráulicos. Desta maneira as análises espaciais facilitam a coleta destas variáveis físicas, e mostram como as mesmas variam no decorrer dos anos. Entendendo a transformação do uso e ocupação do solo, é possível calcular hidrogramas de chuva-vazão. Os SIG tornam as análises espaciais acessíveis e diretas graças aos tratamentos estatísticos existentes. Estes tratamentos estatísticos podem prever a probabilidade da mudança do uso e ocupação do solo no decorrer dos anos, logo, desenvolver hidrogramas para mudanças futuras no mesmo.

2.3 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS EM ANÁLISES ESPACIAIS

Para entender mudanças sobre como comportamentos no passado podem influenciar no futuro, o processo estocástico Cadeia de Makov (1906) se caracteriza como um método promissor. Este método pertence à modelos preditivos e esta seção apresenta

os conceitos sobre o uso destes modelos para obtenção de resultados sobre o comportamento de dados.

Para Kuhn e Johnson (2013), os processos estocásticos são responsáveis por criar modelos preditivos que são utilizados por sites de pesquisas, para fornecer resultados sobre diversas questões, assim como em vários outros meios autômatos. Estes meios autômatos recebem informações e em seguida filtram os dados para procurar padrões mais relevantes para responder um problema informado. Esses processos evoluíram ao longo de vários campos como a física, estatística, química, ciência da computação, e são intitulados como “*predictive analytics*”.

Portanto para corresponder o objetivo do presente trabalho será utilizado o contexto da análise preditiva para fundamentar outros modelos matemáticos que utilizam do mesmo conceito. Com isso é possível alcançar uma definição direta, e compreensível sobre o que é uma análise preditiva. E conforme Geisser (1993), Kuhn e Johnson (2013), é definida como análise preditiva, um processo pelo qual um modelo é criado para satisfazer a melhor previsão da probabilidade de um resultado, sendo este realizado através de uma ferramenta ou modelo matemático. Guazzelli (2012) ainda esclarece que modelos preditivos realizam análises com a proposta de resolver problemas através da compreensão de padrões no passado, e que podem auxiliar na indicação de padrões futuros de mudança. Estas análises são essencialmente funções matemáticas capazes de aprender e mapear um conjunto de dados.

No intuito de avaliar os padrões de mudança em características de um determinado sistema de variáveis aleatórias, a cadeia de Markov como sendo um processo estocástico pode ser utilizada nestes casos. Costa (1971) explica que se denomina como um processo estocástico ou aleatório, um sistema possuindo intervalos aleatórios em um determinado tempo, sendo que estes intervalos correspondem a mudanças de estado em sistema físico do qual aplica-se as leis de probabilidades. Além disso Ching e Ng (2006) explicam que o interesse na cadeia de Markov como sendo um processo estocástico, está em demonstrar uma sequência de variáveis aleatórias que correspondem a determinados estados de um sistema qualquer, e a probabilidade deste sistema de assumir uma mudança de um estado para outro, depende apenas do estado anterior. E mesmo que ocorram vários estados anteriores, a probabilidade do próximo estado só depende do que se encontra agora. Mais precisamente, a partir do momento que se tem um conjunto de variáveis em uma

sequência de dados, o processo de mudança de cada uma das variáveis obedecerá a um processo estocástico em cadeia para determinar uma mudança no estado ou valor, ao qual se denomina cadeia de Markov. Sendo assim dado um conjunto de n variáveis (Equação 1) (CHING; NG, 2006):

$$\{X^{(n)}, n = 0, 1, 2, 3 \dots\} \quad (1)$$

Assume-se que este conjunto é finito ou contável “M” ou também denominado como o estado do processo. E supondo que existe uma probabilidade fixada P_{ij} neste processo, este não dependente do tempo tal que (Equação 2):

$$P(X^{(n+1)} = i | X^{(n)} = j, X^{(n-1)} = i_{n-1}, \dots, X^{(0)} = i_0) = P_{ij} \quad n \geq 0 \quad (2)$$

Em que $i, j, i_0, i_1, \dots, i_{n-1}$ pertence ao conjunto “M”. Esta expressão pode ser descrita como a condição de qualquer evento futuro, dado qualquer evento passado, e o estado presente $X^{(n)} = j$, é independente do evento passado e depende somente do estado presente.

Inclusive a distribuição condicional do processo no tempo de um estado futuro $X^{(n+1)}$ dado os estados passados $X^{(0)}, X^{(1)}, \dots, X^{(n-1)}$, e o estado presente $X^{(n)}$ é independente dos estados passados, e depende apenas no estado presente. Esta condição é uma característica do processo Markoviano, do qual é um processo sem memória.

Esta probabilidade P_{ij} representa a probabilidade de que o sistema no estado i no tempo n esteja no estado j no tempo $n + 1$. E essa probabilidade deve assumir a condição abaixo (Equação 3):

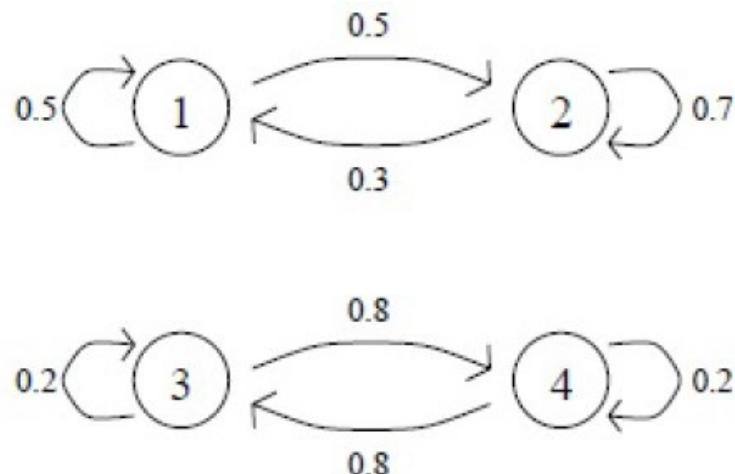
$$P_{ij} \geq 0, \sum_{i=0}^{\infty} P_{ij} = 1, \quad j = 0, 1, \dots \quad (3)$$

Esta probabilidade também é denominada como probabilidade de transição e é desenvolvida através de uma matriz de probabilidade de transição logo havendo estes estados, i e j é possível montar uma matriz P_{ij} denominada como matriz de probabilidade (Equação 4) de transição de um estado para outro (CHING; NG, 2006).

Entretanto ao que antecede a construção desta matriz a cadeia de Markov também pode ser descrita, ou expressa a partir de grafos, ou diagramas de transição de estados, de processos conforme a figura 4 (SILVA, 2017):

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (4)$$

Figura 4 - Grafo apresentando um sistema simples de cadeia de Markov



Fonte: Silva, 2017.

Estes grafos auxiliam na estruturação e na visualização dos processos dada as probabilidades de mudança entre o estado 1 para o estado 2 e do estado 3 para o 4. Na primeira situação existe uma probabilidade $p=0.5$ de a primeira variável manter sua condição inicial e uma probabilidade de $p=0.5$ de alterar para um estado 2. Da mesma forma, a variável 2 tem uma probabilidade $p=0.7$ de manter seu estado inicial e uma probabilidade $p=0.3$ de tornar para o valor da variável 1. Na segunda situação as variáveis 3 e 4 tem probabilidades iguais para alteração ou manutenção do estado inicial ($p=0.8$ e $p=0.2$, respectivamente).

Inicialmente é interessante apresentar as restrições que caracterizam o modelo matemático. Tovler (2016) reforça que compreendendo o processo estocástico pode se dizer que a Cadeia de Markov também é conhecida pela propriedade de não se levar em conta o passado. O processo responsável por prever o futuro é afetado pela situação atual, e independe da forma que estava anteriormente. Sob a condição que se tem o valor atual

de uma Cadeia de Markov, a predição sobre um comportamento futuro, não é alterado conforme informações passadas do mesmo processo.

No trabalho, Nguyen et al. (2019) expõem que em Hanói, cidade do Vietnam, é caracterizada por aspectos de rápida urbanização e vários locais são afetados por esse fenômeno, a cidade conta com um ineficiente planejamento de expansão urbana, e uma recente pressão de crescimento socioeconômica. Tais fatos atuam como importantes princípios para dar início ao uso de técnicas de predição, e os autores desenvolveram no estudo a evolução da expansão urbana em Hanói durante os períodos de 1990 a 2030. A análise espacial considerou dados espacializados de fatores socioeconômicos e impactos ambientais, dos quais permitiram a visualização da evolução deles e a sua influência sobre os recursos naturais. Além disso, os autores utilizaram técnicas de classificação nos mapas para quantificar esses elementos representados em mapas no formato vetorial.

Explicar os fundamentos da cadeia de Markov e suas particularidades é importante para o objetivo da pesquisa. Da mesma forma que o método se baseia em um conjunto de variáveis espaciais que estas serão analisadas no decorrer dos anos para demonstrar a transição destas variáveis ao longo de períodos futuros, um mapa com a classificação de áreas urbanas considerando diferentes classes de uso e ocupação do solo identificadas para um certo ano, pode ser a base para determinar a probabilidade das transições de uma classe de uso do solo para outro ao longo do tempo. Ligando estes fatos Nguyen et al. (2019), apresentam o equacionamento da cadeia e Markov empregada na predição da expansão urbana da cidade de Hanói no Vietnã.

Sendo assim do ponto de vista da expansão urbana, a matriz (P) do processo de uso e ocupação do solo mostra a probabilidade de transição (P_{ij}) de cada pixel na transformação do uso do solo, da classe i para a j .

Logo a probabilidade de mudança das classes é utilizada para projetar um mapa de uso do solo no futuro. Para a distribuição de cada classe no dado tempo $t + 1$, foi projetada adiante no tempo inicial t na matriz de transição P conforme Equações 5, 6, e 7 abaixo:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1 \quad (6)$$

$$P \times M_t = M_{t+1} \quad (7)$$

Onde n_i é o total de números de pixels de classes de uso e ocupação do solo transformadas durante o período de análise; n_{ij} é o número de pixels transformados do uso e ocupação da situação i para a j ; k é o número de classes de uso e ocupação; P é a matriz de probabilidade de transição; e M_t é a distribuição de cada classe de uso e ocupação em um tempo t .

Outro trabalho que utilizou as mesmas propostas do presente estudo, foi realizado por Siddiqui et al. (2017). Os autores analisaram o crescimento urbano para em Lucknow, cidade mais populosa do estado de Uttar Pradesh na Índia, para os anos de 1993, 2003 e 2013, considerando fatores naturais, ações antrópicas, e parâmetro de proximidade, para a predição de 2023. Utilizaram, portanto, como base de dados imagens de satélite Landsat da USGS - *United States Geological Survey* para os anos de 1993, 2003 e 2013.

Logo o uso de Cadeia de Markov descreveu a mudança da vizinhança de um estado para outro, conforme a matriz de probabilidade de transição. Siddiqui et al. (2017) explicam que a Cadeia de Markov demonstra a probabilidade de transição baseado em dois períodos, mas por outro lado não descreve a influência da vizinhança na predição do uso do solo. Os autores ainda relatam que existem falhas nos modelos de forma holística e explícita, e cada modelo preditivo individualmente não pode explicar o padrão de crescimento. Ressaltam que é necessário integrar métodos que possam auxiliar nas questões que impulsionam e desenvolvem processos de expansão urbana.

No trabalho de Hegazy e Kaloop (2015), os autores relatam que o uso de geotecnologias e sensoriamento remoto, fornecem ferramentas essenciais que podem ser aplicadas para identificar mudanças no uso do solo. Com isso os autores detectaram através de dados históricos mudanças entre 1985, 2000 e 2010 para prover uma a predição da mudança das áreas do uso do solo para 2035, para o Egito. Os autores relatam que o cruzamento de dados é necessário para quantificar as conversões de uma determinada cobertura para outra em um período posterior. Desta forma as matrizes de transição

calculam a probabilidade que as classes de uso de solo têm de mudarem uma em relação a outra em um determinado tempo futuro.

Em síntese a combinação análises espaciais, sensoriamento remoto, e análises preditivas para mudanças espaciais, segundo Nguyen et al. (2019), permitem prever as mudanças da mancha urbana de uma cidade em relação a disposição espacial em que se encontra. Isso proporciona um recurso importante para que planejadores possam avaliar e adequar a disposição urbana que antecede o planejamento. Entender a evolução da paisagem urbana, é importante para o desenvolvimento socioeconômico, bem como para a proteção ambiental, além disso fortalece a execução de medidas preventivas para possíveis acidentes urbanos decorrentes da expansão urbana descontrolada que modifica o escoamento superficial.

Com base no que foi exposto acima, pode-se concluir que a cadeia de Markov é uma técnica empregada em determinar a probabilidade como uma variável muda ao longo do tempo. Logo a modelagem da mudança do uso do solo possibilita estimar e quantificar a tendência de expansão de um território em um cenário futuro com base em variáveis de uso do solo (MAHINY, TURNER, 2003; SIDDIQUI et al., 2017). A estimativa do uso e ocupação do solo é uma importante análise para contribuir para cálculos hidráulicos com parâmetros que resultam na determinam a vazão do escoamento superficial. Sendo assim a predição do uso do solo mostrará como o escoamento superficial é alterado no decorrer dos anos na bacia hidrográfica de São Pedro e como este pode este se comporta em cenários futuros de uso e ocupação do solo.

2.4 ELABORAÇÃO DO HIDROGRAMAS DE PROJETO PARA BACIAS URBANAS

Conforme Tucci (2007) os impactos da expansão urbana e a carência sobre ações modificam processos naturais dos sistemas hídricos dentre eles está o escoamento superficial. A área impermeável é a parcela de uso do solo que contribui diretamente para os sistemas de drenagem. No entanto o autor explica que nem todas as áreas impermeáveis contribuem diretamente, pelo fato de que algumas áreas permeáveis receberem parte do escoamento superficial, o que reduz o efeito da urbanização. Ou seja, levando em conta que o impacto da urbanização altera o escoamento superficial, é importante entender de

que forma ele é afetado. E novamente Tucci (2007), explica que um importante fator relacionado ao escoamento superficial e que reflete o impacto da urbanização é o tempo de concentração. Canholi (2014), explica que esse é o tempo necessário que o escoamento superficial tem para percorrer do ponto mais alto até o exutório de uma bacia hidrográfica, e este tempo é reduzido quando ocorre o aumento de zonas impermeáveis.

2.4.1 Cálculo do tempo de concentração (tc)

Para a obtenção do tempo de concentração, Mamédio, Castro e Corseuil (2018) explicam que o cálculo é realizado por equações empíricas que necessitam das características quanto ao uso do solo, e geométricas de uma determinada bacia urbana ou rural no cálculo. No caso do presente trabalho optou se por utilizar equações para bacias urbanas. No entanto, conforme Silveira (2005), existem equações para bacias urbanas que são recomendadas para áreas acima de 11 km² até 50 km², que é o caso da fórmula de Desbordes publicada em 1974. Lhomme, Bouvier e Perrin (2004) ressaltam que a origem da mesma vem da amostragem de 21 bacias localizadas na França, Europa e Estados Unidos, para a criação do método. Os autores explicam que a adoção deste método está relacionada a situações extremas onde não há dados de drenagem disponíveis. Portanto, para o cálculo desta variável a equação necessita do comprimento da declividade do talvegue S (m/m), área total A (km²), e a porcentagem da área impermeável A_{imp} (%) da bacia conforme equação 8. Todos estes parâmetros foram adquiridos através de medições no SIG.

$$T_c = 0,0869 \cdot A^{0,3039} \cdot S^{-0,3832} \cdot A_{imp}^{-0,4523} \quad (8)$$

É importante ressaltar que o intuito da pesquisa é analisar fenômenos naturais que são modificados pela expansão do cenário urbano na bacia de São Pedro, diante deste fato, é de interesse do trabalho testar o tempo de concentração com outras equações conforme quadro 1 por outros autores que desenvolveram o cálculo para bacias rurais e urbanas, com diferentes portes, conforme Silveira (2005) apresenta-os em seu trabalho.

Quadro 1 - Equações para o tempo de concentração.

| Autor | Equação |
|-----------------------------|---|
| Culverts Practice (1955) | $tc = 57 \cdot L^{1,15} \cdot H^{-0,385}$ |
| Ven Te Chow (1962) | $tc = 52,64 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{i}}\right)^{0,64}$ |
| Kirpich (1940) | $tc = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I}\right)^{0,385}$ |
| Picking (Pinto et al (1976) | $tc = 51,79 \cdot \left(\frac{L^2}{I}\right)^{\frac{1}{3}}$ |
| Giandotti (1940) | $tc = \frac{0,0559 \dots (4 \cdot A^5 + 1,5 \cdot L)}{L^{0,5} \cdot S^{0,5}}$ |
| SCS lag (1975) | $tc = 0,057 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7} \cdot L^{0,8} \cdot L^{-0,5}$ |
| Dooge (1956) | $tc = 21,88 \cdot A^{0,41} \cdot i^{-0,17}$ |
| Onda cinemática (1963) | $tc = 447 \cdot \frac{(L \cdot n)^{0,60}}{i^{0,4} \cdot S^{0,3}}$ $i = \frac{K \cdot TR^a}{(b + tc)^c}$ $tc = 447 \cdot \frac{(L \cdot n)^{0,60}}{\left[\frac{K \cdot TR^a}{(b + tc)^c}\right]^{0,4} \cdot S^{0,3}}$ $tc = 57 \cdot \left(\frac{L^2}{I}\right)^{0,385}$ |
| Schaake et al (1967) | $T_c = 0,0828 \cdot L^{0,24} \cdot S^{-0,16} \cdot A_{imp}^{-0,26}$ |
| Carter (1961) | $T_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$ |

Fonte: O autor.

Sendo assim o quadro 1 representa as equações que serão utilizadas no cálculo do tempo de concentração, além disso é possível notar quais são as variáveis adotadas para cada método, como o comprimento do talvegue principal L (m), o desnível entre a parte a montante do talvegue principal até o exutório H (m), o CN médio da bacia. Além

disso os parâmetros K, a, b, c das curvas IDF (intensidade-duração-frequência), das quais serão apresentadas a seguir, bem como o valor n de Manning do canal.

E para prosseguir com o entendimento das curvas IDF para o objetivo deste trabalho Chin (2019), explica que o tempo de concentração é o parâmetro de entrada para a utilização das curvas IDF (intensidade-duração-frequência) em que este tempo também corresponde a duração de um evento de precipitação.

Chin (2019), explica que o tempo de concentração é o parâmetro de entrada para a utilização das curvas IDF (intensidade-duração-frequência) em que este tempo corresponde a duração de um evento de precipitação.

2.4.2 Determinação das curvas IDF (intensidade-duração-frequência)

As curvas IDF's (intensidade-duração-chuva) segundo Canholi (2014), são curvas construídas com base em registros históricos de alturas de precipitação em relação a uma duração. Logo, estes dados são tabulados e processados estatisticamente resultando, originando as curvas IDF (Equação 9).

$$Im = \frac{K \cdot (TR)^a}{(t + b)^c} \quad (9)$$

Em que: Im é a intensidade máxima média de precipitação em $mm\ h^{-1}$; e K , a , b e c , são os parâmetros comentados anteriormente. TR é o tempo de retorno em anos, t é a duração da precipitação em minutos. A duração t conforme dito anteriormente é o resultado do cálculo do tempo de concentração. Por outro lado, o parâmetro TR sobre o tempo de retorno é outro dado que carece de análise para sua definição no cálculo.

Em estações pluviométricas são obtidos os parâmetros K , a , b , e c , e ajustados na equação da IDF por meio de regressão linear e não linear.

Em contrapartida Bemfica, Goldenfum e Silveira (2000), explicam o fato de utilizar estas curvas está na insuficiência de dados, detalhamento de registros de precipitação e a falta de monitoramento em bacias. Os autores ainda reforçam que existe limitação nestas curvas, pelo fato de que estas são uma combinação de valores obtidos de diferentes eventos de precipitação, e dificilmente representam um único evento crítico.

Além disso para Tucci e Marques (2000) comentam que diante das diversas metodologias por trás da obtenção de chuvas de projeto, estes dados poderiam ser utilizados somente após a verificação de sua validade. Porem na elaboração de projetos quando a necessidade de um hietograma, tais projetistas são submetidos ao uso destes dados por falta de opções, além de recorrer a metodologias de outros países que podem não ser aplicados em relação as especificamente às tormentas locais.

2.4.3 *Definição do tempo de retorno*

Conforme Houghtalen, Hwang e Akan (2012), projetar uma estrutura tem como premissa estimar o risco de exceder ou não a capacidade projetada em detrimento de uma eventual inundaçāo. Este risco costuma estar associado ao período de retorno, ou tempo de retorno, do qual é definido como o número médio de anos entre ocorrências de um determinado fenômeno hidrológico, com magnitude igual ou maior que o mesmo. Os autores explicam que este tempo de retorno apresenta a probabilidade de que essa magnitude seja excedida em algum ano, e exemplificam levando em conta um tempo de retorno de 25 anos para o projeto, logo haverá $1/25 = 0,04$ ou 4 % de probabilidade de que esse evento se excedera em algum ano. Logo o tempo de retorno escolhido para realizar a simulação teve fundamento na literatura que sugeriu 25 e 50 anos para aplicação em obras de drenagem, visto que, por ser um trabalho experimental não existe um tempo de retorno determinado para simulações de inundações, logo serão considerados esses dois valores a fim de analisar os resultados obtidos em ambos.

Com a definição de dados como a duração de um evento de precipitação, o apoio das IDF, bem como o tempo de retorno, conforme apresentados anteriormente, o próximo procedimento é a escolha de um método de distribuição temporal, e o adotado neste trabalho foi o método por blocos alternados.

2.4.4 *Método de distribuição: Método por blocos alternados*

Existem métodos que podem ser aplicados para a determinação de uma chuva de projeto. A distribuição temporal destas chuvas por blocos alternados, é feita como premissa fundamental as curvas IDF. O método por blocos alternados origina o que é

definido como o hietograma de projeto, ou seja, conforme Bemfica, Goldenfum e Silveira (2000), é uma forma gráfica que irá apresentar a intensidade da chuva em uma dada duração.

Bemfica, Goldenfum e Silveira (2000) explicam que esta chuva de projeto, vem da definição da duração total da chuva, e o tempo de retorno, e são calculadas com o apoio das curvas IDF, conforme apresentadas anteriormente. O resultado do cálculo é a intensidade para diferentes durações até a duração total, que posteriormente são transformadas em alturas de chuva que apresentam os valores acumulados até o intervalo final.

A obtenção de um hietograma de projeto, é o dado principal para a criação de um hidrograma de projeto. Este hidrograma, no entanto, também necessita de dados relacionados as superfícies de escoamento. Estes dados são o CN e o coeficiente de Manning, e são analisados conforme o uso e ocupação da bacia hidrográfica, além disso o objetivo do trabalho é relacionar estes dois dados, com a expansão urbana no decorrer dos anos.

2.4.5 *Estimativa da CN para a área urbana da bacia de São Pedro*

O estudo sobre o coeficiente Curva Número (CN) faz parte do desenvolvimento do hidrograma unitário ou de projeto pelo método SCS (*Soil Conservation Service*), onde McCuen (1998) analisou uma variedade de tipos de solos e coberturas de vegetações no intuito de avaliar a capacidade de armazenamento ou infiltração indicando um coeficiente CN, e foram identificados como A, B, C e D (Quadro 1) onde capacidade de infiltração diminui de A para D. McCuen (1998) explica que valor da CN indica a capacidade de infiltração do escoamento em um tipo de solo ou cobertura vegetal (Quadro 2). Onde S é a inclinação da superfície de cobertura em m/m.

$$CN = \frac{100}{(1 + \frac{10 \log S}{254})} \quad (10)$$

Quadro 2 - Grupo de solos e características do solo.

| Grupo do solo | Características do solo |
|---------------|--|
| A | Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila. |
| B | Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média. |
| C | Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo. |
| D | Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial. |

Fonte: Tucci et al, 1993. Adapt. Borges, 2018.

Na literatura encontra-se os valores de CN tabelados (Quadro 2) com as características de cada grupo de solos, e quando assimilado ao tipo de uso de solo em questão. Utilizando a mesma metodologia dentro do SIG, para se obter o valor médio de CN, a mesma análise de verificação de áreas de uso de solo foi replicada para a obtenção do valor de Manning (Tabela 1) que também é utilizado nas equações a seguir. Nesta etapa esses dados foram responsáveis por se obter o tempo de concentração na bacia de São Pedro.

Tabela 1 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

| Uso e ocupação do solo | Tipos de solo | | | |
|--|-------------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Zonas cultivadas: | Sem conservação do solo | 72 | 81 | 88 |
| | Com conservação do solo | 62 | 71 | 78 |
| Pastagens ou terrenos baldios | Em más condições | 68 | 79 | 86 |
| | Em boas condições | 39 | 61 | 74 |
| Prado em boas condições | | 30 | 58 | 71 |
| Bosques ou zonas florestais | Cobertura ruim | 45 | 66 | 77 |
| | Cobertura boa | 25 | 55 | 70 |
| Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios (em boas condições) | Com relva mais de 75% de área | 39 | 61 | 74 |
| | Com relva 50 a 75% de área | 49 | 69 | 79 |
| Zonas comerciais, escritórios | | 89 | 92 | 94 |
| Zonas industriais | | 81 | 88 | 91 |
| Zonas residenciais | | 93 | | |

| | | % média | | | | |
|--|---------------------------------|---------|----|----|----|--|
| Tamanho do lote (m ²) | impermeável | | | | | |
| Até 500 m ² | 65% | 77 | 85 | 90 | 92 | |
| 500 a 1000 m ² | 38% | 61 | 75 | 83 | 87 | |
| 1000 a 1300 m ² | 30% | 57 | 72 | 81 | 86 | |
| 1300 a 2000 m ² | 25% | 54 | 70 | 80 | 85 | |
| 2000 a 4000 m ² | 20% | 51 | 68 | 79 | 84 | |
| Estacionamento pavimentados, viadutos, telhados etc. | | | | | | |
| Ruas e estradas | Asfaltados com drenagem fluvial | 98 | 98 | 98 | 98 | |
| | Pavimentadas de paralelepípedos | 76 | 85 | 89 | 91 | |
| | De terra | 72 | 82 | 87 | 89 | |

Fonte: Tucci (1993).

A tabela 1 acima contém os valores de CN para cada tipo de uso e ocupação do solo, estes são utilizados levando em conta o quadro 2 e indicando o grupo de solo hidrológico e assim definindo um valor de CN para a área a ser analisada.

2.4.6 Determinação do coeficiente de Manning para obtenção do hidrograma e simulações

O coeficiente de n de Manning (Equação 11) é outro parâmetro necessário para o modelo hidrológico que relaciona o escoamento precipitado com a superfície. Além disso Tomaz (2013) explica que pode ser empregado no cálculo do escoamento em galerias, canais, e sarjetas, e com o cálculo da velocidade levando em conta o comprimento da superfície, tem se o tempo de escoamento da água da chuva.

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (11)$$

Em que: V é a velocidade média na seção (m/s), n é o coeficiente de Manning, R é o raio hidráulico, (m), e S é a declividade do canal (m/m).

Por outro lado, Baptista e Lara (2010) dizem que existe dificuldade na fixação deste coeficiente de rugosidade, de forma que a adoção de um coeficiente adequado pode ser um tanto subjetiva, pelo fato de estar relacionada com a vivência e a prática do engenheiro hidráulico.

Tabela 2 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

| Material do Solo | Valores de “n” recomendado | Faixa de valores de “n” |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Concreto | 0,011 | 0,01 a 0,013 |
| Asfalto | 0,012 | 0,01 a 0,015 |
| Areia exposta | 0,010 | 0,010 a 0,016 |
| Solo pedregulhoso | 0,012 | 0,012 a 0,030 |
| Solo argiloso descoberto | 0,012 | 0,012 a 0,033 |
| Terreno sem cultura | 0,05 | 0,006 a 0,16 |
| Terra armada | 0,06 | 0,02 a 0,10 |
| Pastagens naturais | 0,13 | 0,01 a 0,32 |
| Pastagens cortadas | 0,08 | 0,02 a 0,24 |
| Grama | 0,45 | 0,39 a 0,63 |
| Grama curta | 0,15 | 0,10 a 0,20 |
| Grama densa | 0,24 | 0,17 a 0,30 |
| Grama bermuda | 0,41 | 0,30 a 0,48 |
| Florestas | 0,45 | |

Fonte: *Florida Department of Transportation Drainage Manual* (2017). Adapt. Autor (2019).

A tabela 2 acima define o valor n de *manning* para o tipo de cobertura, esse valor deve considerar toda extensão do talvegue em analise bem como as coberturas nas margens esquerda e direita, e a característica da calha principal. Contudo McCuen (1998), ressalta que existem três procedimentos dos quais pode auxiliar na adoção do valor de rugosidade de Manning. O primeiro está na consulta de tabelas existentes, o segundo é por meio de fotografias, e o terceiro é pela observação das regularidades do canal, a variação da forma e da seção, e ao conhecimento de vegetação e meandros. Conhecendo através SIG estas variáveis que se relacionam com as características físicas de uma determinada bacia, o cálculo do hidrograma de chuva-vazão tem os parâmetros necessários para serem aplicados no seu equacionamento.

2.4.7 Aplicação do método Santa Bárbara SBUH para a obtenção do hidrograma da simulação

Tucci (2007) mostra que o controle preventivo é feito simulando medidas no intuito de apoiar o planejamento urbano minimizando custos, e prejuízos futuros. E para que esse tipo de prognostico seja elaborado, são utilizados modelos hidrológicos de chuva-vazão dos quais que basicamente necessitam do uso de estatísticas estacionarias para dados de precipitação de projeto, características físicas da bacia, e as condições de urbanização. O método santa barbara é um destes métodos existentes, destas variáveis tal como as ditas anteriormente, e o proposito deste capítulo é mostrar o processo de aquisição destes parâmetros até o modelo hidrológico de chuva-vazão.

A concepção por trás do hidrograma unitário do qual é determinado através de uma função para converter um hietograma de chuva excedente em um hidrograma de projeto pode ser estabelecido através do método Santa Barbara, que segundo Canholi (2014), foi desenvolvido por Stubacher (1975) no *Santa Barbara Country Flood Control and Water Conservation District*. O método proposto considera que o sistema de drenagem está associado a parcela impermeável da bacia hidrográfica, e as perdas iniciais da precipitação por abstração são desprezadas. O cálculo inicial necessita da precipitação e esta variável é calculada a partir da definição da intensidade i (mm/h) encontrada através da IDF no método de distribuição por blocos alternados. Sendo assim o cálculo da precipitação se dá pela equação abaixo:

$$P(t) = i(t) \cdot \frac{t}{60} \quad (12)$$

Onde $i(t)$ é a intensidade em (mm/h), t é o intervalo da discretização do tempo, dividido por 60 minutos.

Através dos resultados deste cálculo para cada intensidade encontrada calcula-se a precipitação acumulada. Além disso a fim de determinar as perdas nas áreas permeáveis Canholi (2014) afirma que essas perdas são determinadas pelo método SCS-CN *Soil Conservation Service - Curve Number*. Para a consonância destes métodos é calculado o potencial de infiltração e armazenamento no solo, através da equação 13, uma vez que já foi estipulado o CN, em função do uso e ocupação do qual a bacia se encontra.

Em seguida é estimado as perdas iniciais por abstração, pela equação 14 do qual possibilita a verificação do momento que houve escoamento superficial nos locais onde há infiltração (áreas permeáveis), logo só vai haver escoamento superficial apenas se a precipitação acumulada for superior ou igual às perdas iniciais (Equação 14). Este método é necessário para o cálculo da precipitação efetiva para separar a retenção máxima potencial (Equação 15) após o início de escoamento, em outras palavras separar o que foi escoado do que foi infiltrado no solo.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (13)$$

$$Ia = 0,2 \cdot S \quad (14)$$

$$Pef = \frac{(P - Ia)^2}{p + 0,8S}, \text{ se } P \geq Ia; 0 \quad (15)$$

Onde S , Ia , e Pef em milímetros.

Sendo assim Houghtalen, Hwang e Akan (2012), afirma que o que não se transforma em escoamento está ligado a forma coletiva às perdas da chuva, e tais perdas são decorrentes de interceptação, depressão, armazenamento, evaporação transpiração e infiltração. Os autores afirmam que em relação as chuvas projetadas, a evaporação e a transpiração construam ser desprezíveis. Portanto o SCS desenvolveu o parâmetro CN, Curva número, cujo varia de 0 a 100 e está relacionado as condições precedentes ao solo, ao que condizem com as condições de umidade, grupo do solo, do tipo de cobertura do solo, além de sua condição, e dos percentuais de áreas permeáveis na bacia.

Ao serem calculadas as precipitações efetivas para cada instante de tempo a fim de admitir a condição $P \geq Ia; 0$, divide-se o valor pela discretização de tempo escolhida, e converte o valor em horas resultando-se na precipitação efetiva incremental, i_e (mm/h), do qual faz parte do cálculo da ordenada do hidrograma, conforme equação 16 abaixo:

$$I = [i \cdot d + i_e(1,0 - d)] \cdot Ad \quad (16)$$

Em que: I é a ordenada do hidrograma instantâneo em m^3/s , i é a intensidade de precipitação em milímetros, d é a parcela de área impermeável, i_e a precipitação excedente da área permeável em milímetros por hora, Ad a área total de drenagem em km^2 .

Portanto a compreensão do método Santa Barbara, segundo Canholi (2014), parte pressuposição que a combinação de deflúvios vindos de áreas permeáveis e impermeáveis, este desenvolve um hidrograma instantâneo das vazões excedentes.

Sendo assim ao se levar em conta um reservatório imaginário pertencente a este modelo considera-se que há volumes afluentes e vazões efluentes no reservatório, portanto a partir do momento que tem se os valores de I (Equação 16) é possível calcular a quantidade de vazão efluente. Um parâmetro necessário para realizar este cálculo é a constante de amortecimento K_r (Equação 17) onde (Δt) é um estante de tempo (min), K é uma constante igual ao tempo de concentração da bacia (min). Finalizando o cálculo da vazão efluente $Q(t)$ em m^3/s (Equação 18) na saída do reservatório ou no exutório de uma bacia hidrográfica.

$$K_r = \frac{\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (17)$$

$$Q(t) = Q_{t-1} + K_r(I_1 + I_2 - 2Q_1) \quad (18)$$

Por fim, este é todo o procedimento do qual irá gerar um hidrograma de saída no exutório de uma bacia hidrográfica. Este hidrograma mostra como a vazão de pico do escoamento superficial irá desenvolver com a mudança do uso do solo, no decorrer dos anos. Este dado é importante para complementar a ideia de como a predição que está por trás da modelagem da mudança do uso do solo pela cadeia de Markov, pode influenciar na predição do hidrograma para os anos entre 2018 e 2058, em intervalos de 10 anos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

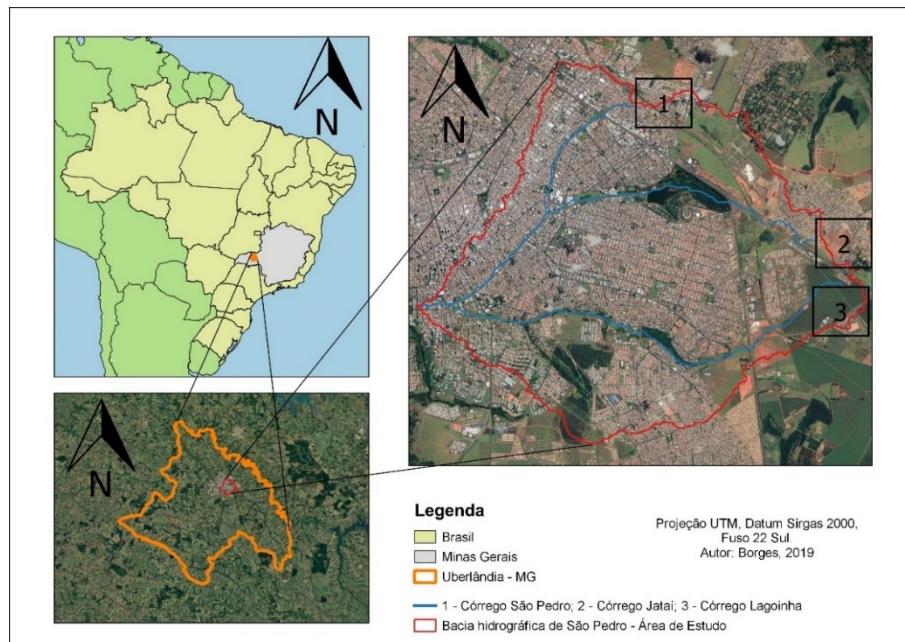
Segundo IBGE (2018), o município de Uberlândia – MG (Figura 5), está localizado na Mesorregião do triangulo mineiro, no estado de Minas Gerais. Suas coordenadas geográficas são dadas pela latitude $18^{\circ} 56' 38''$ Sul e longitude $48^{\circ} 18' 39''$ Oeste, com altitude de 863 metros.

O clima é típico tropical semiúmido, o inverno apresenta um tempo seco, e no verão é quente e chuvoso. Contudo a fim de caracterizar a área de estudo, é importante

discorrer sobre características geográficas, físicas, e do meio ambiente na região do município de Uberlândia e da bacia de São Pedro. Segundo dados do IBGE (2018), o município de Uberlândia tem área territorial de 4.115,09 km² com densidade demográfica de 146,78 hab/km². A área urbana compreende 219 km² e a área rural possui 3.896,09 km².

O histórico de ocupação de Uberlândia mostra ser especulativo, pela existência de loteamentos clandestinos e irregulares, alguns deles em processo de regularização, conforme Marques (2018). Vergütz (2016) afirma que devido a este processo de ocupação dentre diversos fatores ligados ao crescimento urbano, o município de Uberlândia – MG apresenta a ocorrência de inundações em magnitudes significativas. A região em vermelho mostrada na figura 5 compreende a bacia do São Pedro, local que se caracteriza como a área de estudo justamente por esse histórico de inundações comentado pela autora e por fatores ligados ao uso e ocupação desta região.

Figura 5 – Figura do mapa da localização da área de estudo.



Fonte: O autor.

Vergütz (2016) expõe que a Avenida Governador Rondon Pacheco foi construída sobre o córrego São Pedro conforme pode ser identificado pelo número 1 na figura 5, e

se caracteriza como uma das vias principais da cidade, e é um local que sofreu ocupações dado ao crescimento populacional.

Marques (2018) esclarece que o crescimento populacional foi um dos diversos fatores que impactaram no ordenamento urbano da cidade de Uberlândia – MG de maneira irregular. É importante ressaltar que a ocorrência de loteamentos irregulares e clandestinos, interferem negativamente no planejamento da cidade, e na gestão das políticas públicas.

IBGE (2018) mostra que o município de Uberlândia passou por um declínio no crescimento populacional após a década de 1991 até 2018, no entanto a população teve um crescimento de três vezes em sua grandeza, neste período do qual se enquadra o período de estudo para as análises na tabela 2.

Tabela 3 - Crescimento populacional de Uberlândia - MG entre 1980 e 2018.

| Ano | População (Hab.) | Crescimento populacional ao passar dos anos (% em relação a 1980) |
|------|------------------|---|
| 1980 | 231598 | --- |
| 1991 | 358165 | 55% |
| 2000 | 501214 | 116% |
| 2018 | 683247 | 195% |

Fonte: IBGE, censos demográficos, 1970/2010 e estimativa para 2018.

O crescimento populacional apresentado na tabela 2 reflete o fenômeno da ocupação de áreas estas áreas estas que por sua vez podem ser situadas em bacias hidrográficas. E o município de Uberlândia-MG está compreendido na bacia do rio Parnaíba possuindo em todo seu território sub-bacias. Dentre estas bacias há a bacia de São Pedro (Figura 6), que possui uma área de aproximadamente 49,0 km² e é formada por três córregos, sendo o principal o córrego de São Pedro, receptor dos córregos Jataí e Lagoinha.

Uma das motivações por se utilizar a bacia de São Pedro é apoiada por Caixeta e Nishiyama (2015), que relatam que ao longo dos anos a bacia possui um histórico de inundações catastrófico. Por isso em consequência deste histórico, e pela abordagem dada

no presente estudo sobre a junção de análises espaciais com análises preditivas, e as modelagens hidráulicas e simulações proporcionadas pelo HEC-RAS, representa uma proposta importante na visualização do quanto comprometido está o uso do solo na área de estudo no decorrer dos anos. E uma estimativa de quanto o escoamento superficial modificará ao passar dos anos.

Caixeta e Nishiyama (2015) relatam que houve o procedimento de canalização do rio São Pedro, na Avenida Rondon Pacheco, no início de 1980. Contudo, sobre às características de ocupação da bacia, Rodrigues e Soares, (2003) expõem que o processo resultou na construção de mais vias de circulação de trânsito. Logo, a medida encontrada foi construir novas avenidas, ocasionando o fechamento de cursos d'água, e dentre eles o córrego São Pedro, do qual foi canalizado.

Quanto a geomorfologia da cidade, o município de Uberlândia possui relevo típico de chapada e que segundo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) pode também ser definido como tabuleiro. Este tipo de relevo possui topografia plana, com declividade média inferior a dez por cento, além de superfícies inferiores a dez hectares, terminadas de forma abrupta em escarpa, com grandes superfícies a mais de seiscentos metros de altitude. Desta forma Bonito (2011), complementa que no território überlandense aproximadamente 70% do território é ondulado, e apenas 30% é planificado. Caixeta e Nishiyama (2015) explicam que estas características ligadas a topografia do município propiciam um aumento da velocidade no escoamento superficial.

3.2 MATERIAIS

Para o sensoriamento remoto foram utilizadas imagens da série Landsat (Tabela 4) para os anos de 1998, 2008 e 2018, no entanto para os dois primeiros anos o sensor responsável foi o programa foi o Landsat 5 TM, e para 2018 o Landsat 8. De acordo com EMBRAPA (2019), o sensor do programa *Landsat 5* denominado como TM (*Thematic Mapper*), foi o responsável por captar as imagens no período de 1998 a 2008. O *Landsat 8*, esta missão deu continuidade as atividades dos satélites anteriores, iniciada em 11 de fevereiro de 2013. O satélite opera com os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), e com esses sensores foi possível adquirir a imagem mais recente para a pesquisa do ano de 2018.

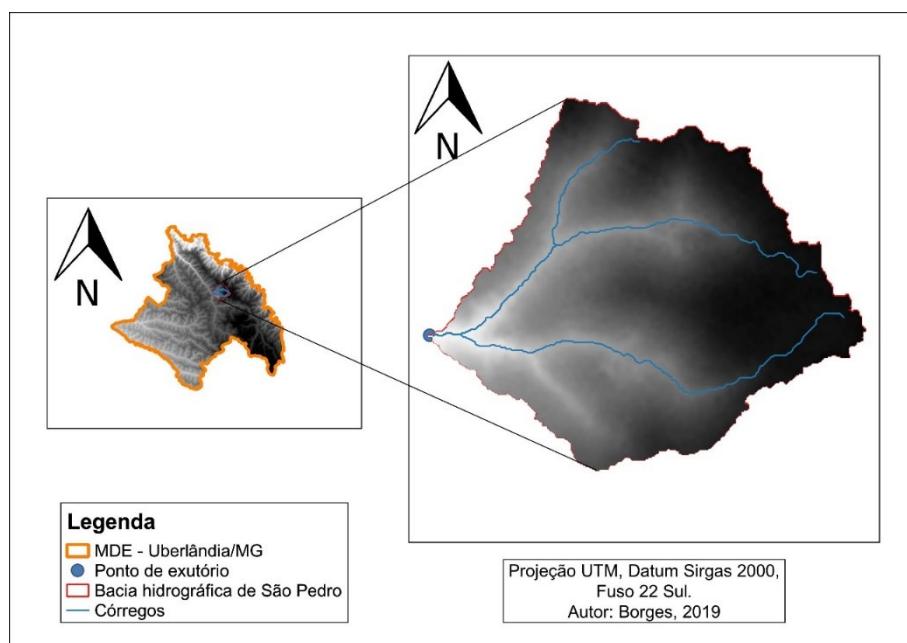
Tabela 4 - Características dos dados de sensoriamento remoto

| Imagen | Fonte | Resolução | Data |
|---------------|-------|-------------------------------|------------|
| Landsat 5 TM | USG | 30 metros | 20/07/1998 |
| Landsat 5 TM | USG | 30 metros | 15/07/2008 |
| Landsat 8 OLI | USG | 15 metros (PAN), 30 metros | 21/07/2018 |

Fonte: USG, 2018. Org. Borges, 2018.

Chaves et al. (2016), comentam que o projeto TOPODATA iniciado em 2008 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), visa mapear, caracterizar, e fornecer dados geomorfológicos de todo território nacional. Portanto, os dados do modelo digital de elevação (MDE) do município de Uberlândia - MG (Figura 6) foram disponibilizados gratuitamente pelo projeto TOPODATA (2008). Estes são procedentes de um processo de refinamento das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que realiza uma conversão de resoluções. As imagens originais passaram por tratamento de forma a se obter resolução de 30 m, pelo método de interpolação Krigagem (VALERIANO, 2004). As imagens de 1998, 2008 e 2018, foram projetadas no Datum Sirgas 2000 na zona UTM 22 sul (Figura 6).

Figura 6 - Modelo de elevação da bacia de São Pedro.



Fonte: TOPODATA – DRS – INPE.

Para a área de estudo em Uberlândia (Figura 6) foi necessário a criação do mosaico de quatro cenas do projeto TOPODATA - DSR/INPE sendo elas 18S495, 18S48_, 19S495 e 19S48_, na escala de 1:50.000. O procedimento de criação de mosaico, georreferenciamento, e criação de curvas de nível, foi realizando no software QGIS 3.10. O mapeamento das ruas avenidas e rodovias existentes no município de Uberlândia-MG também foi necessário para ser utilizado posteriormente. Os mapas são adquiridos em formato vetorial (.shp) através do banco de dados existente no projeto *OpenStreetMaps*.

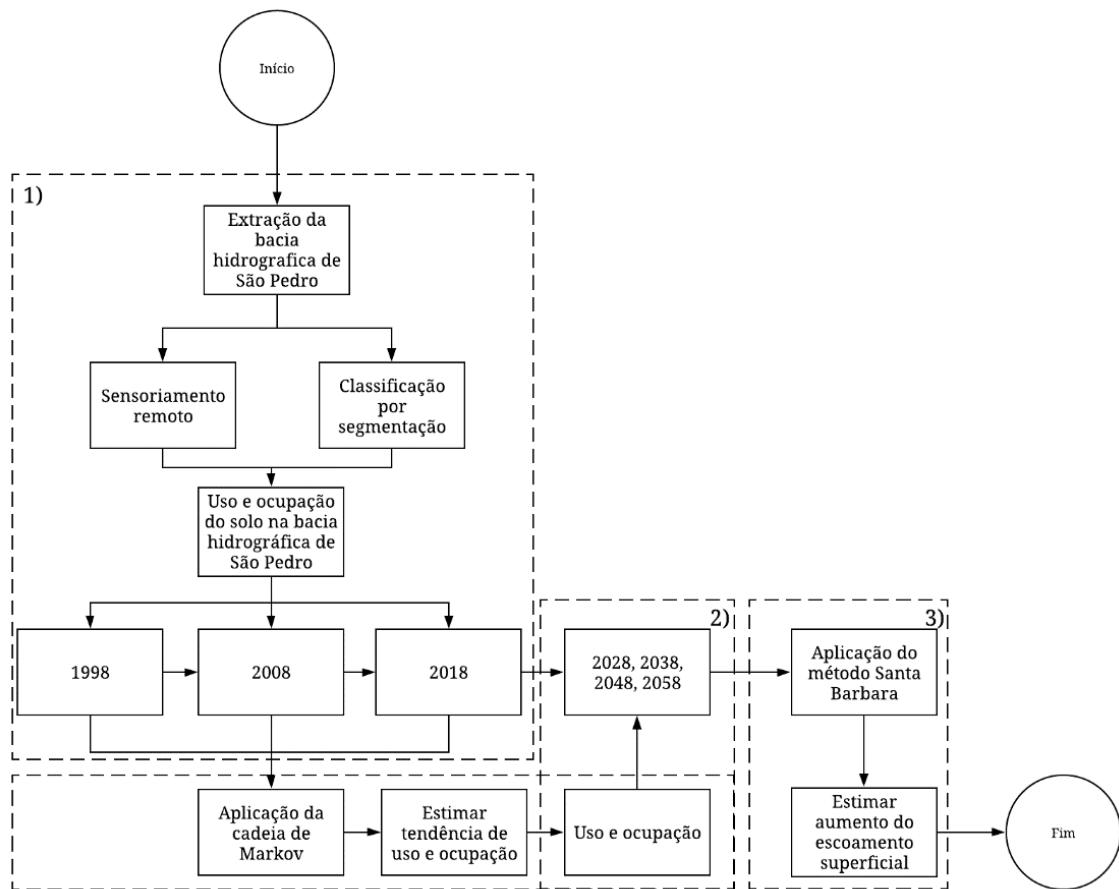
Foi também utilizado o Terrset que é um software que incorpora outras ferramentas de processamento para diferentes aplicações no contexto de uso e ocupação do solo, e os modelos preditivos. No Terrset foi utilizada a ferramenta de modelagem de mudanças espaciais, (*Land Change Modeler - LCM*), que analisa mudanças na cobertura do solo e projeta mudanças futuras com base na Cadeia de Markov, onde se encontra o objetivo principal da pesquisa.

A metodologia de pesquisa que abrange a hidrologia e hidráulica contou com o uso de curvas IDF que são curvas de intensidade-duração-frequência, que serão utilizadas nos cálculos para a obtenção do hidrograma de projeto. Estas curvas foram adquiridas pelo software Pluvio 2.1 desenvolvido pelo grupo de pesquisas em recursos hídricos DEA-UFV (URL: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>).

3.3 METODOLOGIA

A partir dos materiais apresentados na seção anterior a metodologia da pesquisa foi aplicada conforme figura 7, onde é apresentado um fluxograma que define de um modo geral as etapas do trabalho para o resultado esperado.

Figura 7 - Modelo de elevação da bacia de São Pedro.



Fonte: O autor.

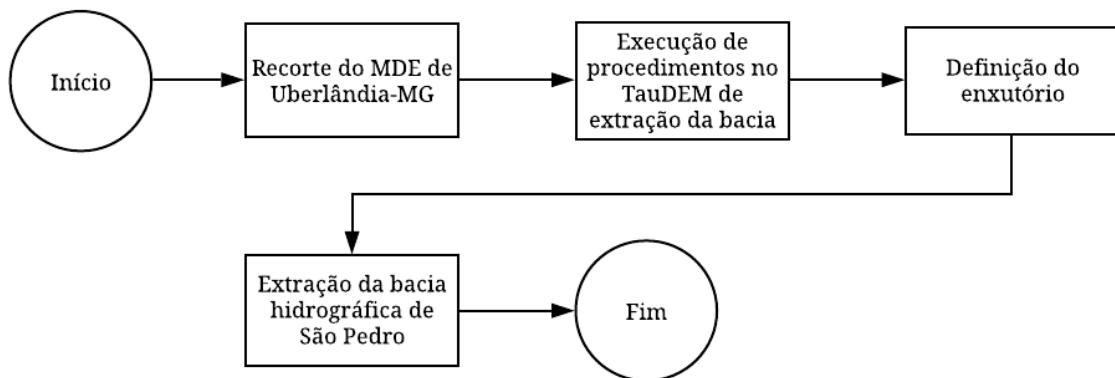
A figura 7 acima apresenta de modo geral as três etapas, que resultaram na análise da tenência da expansão urbana pela Cadeia de Markov e a utilização do método Santa Barbará para o cálculo da vazão no exutório da bacia hidrográfica de São Pedro no município de Uberlândia. Este estudo inicialmente depende das imagens adquiridas por sensoriamento remoto dos anos de 1998, 2008 e 2018 para o município de Uberlândia-MG. É importante ressaltar que o intervalo de tempo foi padronizado conforme verificado nos trabalhos de Lu, Joyce, Imen e Chang (2017) e Radwan, Blackburn, Whyatt e Atkinson (2019) e que tais autores assumiram o mesmo intervalo de anos para cada cenário de uso e ocupação do solo. Com a aquisição do modelo digital de elevação foi possível extrair a bacia hidrográfica de São Pedro que é delimitada como a área de estudo (figura 6). Portanto com esta delimitação foi possível classificar o uso e ocupação nos anos de 1998, 2008 e 2018 conforme procedimento 1) e submetê-los no software Terraset

para a análise da tendência de expansão na bacia nos decênios de 2028, a 2058 conforme procedimento 2). Essa análise proporcionou parâmetros que foram utilizados nos cálculos do tempo de concentração, no hietograma de intensidade de precipitação, e por fim no método Santa Barbara.

3.3.1 Extração da área de estudo

A primeira etapa da metodologia veio da delimitação da área de estudo, e esta etapa será viabilizada a partir da extração da bacia de São Pedro. A extensão TauDEM 5.1.2 (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) compatível com o QGIS, promoveu essa extração por meio de uma série de procedimentos aplicados no Modelo Digital de Elevação (MDE) que são apresentados na figura 8.

Figura 8 - Metodologia para a extração da bacia de São Pedro



Fonte: O autor.

A figura 8 representa o procedimento para extração da bacia hidrográfica de São Pedro, no entanto, inicialmente houve a necessidade de criar um mosaico com as 4 imagens adquiridas no TOPODATA, sendo elas 18S495, 18S48_, 19S495 e 19S48_. Este mosaico abrange outros territórios além de Uberlândia – MG, logo a delimitação do território de Uberlândia -MG foi obtida através do georreferenciamento com o mosaico.

Com o georreferenciamento, o resultado foi o MDE de Uberlândia – MG onde a partir da execução do procedimento da extensão TauDEM que se baseia na acumulação de fluxos, foi definido o exutório da bacia hidrográfica de São Pedro, e assim foi extraída a bacia hidrográfica de São Pedro.

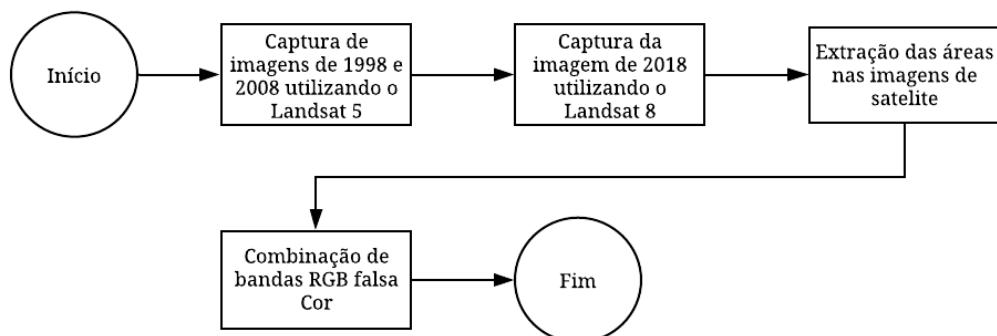
Essa série de procedimentos (Figura 8) resultou na delimitação da área de estudo. Este arquivo vetorial será o recorte das imagens obtidas pelo sensoriamento remoto, e posteriormente a classificação por segmentação e as demais análises espaciais.

3.3.2 *Obtenção das imagens por sensoriamento remoto*

O sensoriamento remoto foi um procedimento que proporcionou a captura das imagens dos períodos anteriores e atual do uso e ocupação do solo de Uberlândia-MG. No entanto, uma vez que o procedimento e extração da bacia gerou o recorte da área de estudo, este foi utilizado para delimitar a área para as combinações espectrais e posteriormente a classificação supervisionada do uso do solo.

Com a aquisição destas imagens (Figura 9) foram feitas composições com suas bandas espectrais, a fim de se obter a combinação de bandas que melhor proporciona a visualização das parcelas de uso do solo. A combinação que melhor atendeu a análise foi a de falsa cor.

Figura 9 - Sensoriamento remoto aplicado para viabilizar a classificação dos mapas



Fonte: O autor.

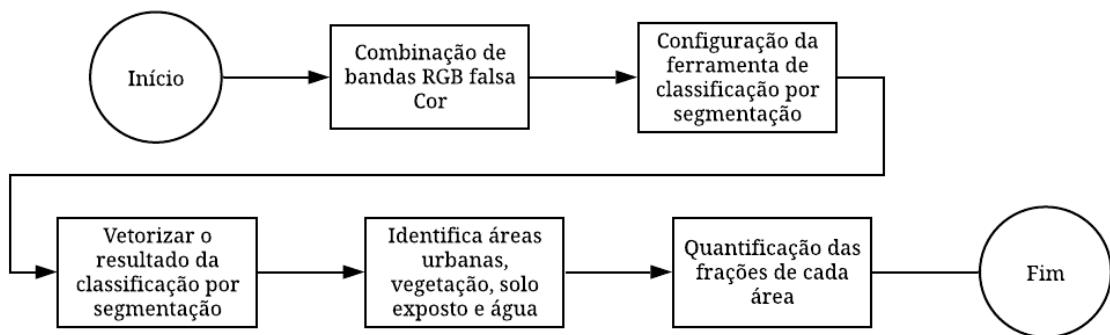
A figura 9 define como foi sensoriamento aplicado nas imagens e conforme dito anteriormente, o motivo dessa escolha se deu pelo fato de que é possível identificar separadamente as áreas, urbanas, a vegetação, o solo exposto, e a água. Este processo foi realizado no software QGIS 3.10 e os mapas exportados para aplicação dos métodos posteriores.

3.3.3 Classificação de imagens por segmentação

A classificação por segmentação conforme a figura 10, então seleciona os padrões de cada tipo de classe dentro de uma determinada característica espectral, e secciona-as a partir de polígonos, separando-os de forma isolada.

O nível de detalhes selecionado em uma determinada imagem depende da configuração do algoritmo dentro do QGIS 3.10, sendo que essa configuração pode identificar mais ou menos os padrões espetrais. Assim o restante do processo é feito visualizando e classificando as feições pontualmente e denominando-as como, área urbana, vegetação, solo exposto, e água, para os anos de 1998, 2008, e 2018.

Figura 10 - Procedimento para o método de classificação de imagens por segmentação



Fonte: O autor.

A figura 10 indica que houve a configuração da ferramenta de classificação por esse motivo alguns testes foram feitos dentro deste recurso de segmentação no intuito de viabilizar a classificação generalizada das classes, fazendo com que o algoritmo identifique de forma homogênea as classes de área urbana, vegetação, solo exposto e água. Estas áreas foram quantificadas e esse procedimento se deu pelo SIG QGis 3.10 onde cada um dos *shapefiles*, contém uma tabela de atributos que apresenta o valor das áreas de uso do solo com dados tabulados. Estes valores foram exportados em planilhas para serem usados nas demais etapas do estudo e como dados de comparação.

As características físicas da bacia e as frações de cada tipo de uso do solo, foram os parâmetros utilizados no cálculo referente à mudança do tempo de concentração e a variação do pico de vazão no decorrer dos anos. A obtenção deste pico de vazão faz parte dos hidrogramas de projeto obtidos pelo método Santa Barbara. O método Santa Barbara

demonstra a evolução do hidrograma de vazão na bacia de São Pedro em de Uberlândia – MG, bem como no futuro.

3.3.4 *Processo de determinação do hidrograma para a simulação*

A determinação do hidrograma de projeto que evidenciou a evolução do escoamento superficial na bacia hidrográfica de São Pedro, contou primeiramente com o auxílio do SIG. O software QGIS 3.10 determinou as áreas de uso e ocupação do solo, bem como a fração existente de cada um sobre a área total.

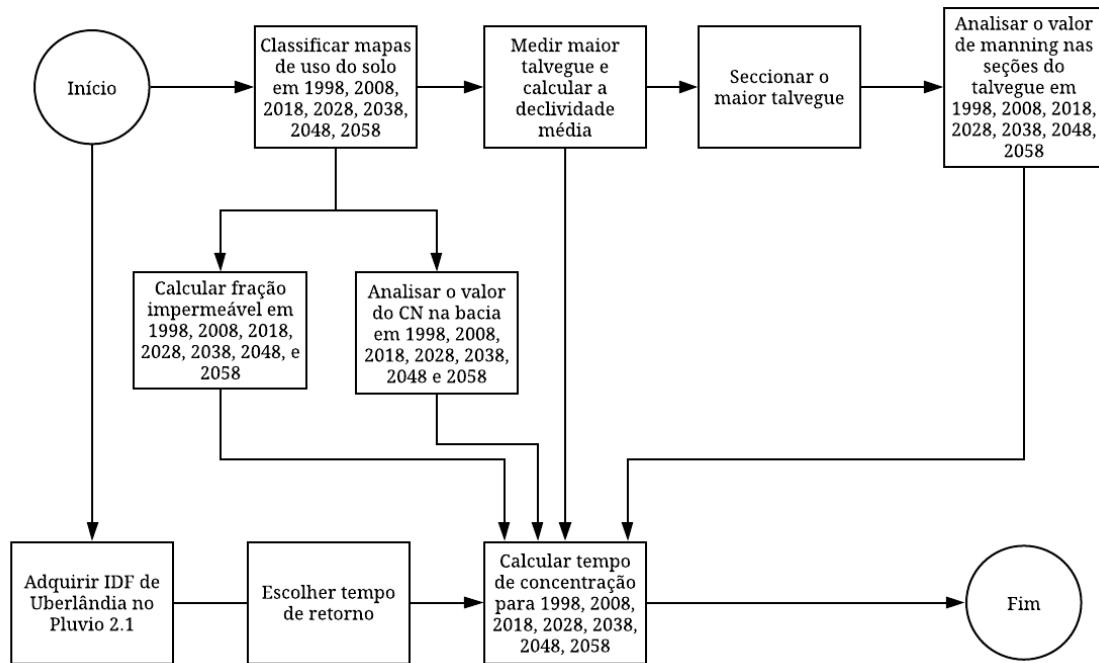
A calculadora *raster* do QGIS 3.10 calcula a área de cada uma das classes de uso do solo, água, vegetação, solo exposto, e área urbana, em forma de dados tabulados. Destes dados a fração de área impermeável, da qual foi considerada a área urbana, é necessária para o cálculo do tempo de concentração. Mas a análise do uso do solo ainda é necessária para quantificar os valores de Curva Número e coeficiente de rugosidade *manning*. Para isso foi escolhido com base na literatura existente o maior talvegue e quantificada sua distância (TUCCI 2013). O talvegue foi seccionado, e as suas seções, compreenderam as margens esquerda, direita, e no meio da calha principal. Analisando cada seção foram definidos os valores de Manning para cada uma destas partes, e feito uma média ponderada em relação as distâncias entre as margens com o intuito de definir um valor médio de Manning.

A análise e a obtenção do valor de CN abrangeu toda a bacia e sua metodologia foi apoiada em duas pesquisas de Andrade (2005) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005). Andrade (2005), realizou o mapeamento geotécnico de Uberlândia, logo é possível descobrir o tipo de solo para cada região de Uberlândia-MG, no entanto limitado a delimitação da bacia de São Pedro. O outro trabalho foi de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), que classificaram hidrologicamente os solos do estado de São Paulo nos grupos A, B, C e D (Quadro 2). A escolha deste trabalho se deu da similaridade entre os solos existentes no estado de Minas Gerais, e São Paulo, outro fato que reforçou o uso desta alternativa é a falta de estudos existentes no município de Uberlândia-MG, que classificam hidrologicamente os tipos de solos existentes. Logo, com a sobreposição destes estudos foi elaborado um mapa e quantificadas as áreas de cada de tipo de solo,

com seus respectivos grupos de solo. Feito isso, uma média ponderada que relacionou a o tipo de CN com o valor da área do qual ele pertence para a definição de um único valor.

Outro dado importante para iniciar o equacionamento do hidrograma foi a aquisição das curvas IDF. Estas IDF estão disponíveis para as principais cidades do país graças ao software Pluvio 2.1 desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos DEA da Universidade Federal de Viçosa - UFV. As IDF, foram utilizadas no tempo de concentração, e depois no método de distribuição por blocos alternados, que é o método responsável pela obtenção do hietograma de projeto. É importante ressaltar que o método de distribuição temporal necessita da duração de uma chuva hipotética, e esta duração considera o tc , que foi calculado anteriormente. A figura 11 apresenta os passos para cálculo do tc (Tempo de Concentração).

Figura 11 - Etapas do cálculo do tempo de concentração em cada ano

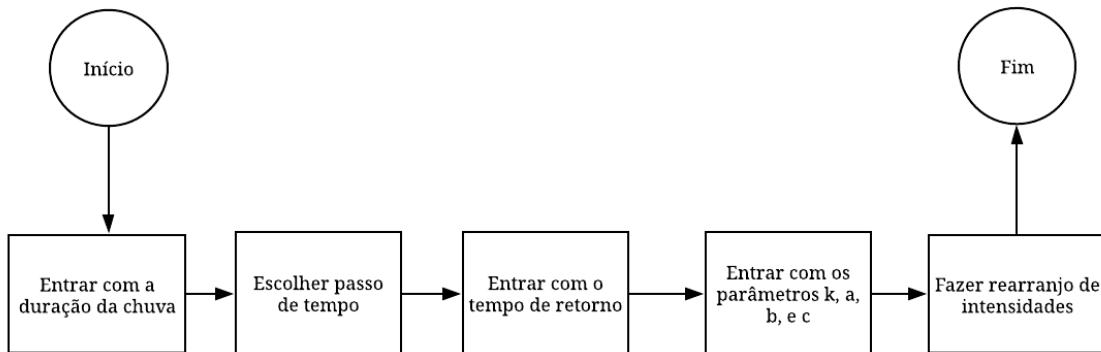


Fonte: O autor.

A figura 11 indica que após realizar o cálculo do tempo de concentração, é possível aplicar o método de distribuição temporal escolhido para o presente trabalho. O método dos blocos alternados segundo Benfica, Goldenfum e Silveira (2000) calcula as intensidades médias havendo a possibilidade de aplicar passos de durações até a duração final. Por recomendação é interessante utilizar períodos que sejam divisores da duração

total. Logo com base na IDF e o tempo de retorno calcula-se a intensidade média em cada duração até a duração final, e depois é feito o rearranjo dessas intensidades obtendo-se o hietograma de projeto através do processo abaixo demonstrado na figura 12.

Figura 12 - Etapas do cálculo dos hietogramas.

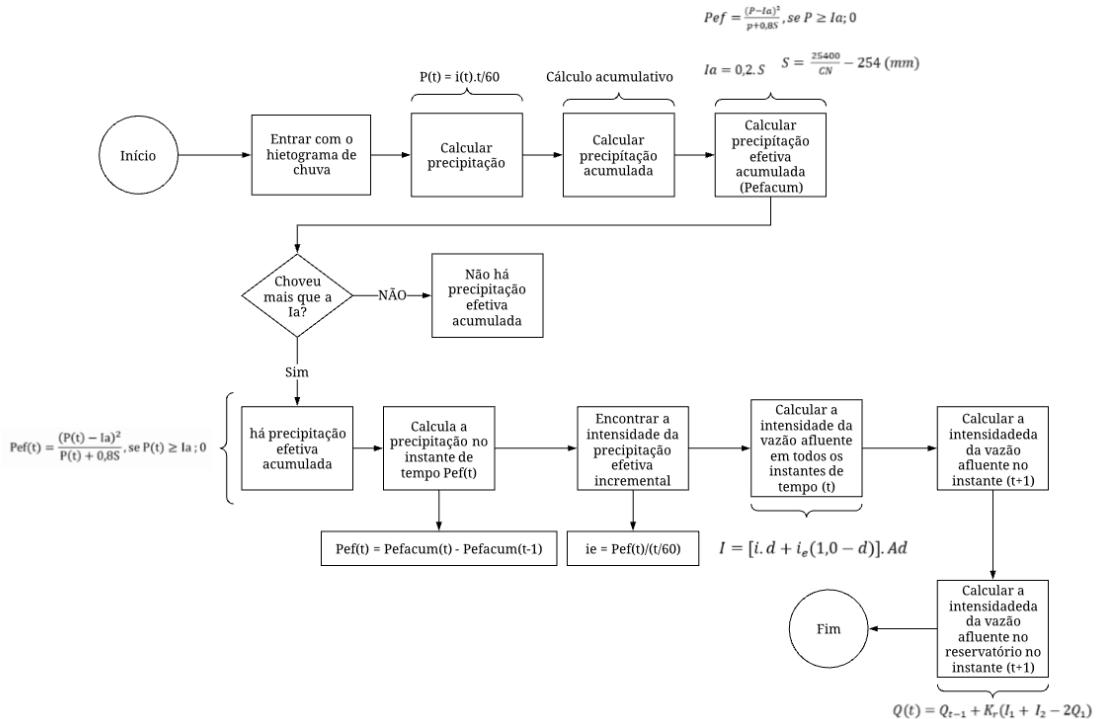


Fonte: O autor.

A figura 12 acima mostra que o tempo de retorno é o dado de entrada neste processo pois ele se caracterizou como a duração da chuva. Optou-se por utilizar neste trabalho o método por blocos alternados onde Canholi (2014) explica que uma chuva sintética pode ser construída com base na hipótese que o gráfico dos valores de precipitação é organizado como regra prática considerando-se a parcela mais intensa da precipitação na metade da duração do gráfico, e as demais em ordem decrescente, alocando uma parcela a direita e outra à esquerda do bloco central, de forma alternada.

Este hietograma foi utilizado como dado importante no processo de obtenção do hidrograma de projeto pelo método Santa Barbara. Para seu cálculo o método solicita dados que já foram obtidos anteriormente sendo eles a área da bacia, o passo de tempo e o tempo de concentração da bacia, o CN, e a fração impermeável da bacia. O procedimento para a obtenção do hidrograma para a bacia de São Pedro é feito conforme processo na figura 13:

Figura 13 - Etapas do cálculo de vazões no exutório.



Fonte: O autor.

É necessário determinar a duração dos cálculos no hidrograma, esta duração se define qual será o limite de cálculo da vazão de escoamento, valor importante pois deve ser compatível com os dados de entrada sendo este dado responsável por desenvolver a curva contendo o pico do hidrograma e o término no escoamento superficial.

3.3.5 Metodologia para a aplicação da cadeia de Markov na modelagem do uso do solo para o ano de 2028

O produto principal da pesquisa é modelagem para obtenção de um mapa de uso do solo pelo processo estocástico Cadeia de Markov, envolvendo o contexto de uso e ocupação do solo dos anos 1998, 2008 e 2018 e a estimativa do mesmo para o ano de 2058.

Os resultados obtidos pela classificação supervisionada de 1998, 2008 e 2018, além dos mapas de declividade, modelo digital de elevação, e vias foram submetidos à modelagem de mudanças temporais, no software TerrSet. Este software utiliza como premissa a Cadeia de Markov para estimar a transição do uso do solo em 2018. Estes

mapas entram como variáveis que treinam o aprendizado de máquina com redes neurais existente dentro do software, e que se caracteriza como uma etapa anterior ao painel da Cadeia de Markov. Conforme RIMAL et al. (2018), é importante ressaltar que este é um tratamento estatístico para uma análise espacial, e o processo de implementação deste modelo necessita que os mapas de uso e ocupação do solo obtidos pela classificação das imagens tenham o mesmo intervalo de tempo entre os cenários de análise. Nesta pesquisa esse intervalo é de 10 anos para cada cenário.

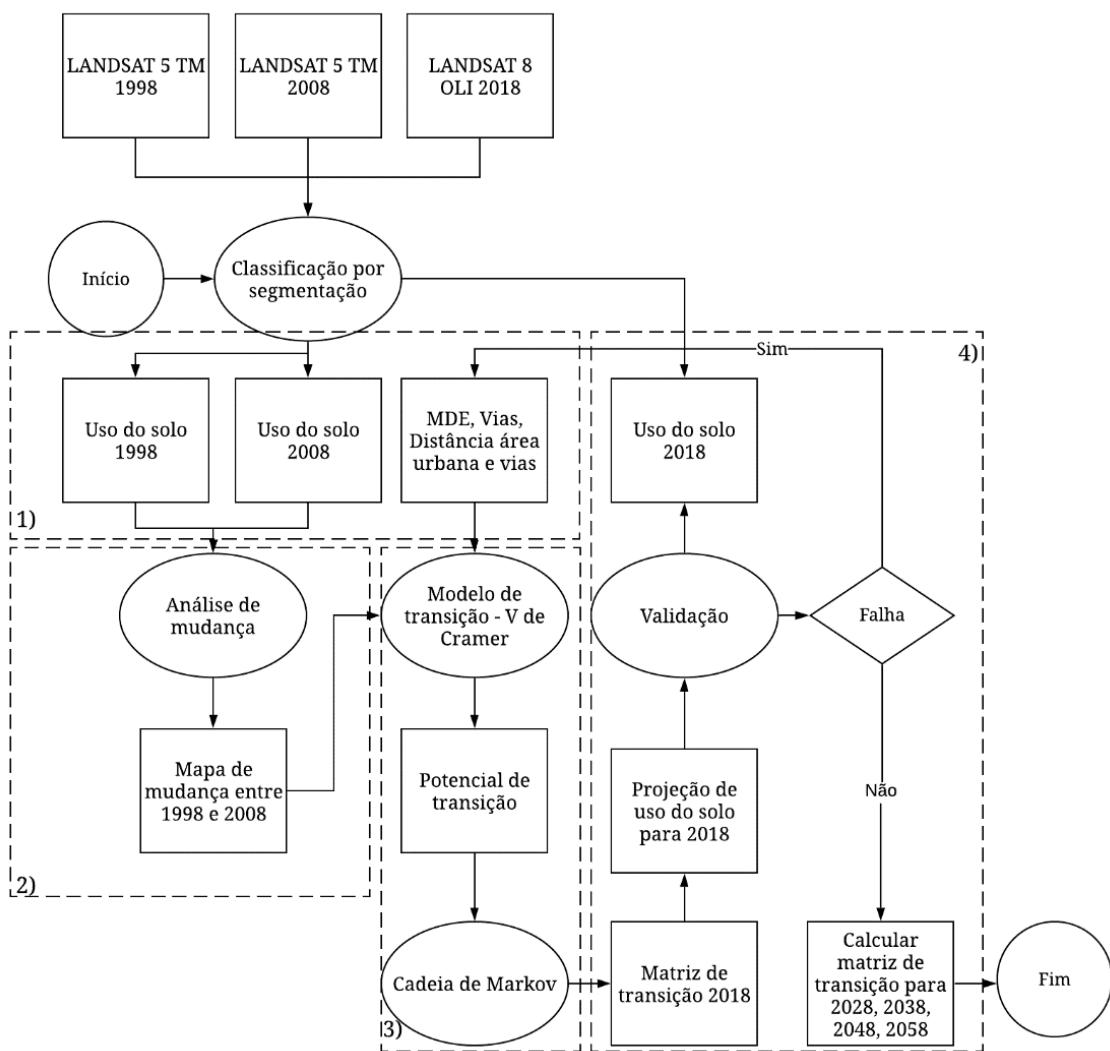
Os mapas de uso e ocupação do solo possuem como classes a área urbana, vegetação, solo exposto e água. Logo estes mapas são caracterizados como o conjunto de dados que foram submetidos aos procedimentos preliminares de modelagem, além de comporem a matriz de transição da Cadeia de Markov para a tabulação cruzada. O software TerrSet realiza o reconhecimento dos padrões de uso e ocupação do solo para os anos 1998 e 2008, e 2018 e a significância de variáveis na transição do uso do solo entre anos.

Estas variáveis podem ser os mapas de declividade, MDE, vias de tráfego, além das tendências espaciais de transição, calculadas através dos polinômios de 3^a e 4^a ordem existentes no TerrSet. Este processo de testar o poder de significância das variáveis é necessário para validação do modelo, uma vez que se tem o resultado das áreas das classes de uso do solo estimadas pela Cadeia de Markov, bem como as áreas quantificadas do ano atual, verifica-se a diferença entre elas e obtém-se a precisão da modelagem.

Após a validação deste processo o algoritmo estará calibrado para realizar as estimativas futuras. A figura 14 demonstra os procedimentos para a modelagem de mudança do uso e ocupação do solo para 2058 (figura 14).

Conforme figura 14, o processo de obtenção da situação futura do uso e ocupação do solo da bacia de São Pedro, necessita primeiramente de processos preliminares a fim de se ter uma melhor análise do potencial de transição entre as classes de uso do solo.

Figura 14 - Procedimentos para modelagem da predição do uso do solo com a Cadeia de Markov.



Fonte: O autor.

O software TerrSet necessita de dados de entrada, e estes são os mapas de 1998 e 2008, e os mapas do modelo digital de elevação, as vias de tráfego e as distâncias da área urbana de 2018 e as distâncias das vias. Optou-se por utilizar também as distâncias euclidianas em relação ao centro urbano, e das vias de tráfego conforme procedimento número 1. No entanto os mapas de 1998 e 2008 são submetidos a uma pré-análise, avaliando os ganhos e perdas de áreas de uso e ocupação, e sobre a tendência espacial de mudança que é calculada a partir de polinômios de 3º e 4º grau conforme procedimento número 2.

Segundo Eastman (2016), motivo da utilização destes mapas se dá pelo fato de que o software TerrSet promove uma submodelagem que inicialmente testa o poder das variáveis estáticas que são estes mapas complementares sobre as variáveis dinâmicas que são as classes de uso e ocupação. Ainda conforme Eastman (2016), e Silva et al. (2020), as variáveis estáticas logo orientam a transição em consideração ao uso e ocupação e não sofrem alterações ao longo do tempo. As variáveis dinâmicas possuem as propriedades que são dependentes do tempo, levando em conta as características de proximidade e infraestruturas existentes, e são recalculadas ao longo do tempo.

Conforme Silva et al. (2020) assim que são selecionadas as variáveis do modelo, utiliza-se MLP rede neural, que permite treinar o modelo de transição definido várias transições que consequentemente determinam a melhor análise do potencial de transição das classes de cobertura do uso do solo na bacia com base nas variáveis escolhidas (procedimento número 3). Sendo assim, primeiramente o submodelo solicita quais áreas de cobertura serão utilizadas para análise no submodelo. No caso do presente trabalho verifica-se qual será a transição da área de vegetação para área urbana, e de solo exposto para área urbana. Opta-se por não utilizar a classe água pois é observado que ela não sofreu alterações durante os anos (procedimento número 3).

Portanto, fixando estas duas situações de transição é feito um teste que verifica a significância dos mapas complementares que aqui serão denominados como variáveis, e constatando se estão associados ou não na mudança de uso e ocupação. Para este teste verifica-se a influência destas variáveis, avaliando-as por meio de um índice denominado como V de Cramer. Este índice é proveniente de um tratamento estatístico que, conforme Smith, Goodchild e A Longley (2018), é similar ao teste de Kappa, e define quais são as variáveis que estão mais associadas a transição das classes. Smith, Goodchild e A Longley (2018) explicam que o teste utiliza este índice explicativo que varia de 0 a 1 e, além disso Silva et al. (2020) explica que valores mais próximos a 1 mostraram que as variáveis têm maior associação entre as classes de transição.

Conforme Eastman (2016) para o presente trabalho foram considerados valores de Cramer observando variáveis que após testadas resultaram em valores acima de 0,40, com o intuito de fortalecer o modelo tornando mais próximo a situação real. O índice é encontrado por meio das equações 19 e 20:

$$\chi^2 = \frac{(O - E)^2}{2} \quad (19)$$

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (20)$$

Em que: χ^2 é o coeficiente qui-quadrado, O é a frequência observada para uma categoria, E é igual a frequência esperada na categoria correspondente. Havendo esse coeficiente calcula-se V que é o valor do índice de Cramer, em que n = tamanho da amostra, q é o menor valor nas linhas e colunas da imagem de uso do solo.

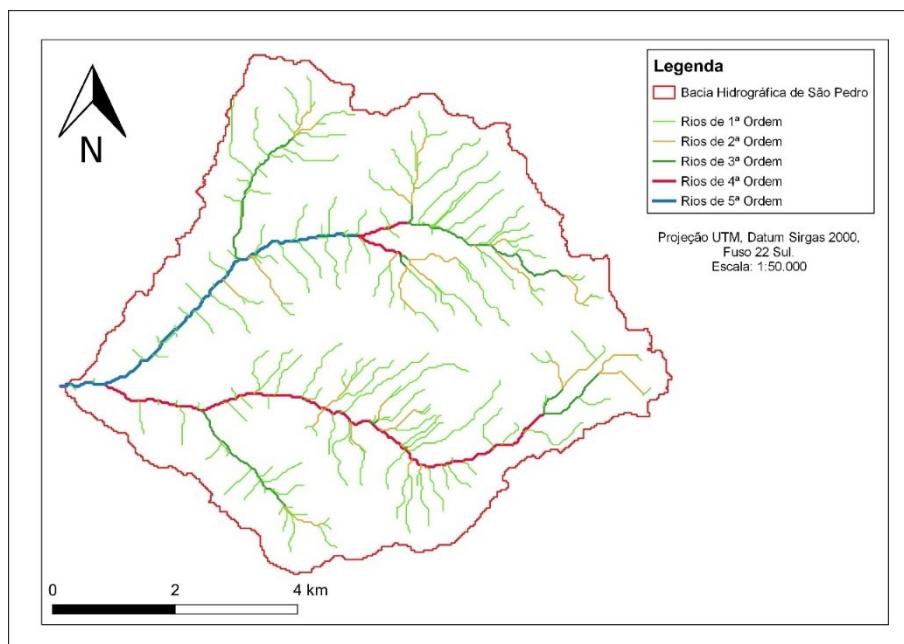
Após executar o modelo é feito o cálculo da matriz de transição da cadeia de Markov no software Terrset. O cálculo da matriz de transição da Cadeia de Markov bem como estes procedimentos comentados anteriormente foram viabilizados no software TerrSet (procedimento número 4). Segundo Eastman (2016) a validação do modelo no acerto em prever áreas as áreas existentes no mapa atual de 2018, é feita diretamente dentro do software TerrSet, em outras palavras verifica-se a assertividade em estimar a localização das áreas de uso e ocupação através da Cadeia de Markov. Após este método de validação, houve a necessidade de validar o modelo calculando a precisão entre a quantidade de áreas de uso e ocupação geradas pela Cadeia de Markov, e pelas já contabilizadas no mapa atual de 2018.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A extração da hidrografia foi realizada segundo o modelo Taudem de acumulação de fluxo aplicada sobre os dados geomorfológicos do Topodata. Com os procedimentos descritos gerou-se o mapa da hierarquização dos cursos d'água da bacia hidrográfica de São Pedro (Figura 15).

Conforme os procedimentos descritos no fluxograma da figura 8, foi possível gerar o mapa de hierarquização de rios da bacia hidrográfica de São Pedro e representar os principais corpos hídricos que foram analisados para os cálculos preliminares do hidrograma de projeto, além disso foi possível delimitar a área para classificação do uso do solo que restringe ao interior da bacia de São Pedro.

Figura 15 – Figura do mapa de hierarquização dos cursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Pedro.

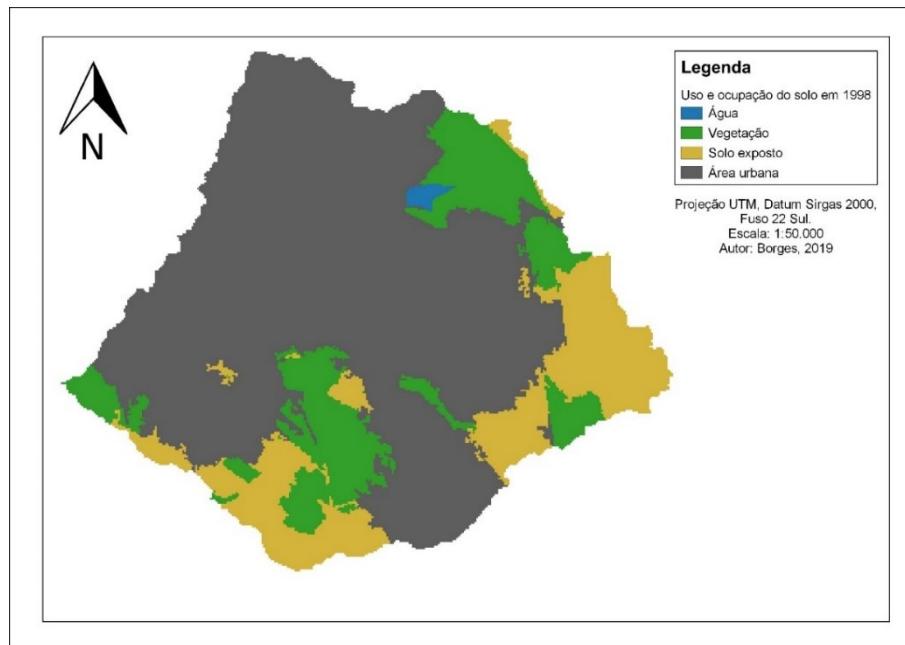


Fonte: O autor.

Ressalta-se que os cursos hídricos mostrados na figura 15, foram canalizados em alguns trechos. Entendendo este fato a simulação vai se limitar ao que está na superfície de escoamento, e não ao que está sendo canalizado em uma possível precipitação. Este fato é justificado pela impossibilidade de se obter dados de escoamento nas regiões canalizadas, o que reforça o uso do método Santa Barbara para uma chuva de projeto, que irá fornecer dados para a criação de um hidrograma da bacia de São Pedro.

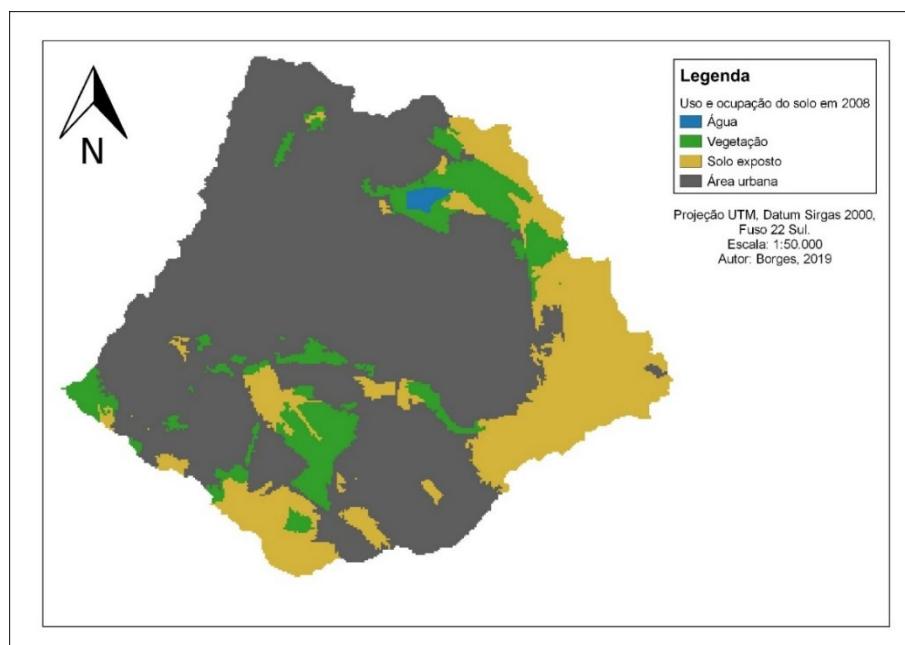
Com a obtenção da área de estudo a classificação por segmentação foi aplicada nos recortes das imagens que do sensoriamento remoto, para os anos de 1998, 2008, e 2018, resultando nas figuras 16, 17, e 18.

Figura 16 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 1998.



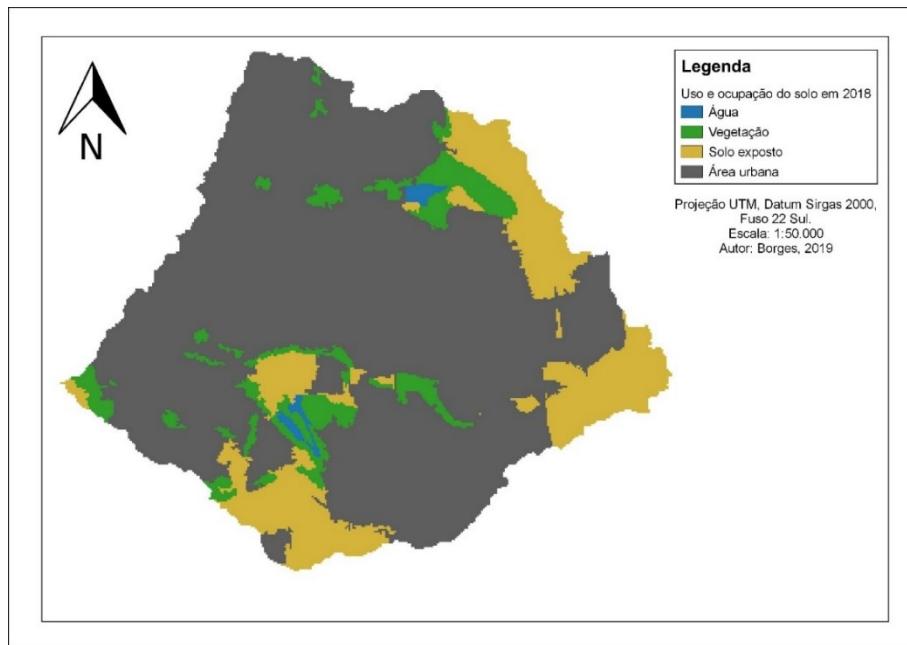
Fonte: O autor.

Figura 17 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2008.



Fonte: O autor.

Figura 18 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2018.

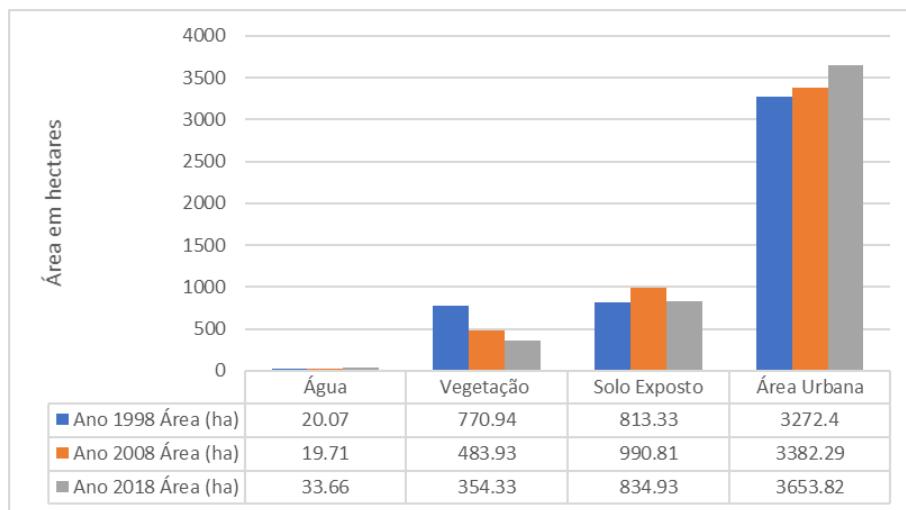


Fonte: O autor.

Primeiramente, é importante expor uma limitação encontrada no método de classificação por segmentação, este que por sua vez não fornece um teste para avaliar a qualidade da classificação com base na imagem orbital. No entanto, o método de classificação possibilitou a divisão das classes de uso de solo incluídas na bacia, este procedimento possibilita verificar os ganhos e perdas de áreas de uso e ocupação como água, vegetação e solo exposto, além de observar o ganho de áreas urbanizadas durante os anos. No processo de classificação pela segmentação, o algoritmo que classifica as feições nota a diferença entre os detalhes espectrais, e particiona cada tipo de classe, no entanto existe a variação de detalhes espectrais que devem ser observados.

Esta variação de detalhes espectrais que foram observados nas imagens obtidas por sensoriamento remoto, é um fato que pode ser explicado pela mudança de sensores responsáveis por captar as imagens em períodos diferentes em Landsat 5 para 1998 e 2008 e Landsat 8 para 2018. Sendo assim, o SIG QGIS 3.10 possibilitou o reconhecimento das áreas de uso do solo com seus respectivos valores no decorrer dos anos de análise conforme o gráfico 1.

Gráfico 1 - Evolução do uso do solo em relação às outras classes.



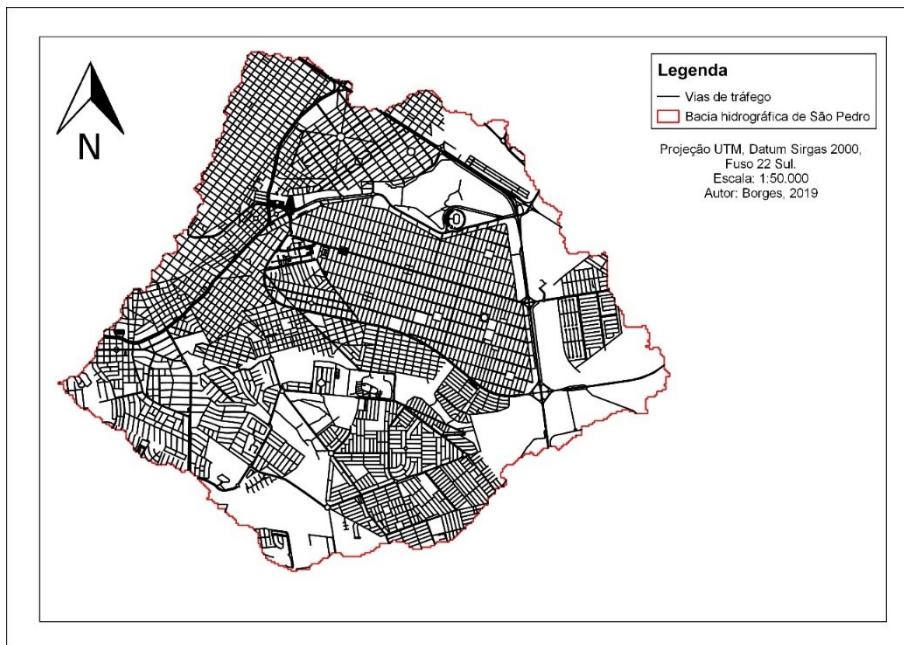
Fonte: O autor.

A classificação proporcionou o cálculo as áreas de cada tipo de uso do solo, e no gráfico 1 é possível constar a transição dos tipos de uso do solo na bacia de São Pedro e atentando-se aos fundamentos da Cadeia de Markov observa-se, portanto, o crescente aumento da área urbana que por sua vez é a região que é considerada como impermeabilizada, e que contribui para o escoamento superficial da chuva.

Outro fator que influencia no escoamento superficial, bem como na urbanização é a geomorfologia do terreno. Esta geomorfologia foi obtida através da área delimitada, resultando no Modelo Digital de Elevação (MDE), e que teve importância não só na modelagem da mudança de uso e ocupação, mas também no cálculo do hidrograma de projeto.

A delimitação da área de estudo foi utilizada também para o recorte das vias de tráfego na bacia de São Pedro (Figura 19), que serão submetidas ao modelo para que seja verificado o grau explicativo deste mapa como uma variável e quão influenciadora esta é na modelagem da mudança de uso e ocupação do solo.

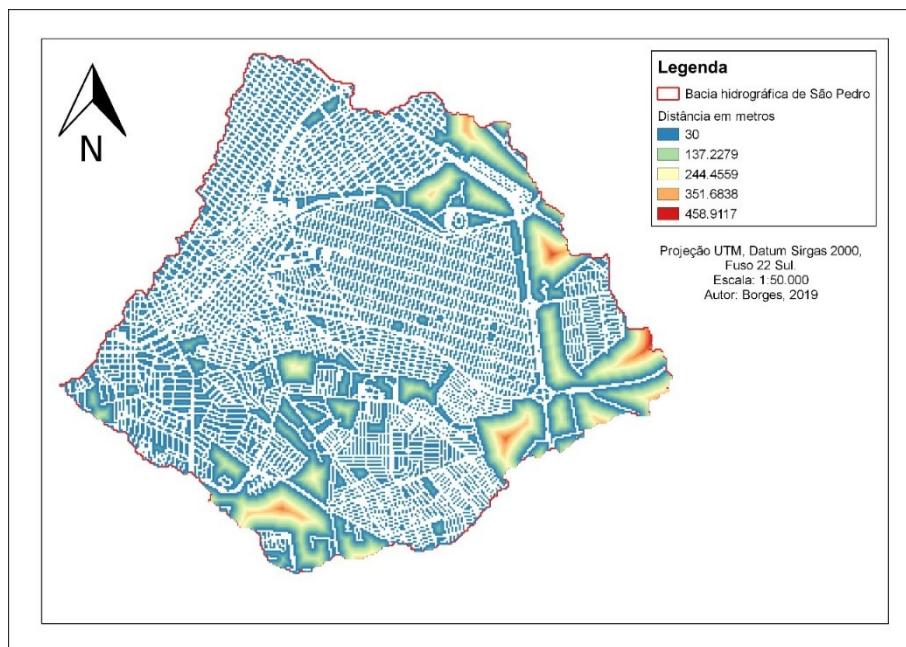
Figura 19 – Figura do mapa de vias da bacia do Córrego do São Pedro



Fonte: O autor.

O mapa de vias da figura 19 se enquadra como uma das camadas que constituem a estrutura analítica, e que será submetida à modelagem de mudança do uso do solo. O motivo de se utilizar esse tipo de variável no presente trabalho é a hipótese que as vias de tráfego influenciam como tomada de escolha para a urbanização de regiões. A tomada de decisão para a urbanização envolve também fatores como a distância de centros urbanos, e a distância das vias de tráfego. Entendendo essa hipótese foi aplicado o algoritmo da distância euclidiana no centro urbano de 2018, e nas vias de tráfego (Figura 19). Os resultados são apresentados na figura 20 e no Apêndice A.

Figura 20 - Figura do mapa de distância de acesso às vias.



Fonte: O autor.

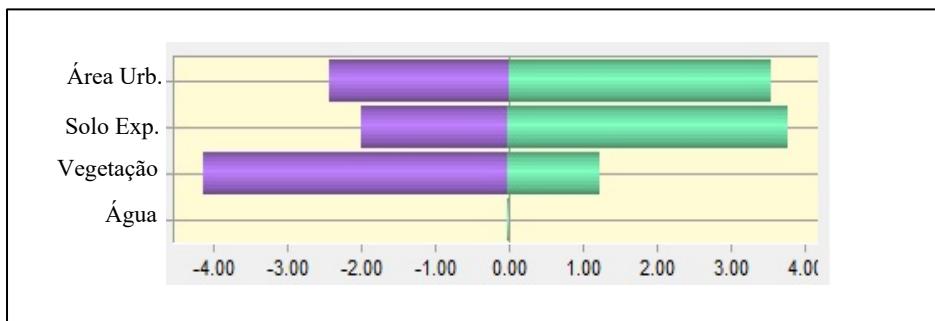
A aplicação da distância euclidiana nos mapas de vias (Figura 20) e de mancha urbana, entraram como variáveis na modelagem da mudança do uso do solo, além disso é possível se apoiar no resultado encontrado nestes para analisar o fenômeno da urbanização pela distância entre área de interesse. Avaliar as mudanças do uso do solos nos anos de 1998 e 2008 foram os resultados preliminares para realizar a modelagem da mudança do uso do solo que calculou a matriz de probabilidade de transição da cadeia de Markov, além disso entender o valor destas variáveis em relação ao índice de Cramer, é importante no processo de modelagem da mudança de uso do solo.

4.1 ANÁLISE DAS MUDANÇAS DO USO DO SOLO NOS ANOS DE 1998 E 2008

Inicialmente para validar o modelo, é necessário gerar um mapa para o ano de 2018 com a cadeia de Markov e posteriormente validar a precisão do modelo, para que seja possível gerar os anos mapas de uso e ocupação do solo para os decênios de 2028, 2038, 2048 e 2058. Desta forma o fundamento da cadeia de Markov necessita dos mapas de uso do solo dos anos de 1998 e 2008 para gerar a previsão futura em 2018.

Através da preparação dos mapas mostrados anteriormente, estes foram utilizados dentro do software TerrSet, onde o mesmo já realiza uma pré-análise sobre as transições, perdas e ganhos, e a tendência espacial de mudança entre as classes de uso do solo. Portanto, com os mapas de 2008 e 2018 já é possível verificar as perdas e ganhos de km^2 de uso do solo entre estes anos conforme gráfico 2:

Gráfico 2 - Ganhos e perdas de áreas entre 1998 e 2008 em km^2



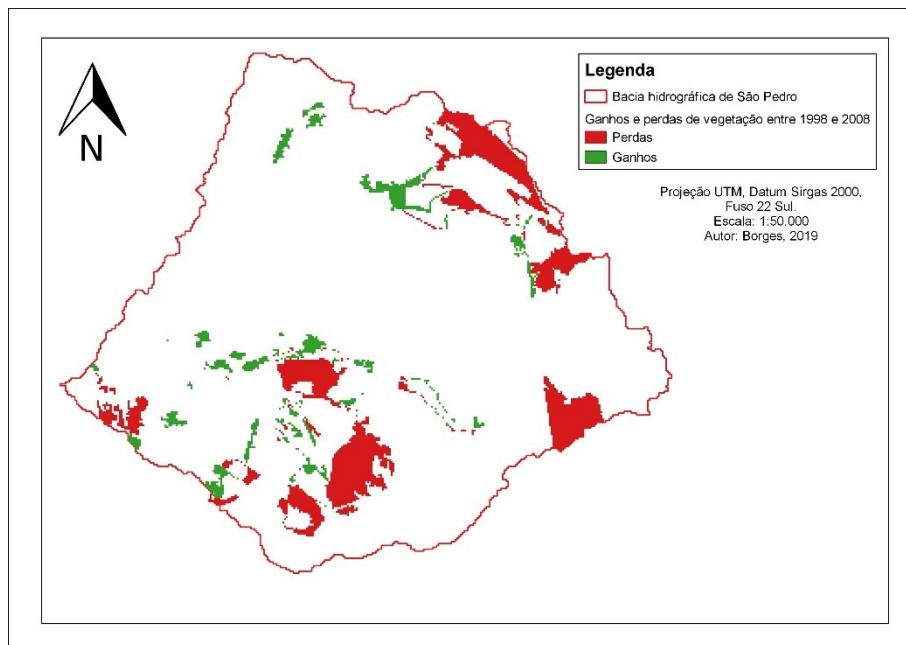
Fonte: O autor.

O gráfico 2 é importante para ilustrar o fator da mudança de classes de uso do e ocupação do solo. As barras de cor roxa indicam a perda de uso de solo em km^2 entre os anos de 1998 e 2008, as de cor verde indicam o ganho entre os anos de 1998 e 2008. Pode-se verificar a transição da vegetação para o solo exposto, de forma que entre 1998 e 2008 não houve ganho significativo em relação a perda no uso do solo referente a vegetação. Do contrário houve o aparecimento de mais áreas de solo exposto, o que tende ao aparecimento de mais áreas urbanizadas. Um fato relevante é que a classe referente á agua que compreendeu a classificação e não sofreu alterações em sua área no decorrer dos anos de forma significativa, como as alterações em vegetação e o solo exposto durante os anos pela evolução da área urbana. E considerando esta relação de perdas e ganhos de áreas de vegetação e solo exposto foi possível mapear estes processos para afim de ser ter uma análise pontual incorporado na bacia hidrográfica de São Pedro, conforme figuras 21 e 22:

Os mapas das figuras 21 e 22 possibilitam observar as mudanças de perdas e ganhos por área de vegetação e solo exposto. Ressaltando o que foi comentando anteriormente, estes mapas mostram que predominantemente houve a transição de áreas de vegetação para solo exposto, no entanto por se tratar de um resultado pontual, há ainda

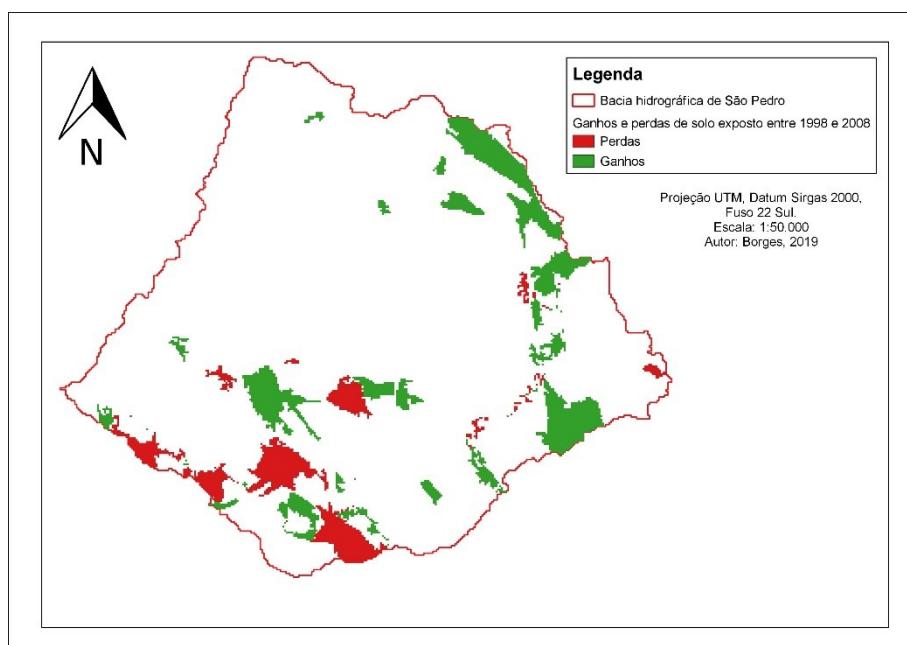
a necessidade de observar qual a tendência espacial de mudança destes tipos de uso do solo.

Figura 21 - Figura do mapa de perda e ganho da classe vegetação entre 1998 e 2018.



Fonte: O autor.

Figura 22 - Figura do mapa de perda e ganho da classe solo exposto entre 1998 e 2018.

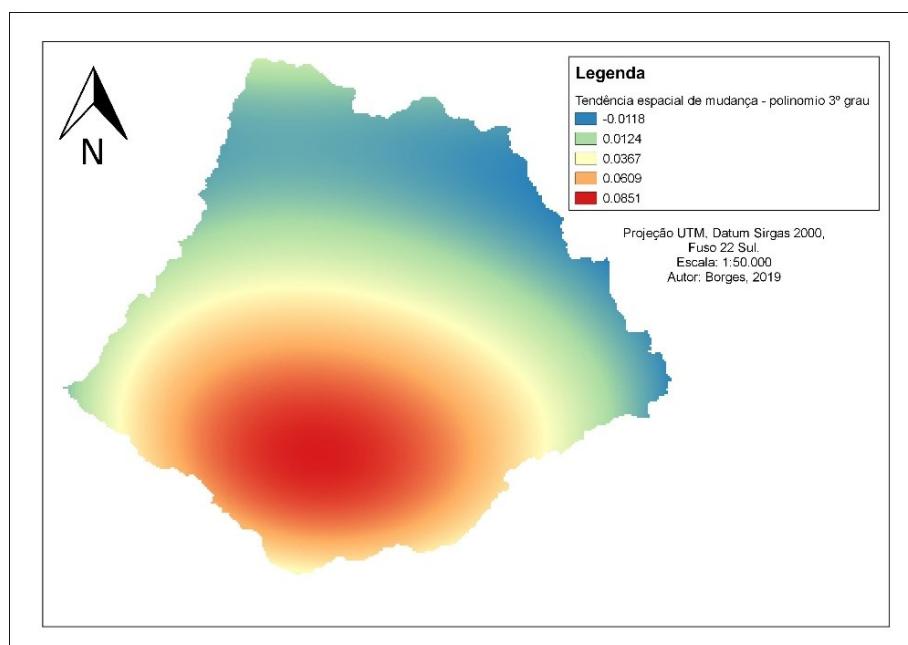


Fonte: O autor.

A possibilidade de mapear as tendências de mudança como mostradas nas figuras 21 e 22 facilita o entendimento de padrões impostos pelas intervenções humanas. Estas tendências de mudanças podem ser geradas através de um recurso existente no software TerrSet de análise de tendência espacial gerando uma superfície de tendências por meio de métodos de interpolação utilizando polinômios. A alteração das superfícies de tendências através da alteração do grau de polinômio é possível avaliar qual melhor se adequa aos padrões de mudança do uso do solo na bacia de São Pedro. Em vista disso foram considerados os polinômios de 3º e 4º grau, sendo estes os que se demonstraram melhor a superfície de tendência relacionada a disposição do uso do solo na bacia de São Pedro.

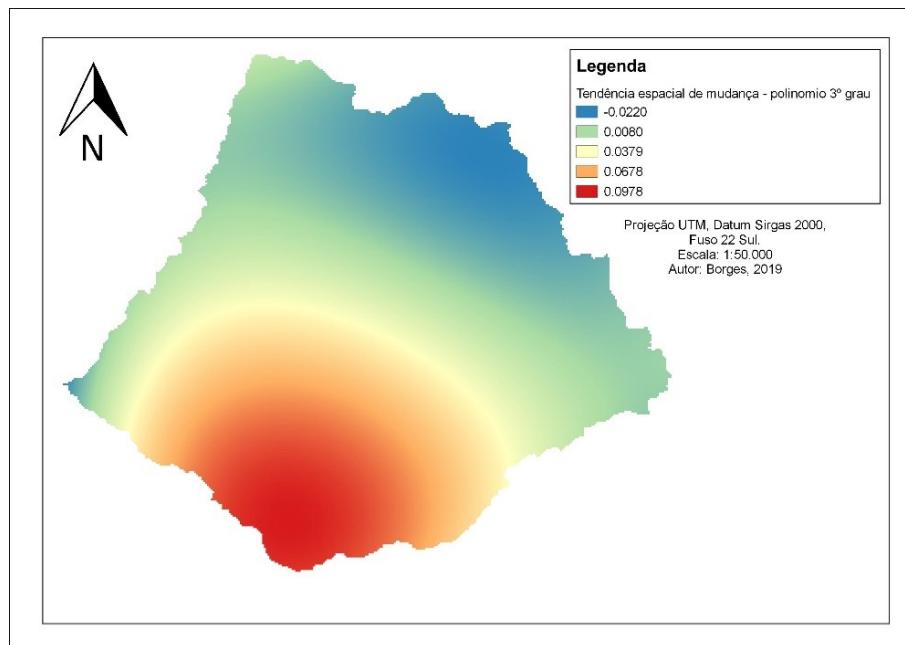
Primeiramente foi observado a tendência mapeada considerando o polinômio de 3º grau (Figuras 23, 24, 25), e observando a probabilidade de todas as classes de uso e ocupação se tornarem área urbana, e o mesmo foi observado considerando as áreas de solo exposto e a vegetação se tornarem área urbana. O mesmo procedimento foi aplicado considerando o polinômio de 4º grau (Figuras 26, 27 e 28). Este procedimento teve como objetivo verificar qual a tendência de probabilidade de mudança dos tipos de uso do solo no interior da bacia hidrográfica de São Pedro. Este fato pode ser observado abaixo:

Figura 23 - Tendência espacial de mudança de vegetação para área urbana com polinômio de 3º grau.



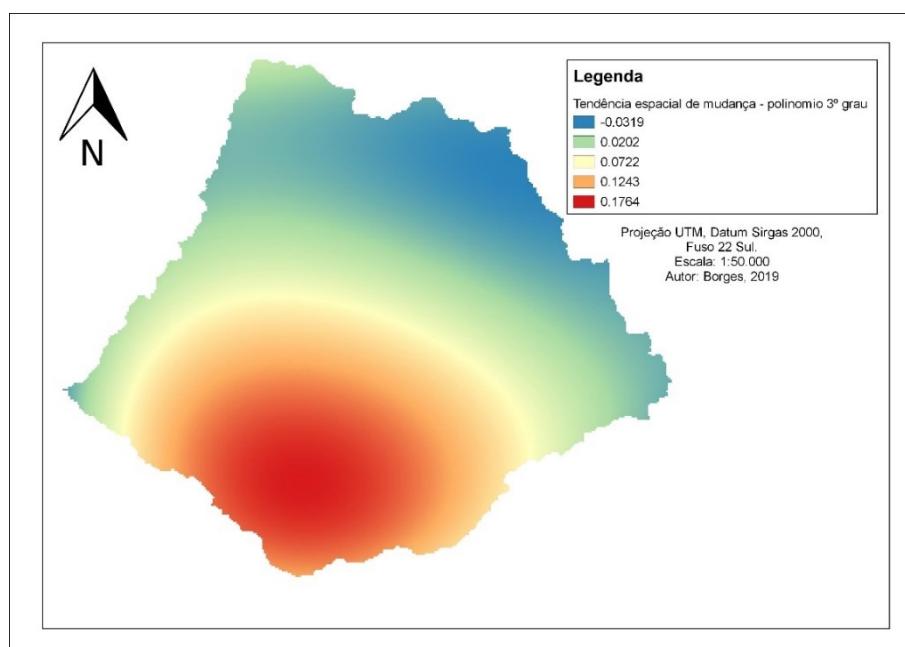
Fonte: O autor.

Figura 24 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 3º grau.



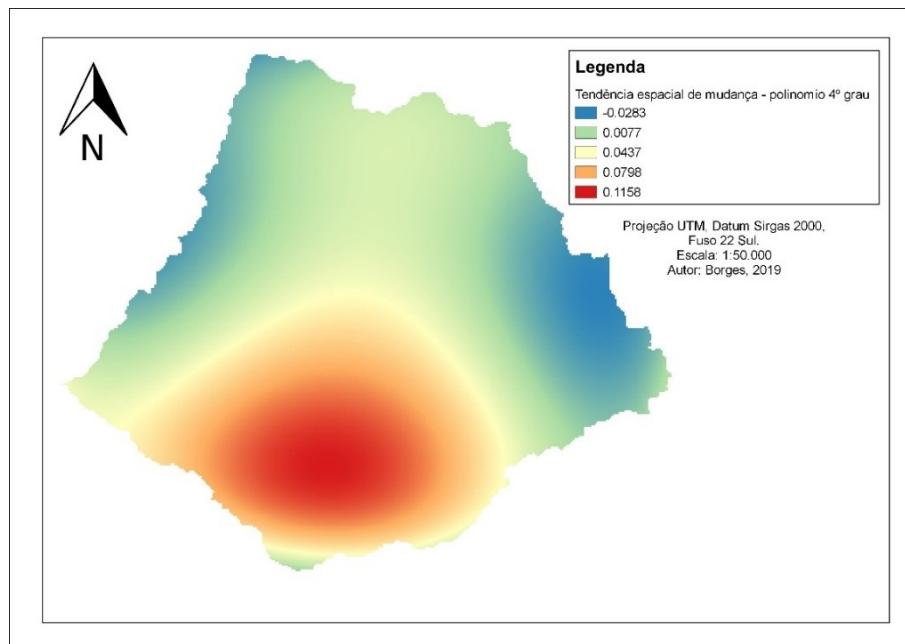
Fonte: O autor.

Figura 25 - Tendência espacial de mudança de todas as classes para área urbana com polinômio de 3º grau.



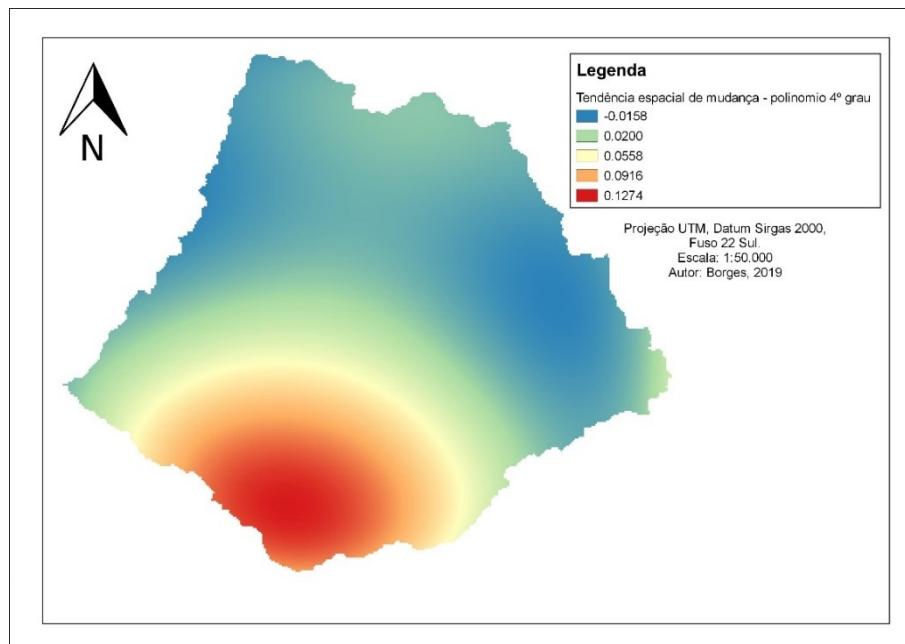
Fonte: O autor.

Figura 26 - Tendência espacial de mudança de vegetação para área urbana com polinômio de 4º grau.



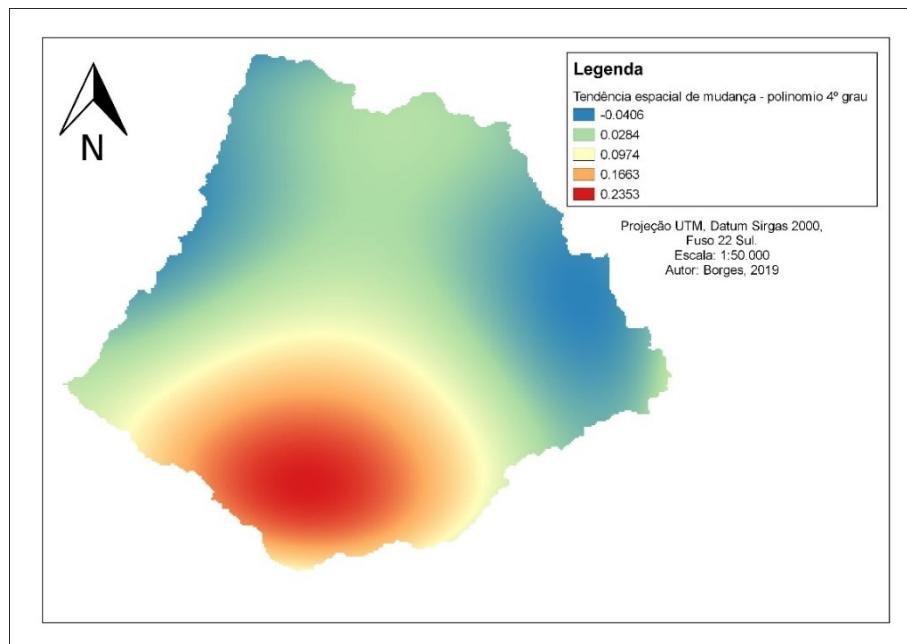
Fonte: O autor.

Figura 27 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 4º grau.



Fonte: O autor.

Figura 28 - Tendência espacial de mudança de solo exposto para área urbana com polinômio de 4º grau.



Fonte: O autor.

As figuras 23, 24 e 25 foram calculadas com o polinômio de 3º grau, as regiões que concentram a cor vermelha, são regiões que possuem as maiores probabilidades de mudança e são, as mais propícias de se tornarem áreas urbanizadas com base nos padrões de mudança encontrados nos mapas de 1998 e 2008. Nota-se, portanto, que as regiões que abrangem as partes sul, sudoeste, até oeste da bacia estão mais propensas a fazer com que áreas de solo exposto e vegetação se urbanizem.

Todavia aplicando o polinômio de 4º grau (figuras 26, 27 e 28) nota-se que a superfície de tendência de mudança espacial tem sua probabilidade mais difundida para outras regiões do mapa.

Observa-se que diferente do polinômio de 3º grau, o polinômio de 4º fez com que a tendência se esforçasse para aumentar a probabilidade em outras regiões. As novas regiões agora com tendência se aproximam das regiões urbanizadas em 2018, sendo a região leste e sudeste. Desta forma ao saber das tendências espaciais de mudança para a análise da mudança do uso do solo, estes mapas também serão utilizados no teste explicativo que serão submetidos ao submodelo de transição.

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SUB MODELO DE TRANSIÇÃO MPL REDES NEURAIS

O primeiro procedimento necessário para realizar a execução do submodelo de transição, é criar a estrutura analítica. Este processo é feito testando as variáveis em relação aos mapas de tendência de mudança espacial, o MDE, o mapa de vias de tráfego, e os mapas da distância euclidiana. Estas variáveis foram testadas considerando valores acima de 0,40 do índice de Cramer na classe de área urbana. O resultado do teste de Cramer para o MDE, a distância da área urbana de 2018, e a distância das vias de tráfego são apresentados respectivamente na tabela 5.

Tabela 5 - Teste de Cramer nas variáveis de expansão do uso e ocupação do solo

| Variáveis selecionadas | Valor de Cramer |
|-------------------------------|-----------------|
| MDE | 0.4147 |
| Distância área urbana 2018 | 0.4732 |
| Distância das vias de tráfego | 0.4646 |

Fonte: Terrset (2019). Adapt. Autor (2019).

Portanto após os testes as variáveis indicadas na tabela 5 foram as que obtiveram os valores de Cramer acima de 0,40 foram, o MDE, a distância euclidiana das vias, e a distância euclidiana da área urbana. Este valor para o V de Cramer está na faixa de aceitação conforme Eastman (2016). O motivo deste fato se dá, pois, a distância euclidiana gera uma superfície de proximidade entre os pixels em relação ao centro. Essa superfície determina na estrutura analítica o possível crescimento por regiões em relação a distâncias centrais, o que está relacionado ao processo natural de urbanização.

A distância euclidiana aplicada nas vias também foi significativa para o teste pois o crescimento urbano leva em conta a proximidade das vias centrais com as existentes nos extremos da bacia hidrográfica de São Pedro. E por fim o MDE que contém a geomorfologia existente na bacia hidrográfica é considerado também como um fator decisivo na urbanização de áreas, que leva em conta regiões com elevações baixas. Todas estas variáveis que foram adicionadas na estrutura do submodelo de transição são estáticas.

Com estas variáveis, optou-se por utilizar o modelo de rede neural artificial denominado como MLP (*Mult-Layer-Perceptron*). A estrutura deste modelo é basicamente formada por um conjunto de neurônios através de um arranjo em camadas, e abrangem camadas de entrada, uma ou mais camadas intermediárias, e uma camada de saída (SHAH, GHAZALI, 2011). A partir desta estrutura o treinamento do modelo é realizado para definir as amostras de pixels que sofreram ou não as transições. Conforme Silva et al., (2020) o MLP testa e define diversas transições e propõe uma melhor análise do potencial de transição das classes de uso do solo.

Este método de modelagem é um dentre os existentes que o Terrset dispõe para a análise da evolução das matrizes de transições. Para esta rede, o tamanho da amostra por classe foi de 50% das amostras utilizadas para treino, e 50% foram utilizadas para teste do modelo. Os valores dos parâmetros de treino, foram considerados como 1% para a taxa inicial de aprendizado, 0,01% a taxa final de aprendizado, o momentum fator foi de 0,5 e os valores da constante de sigmoide, e a quantidade de nós nas camadas ocultas mantido o padrão do programa. Os critérios de parada do aprendizado consideraram o erro médio quadrático de 0,01, 10.000 interações e uma precisão de 100% atingida. Após essa configuração o modelo foi executado e obteve os resultados da tabela 6.

Tabela 6 - Resultado da execução do modelo em rede neural MPL no TerrSet.

| Estatísticas de execução | Resultado |
|--------------------------------------|-----------|
| Interações | 10000 |
| Erro médio quadrático do treinamento | 0,4071 |
| Erro médio quadrático de teste | 0,4126 |
| Taxa de precisão | 41,75% |
| Taxa de aprendizado | 0,0003 |
| Medida de aprendizado | 0,2234 |

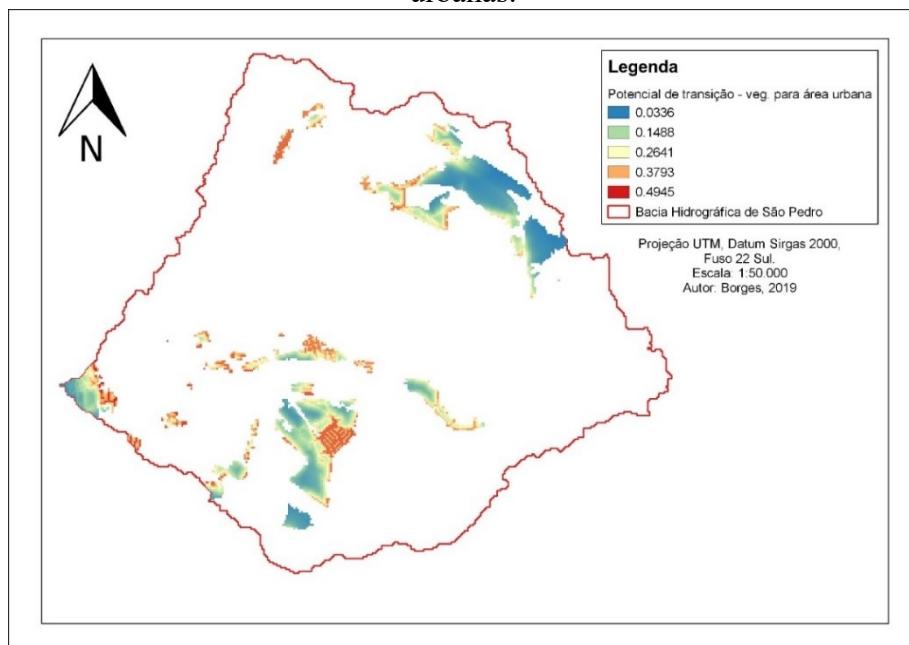
Fonte: O autor.

Observando as estatísticas da execução na tabela 6 nota-se primeiramente a taxa de precisão de 41,75%. Considerando-se o que foi comentado anteriormente sobre os critérios de paralização do aprendizado, houve 1000 interações concluídas, e o erro médio padrão acima de 0,01 diante da execução do submodelo de transição.

Portanto, pode-se entender que a predição e o produto não dependem desta precisão, pois ainda é necessária a validação do modelo tanto no software TerrSet quanto manualmente a fim de verificar a precisão sobre as áreas criadas em 2018 na predição.

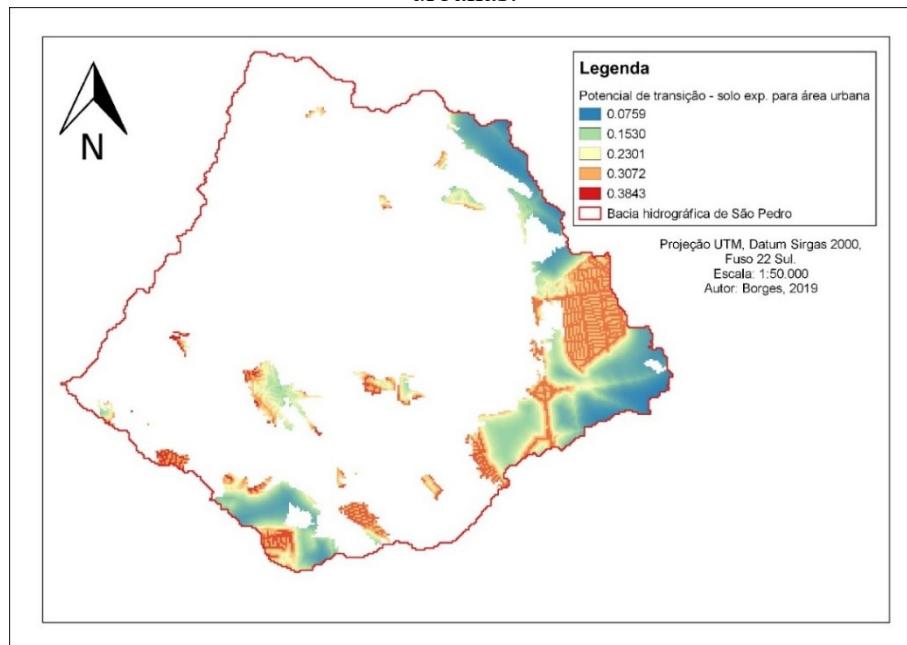
Como resultado, uma superfície de potencial de transição é gerada. Esta superfície permite a verificação das áreas com a maior probabilidade de mudança de vegetação para área urbana, e solo exposto para área urbana nas regiões com as cores em vermelho, conforme pode ser analisado nos mapas das figuras 29 e 30.

Figura 29 - Figura do mapa de potencial de transição de áreas de vegetação para áreas urbanas.



Fonte: O autor.

Figura 30 - Figura do mapa de potencial de transição de áreas de solo exposto para áreas urbanas.



Fonte: O autor.

Ao se relacionar o mapa de uso do solo em 2018 (Figura 18) com o resultado do potencial de transição da figura 30 verifica-se que existem nas regiões a leste e sudoeste o surgimento de áreas urbanizadas, em outras palavras existe uma maior tendência de urbanização destas áreas conforme pode ser visto também na figura 29. Portanto observa-se que houve uma execução oportuna no submodelo de transição com base nas variáveis, e admitindo considerar apenas de valores de Cramer acima de 0,40 para elas.

Observa-se ainda que indicando para o submodelo MLP redes neurais, o mapa da distância euclidiana das vias de tráfego, bem como das distâncias euclidianas em relação ao centro, o mesmo supõe que são áreas de interesse de intervenção humana levando em conta logo, a grande probabilidade de mudanças de uso do solo nestas áreas. O aprendizado de máquina MLP redes neurais, desenvolve a matriz da cadeia de Markov, realizando uma varredura na amostragem utilizadas no modelo para treinamento, e verificando os pixels que sofreram ou não sofreram transição na modelagem. Logo com a matriz da cadeia de Markov, é possível observar a probabilidade em que os pixels de uso do solo em 1998 e 2008, se modifiquem de uma classe para outra em um determinado ano. Escolhendo o período de anos para ser analisado a matriz é modificada, e para o ano de 2018 é apresentada conforme a tabela 7 abaixo:

Tabela 7 - Probabilidade de transição das demais classes de uso do solo para área urbana.

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urbana |
|------|--------|-----------|--------------|-------------|
| 2018 | 0 | 0,2317 | 0,2156 | 0,9254 |
| 2028 | 0,0350 | 0,3871 | 0,3691 | 0,8729 |
| 2038 | 0,0884 | 0,4935 | 0,4781 | 0,8357 |
| 2048 | 0,1499 | 0,5673 | 0,5558 | 0,8094 |
| 2058 | 0,2133 | 0,6190 | 0,6108 | 0,7907 |

Fonte: O autor.

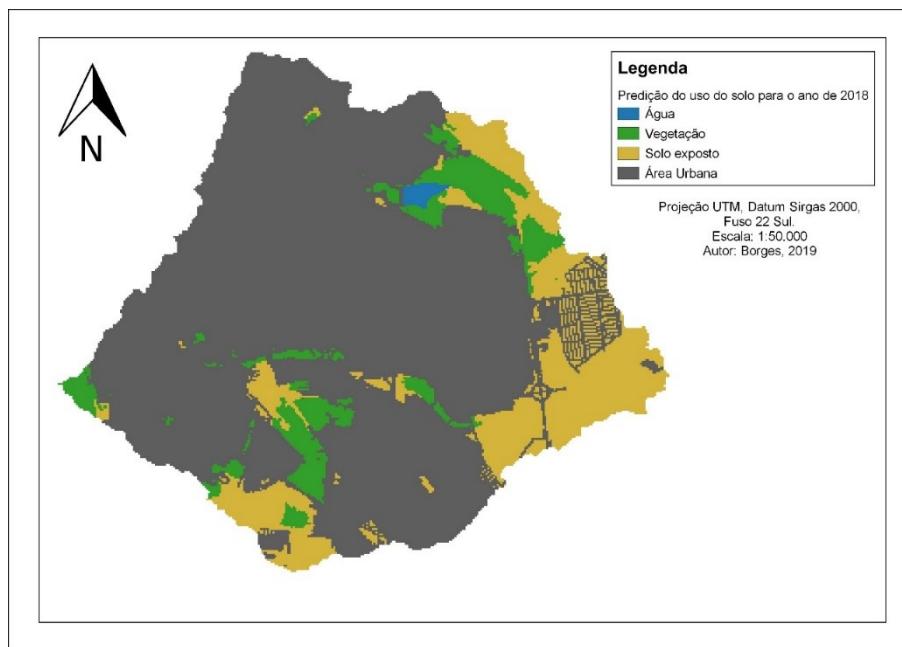
Observando as matrizes de transição da cadeia de Markov (Apêndice B), e analisando isoladamente, água, vegetação, solo exposto, e área urbana foi possível elaborar a tabela x acima de probabilidades. Sendo assim verifica-se que todas as classes têm o aumento de sua probabilidade de transição para urbana no decorrer dos anos até 2058. Essas probabilidades foram calculadas pela modelagem de transição do uso do solo com base nos anos de 1998 e 2008 até 2058 para cada período de 10 anos.

Nota-se que a vegetação e o solo exposto têm aumento na sua probabilidade de transição para área urbana no decorrer dos anos. Este fato ilustra um possível fenômeno natural da urbanização onde áreas desmatadas logo se transformam em áreas para cultivo, ou em loteamentos.

Com isso nota-se que a probabilidade de área urbana se manter é reduzida durante os anos, esse fenômeno é consequência de que o modelo incapaz de identificar as amostras de pixel das demais classes para computar a probabilidade de transição para área urbana, uma vez que a maior parte da área total da bacia hidrográfica de São Pedro foi transformada em área urbana.

Com base na matriz de probabilidade de transição calculada pelo submodelo para o ano de 2018, o mapa de predição do uso e ocupação foi gerado (Figura 31) e posteriormente foram aplicados os métodos de validação local e global.

Figura 31 - Figura do mapa de predição para ao ano de 2018.

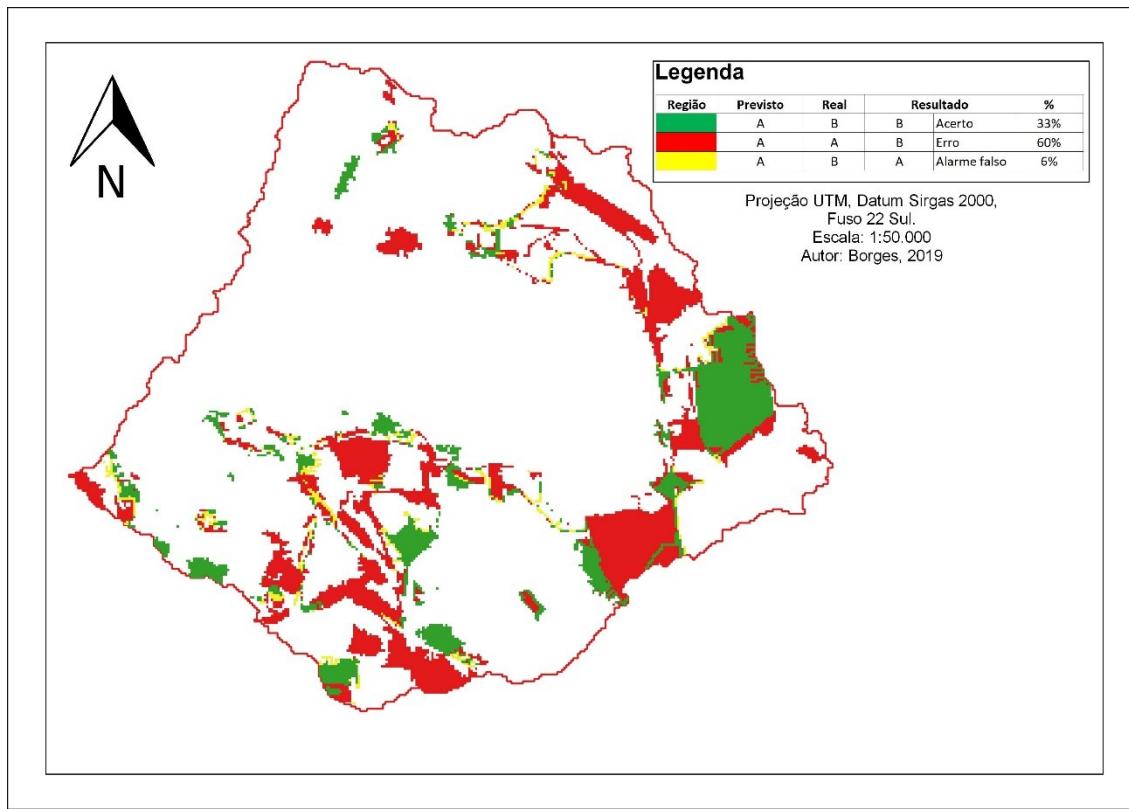


Fonte: O autor.

A figura 32 apresenta o mapa da estimativa de crescimento de áreas com base nos anos de 1998 e 2008 para o ano de 2018. O resultado mostrou que após testes realizados alterando as variáveis, e considerando apenas as que possuíam valores maiores que 0,40 do valor de Cramer, o resultado mostrou ser similar no quesito visual ao mapa de uso do solo para o ano de 2018 como mostrado na figura 18.

Verifica-se na figura 32 o início do crescimento na região leste da bacia hidrográfica de São Pedro o que foi impulsionado levando em conta as variáveis de distância, e a geomorfologia da bacia. No entanto, ainda é possível validar o resultado pelas regiões onde houve acerto ou erro do modelo na estimativa destas áreas conforme mapa apresentado na figura 32.

Figura 32 - Figura do mapa e acerto, erro e falso alerta para a predição de 2018



Fonte: O autor.

Conforme Eastman (2016), o painel de validação do TerrSet demonstra a qualidade da predição do mapa do uso do solo com o mapa real. Este processo é realizado na sobreposição do mapa de uso do solo da figura 18 com o mapa gerado pela cadeia de Markov na figura 31, ilustrando a desempenho do modelo em gerar as classes de uso e ocupação conforme pode ser compreendido apoiando-se nas informações do quadro 3, e o quadro 4 abaixo:

Quadro 3 - Interpretação da validação local

| Região | Interpretação |
|--------|---|
| A B B | Acerto – O modelo previu a mudança e mudou |
| A A B | Erro – O modelo previu a permanência, no entanto mudou |
| A B A | Falso Alarme – O modelo previu a mudança e ela permaneceu |

Fonte: O autor.

Quadro 4 - Interpretação da validação local

| Região | Previsto | Real | Resultado | | % |
|----------|----------|------|-----------|--------------|-----|
| Verde | A | B | B | Acerto | 33% |
| Vermelho | A | A | B | Erro | 60% |
| Amarelo | A | B | A | Alarme falso | 6% |

Fonte: O autor.

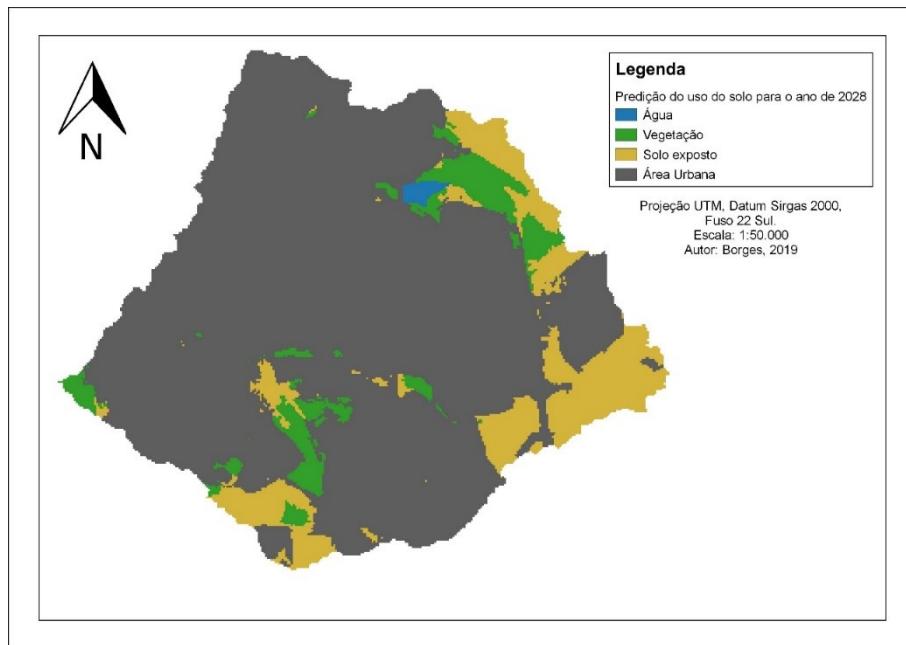
Ao analisar as áreas verdes da figura 32 verifica-se que o modelo acertou as regiões que mudaram de vegetação para solo exposto com base no mapa real de 2018 e solo exposto para área urbana vice-versa. A performance do modelo na validação espacial atingiu os respectivos valores, no quadro 4 acima. A observação destes valores expõe o comportamento do modelo baseando-se nas variáveis de uso e ocupação do solo, e na definição das classes que se esperava a transição para área urbana sendo vegetação e solo exposto. Com isso o software solicita o mapa atual classificado de 2018 e realiza uma análise comparativa por sobreposição com o mapa predito.

As áreas em vermelho demonstram que o modelo estimou que não haveria transição de solo exposto, ou vegetação para área urbana, porém mudou, isto com base no potencial de transição nas figuras 29 e 30. No entanto, levando em conta o uso do solo em 1998, 2008 e 2018 real, a progressão do mesmo mostra que estas áreas mudaram, e estas áreas que mudaram totalizaram em 65% de erro no modelo. O modelo acertou 29%, gerando áreas similares a existentes do mapa real, em destaque a extensa área verde a leste do mapa grande. Os 6% condizem com áreas que o modelo previu e permaneceu, e não configura como um resultado relevante na validação.

Com a finalidade de averiguar a similaridade do mapa de previsão do uso do solo para 2018 (figura 31) em relação ao mapa real (figura 18) de maneira global, foi realizado o teste Kappa sobre as mesmas imagens. O Resultado da concordância do teste Kappa foi de 86,55% entre o mapa da previsão e o real. A partir desta validação global foi possível dar procedimento aos passos seguintes do estudo.

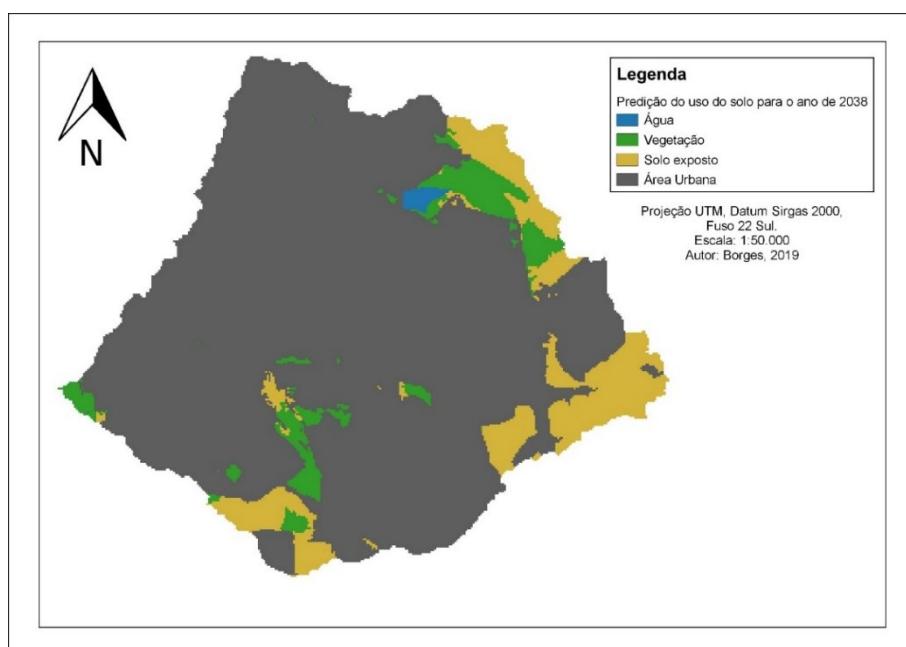
Desta forma, os mapas para os anos de 2028 (Figura 33), 2038 (Figura 34), 2048 (Figura 35) e 2058 (Figura 36) foram gerados e foi possível observar o comportamento da expansão do uso do solo na bacia hidrográfica de São Pedro e para que essa estimativa de uso do solo seja considerada em análises de alterações de fenômenos urbanos futuros.

Figura 33 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2028



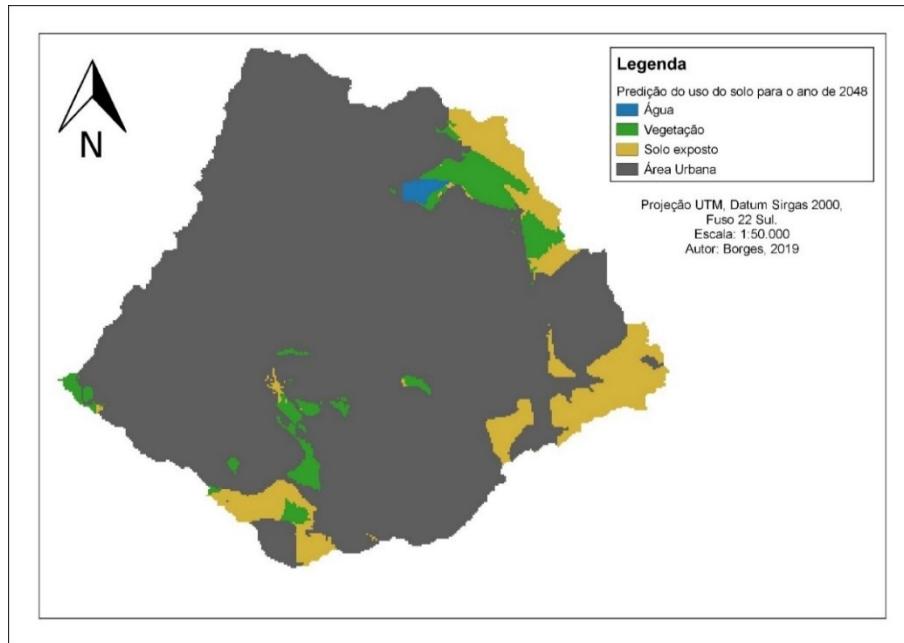
Fonte: O autor.

Figura 34 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2038



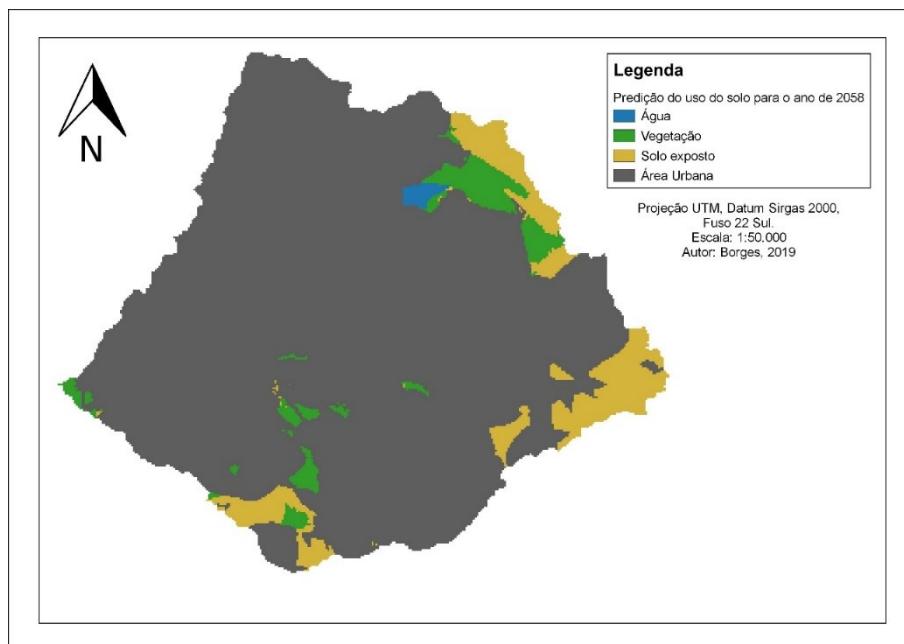
Fonte: O autor.

Figura 35 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2048



Fonte: O autor.

Figura 36 - Figura do mapa de predição do uso do solo para 2058.



Fonte: O autor.

As figuras 33, 34, 35, e 36, são os mapas gerados no Terraset com base nas matrizes de probabilidade de transição da cadeia de Markov, e que foram calculadas por meio da modelagem utilizando redes neurais MLP (*Multi-Layer-Perceptron*). Para definir

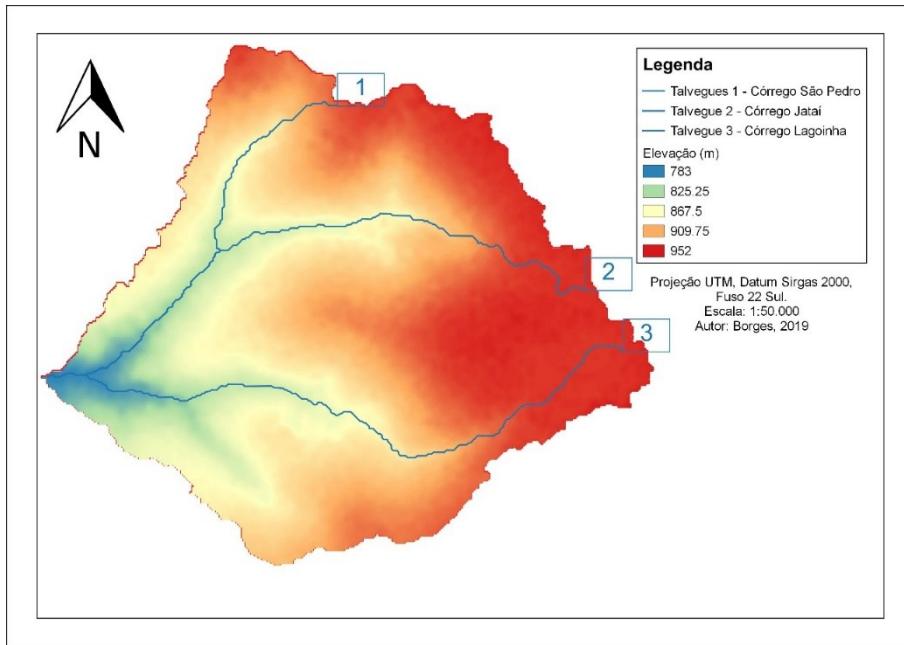
as regiões de crescimento os mapas levaram em conta as regiões com potencial de transição nos mapas das figuras 29 e 30. Observa-se a tendência de crescimento se concentra nas áreas a leste, sudeste, sul e centro da bacia hidrográfica de São Pedro. Vale ressaltar que o modelo não considerou como restrição de expansão urbana, áreas de preservação permanente que se encontram na região central do mapa.

Compreendendo a estimativa de crescimento urbano no interior de uma bacia hidrográfica, há a possibilidade de realizar análises sobre os fenômenos urbanos que podem ou não sofrer alterações com este crescimento. Levando em conta o escoamento superficial, e sabendo que este é alterado com o surgimento de áreas impermeabilizadas pelas práticas de loteamento e intervenções humanas, estes fatos podem ser considerados para estimar qual vazão pode se alcançar em um determinado cenário temporal de uso do solo. Esta hipótese foi utilizada para calcular a vazão do exutório na bacia hidrográfica de São Pedro, na estimativa do uso do solo geradas pela Cadeia de Markov.

4.3 CÁLCULO DO HIDROGRAMA DE PROJETO

As informações sobre o maior talvegue, e a declividade média foram quantificadas através do mapa na figura 37 e disponibilizadas na tabela 8. Estas informações são caracterizadas como dados de entrada para os cálculos hidráulicos preliminares.

Figura 37 - MDE da bacia de São Pedro e identificação dos talvegues.



Fonte: O autor.

Tabela 8 - Características físicas dos talvegues

| | Comp. (m) | Elevação (m) | | i (m/m) |
|------------|-----------|--------------|---------|----------|
| | | Montante | Jusante | |
| Talvegue 1 | 7757,266 | 931,946 | 785,821 | 0,018837 |
| Talvegue 2 | 11215,152 | 945,000 | 785,794 | 0,014196 |
| Talvegue 3 | 11401,194 | 944,978 | 785,675 | 0,013972 |

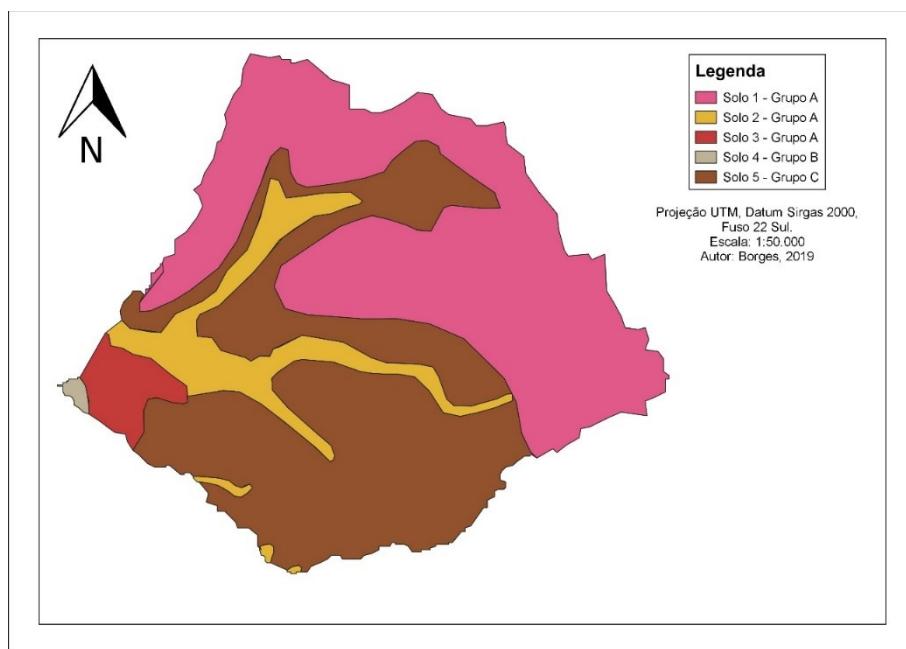
Fonte: O autor.

A declividade neste talvegue 3 foi calculada subtraindo o valor da elevação a montante pela jusante do talvegue sobre a distância total do trecho. O objetivo de quantificar essas informações é para serem consideradas no cálculo do tempo de concentração. Para o cálculo do tempo de concentração da bacia hidrográfica de São Pedro esta pesquisa utilizou a equação de Desbordes (1974), dentre outras que solicitam características geométricas da bacia para a realização do cálculo (SILVEIRA, 2005). Para tornar o tempo de concentração mais próximo da realidade da bacia foi feita também uma comparação com métodos de outros autores conforme Quadro 1, e com o tempo de concentração encontrado no trabalho de Vergütz (2016).

O trabalho de Vergütz (2016) também apoiou a escolha do valor de CN utilizado, e este valor levou em conta o tipo de solo predominante na bacia. Para saber este tipo de

solo, utilizou-se as pesquisas de Andrade (2005) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005). Esse passo permitiu verificar a classificação geotécnica na delimitação da bacia (Andrade, 2005) e com isso indicar o grupo do qual ele pertence conforme a classificação hidrológica determinada por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005). Em seguida foram delimitadas as regiões de cada tipo de solo no interior da bacia de São Pedro, e armazenadas em arquivos vetoriais (*shapefiles*) como apresenta a figura 38, e o cálculo de áreas no QGIS 3.10.

Figura 38 – Figura do mapa da identificação solos para cálculo do CN.



Fonte: O autor.

Primeiramente sobrepondo o mapa de classificação geotécnica de Andrade (2005) na bacia hidrográfica de São Pedro, foram identificados os tipos de solos existentes na bacia, e depois indicou cada grupo hidrológico de solo (Quadro 1) conforme Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), resultando assim no mapa da figura 38.

Cruzando estas informações do grupo hidrológico dos tipos de solo com a descrição do uso do solo com base na tabela 1 (Tucci 1993), foi aplicada uma média ponderada que consistiu em calcular o produto do valor da área delimitada em km^2 pelo respectivo valor de CN (Tabela 1) sobre a área total da bacia, sendo assim definiu-se um valor de CN de 91,50 conforme tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Comparação dos trabalhos de Andrade (2005) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para cálculo do CN médio.

| Id do solo | Descrição – Andrade (2012) | Descrição – Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) | Área (km ²) | CN |
|-----------------|----------------------------|---|-------------------------|----------|
| Solo 1 | Unidade 5 | Grupo A | 21.2041 | 89.33333 |
| Solo 2 | Unidade 2 | Grupo A | 4.7765 | 89.33333 |
| Solo 3 | Unidade 6 | Grupo A | 1.640 | 89.33333 |
| Solo 4 | Unidade 1 | Grupo B | 0.1531 | 92.66667 |
| Solo 5 | Unidade 3 | Grupo C | 20.9936 | 94.33333 |
| Média ponderada | | | 48.767 | 91.49599 |

Fonte: O autor.

O valor de CN encontrado pela média ponderada foi utilizado no método SCS de Lag (1975), e no cálculo do hidrograma no método Santa Bárbara. Outro parâmetro que relaciona o escoamento superficial com o uso do solo e ocupação é o coeficiente de Manning. Este coeficiente foi compatibilizado conforme a mudança ocorrida no uso do solo na bacia durante os anos no talvegue 3 (Figura 37). A análise abrangeu cada seção que demarca as margens esquerda e direita, e calha principal, com espaçamentos variados entre elas. Com essas informações utilizou-se de uma média ponderada relacionando a distância das seções no talvegue pelo valor médio do *manning*, que foram identificados na margem esquerda, direita, e calha principal. Sendo possível definir um único coeficiente de *manning* para cada uso e ocupação nos anos de estudo, levando em conta o espaçamento das seções e a média dos valores de *manning* aplicado sobre elas (tabela 10).

Tabela 10 - Média ponderadas do valor de Manning das sessões

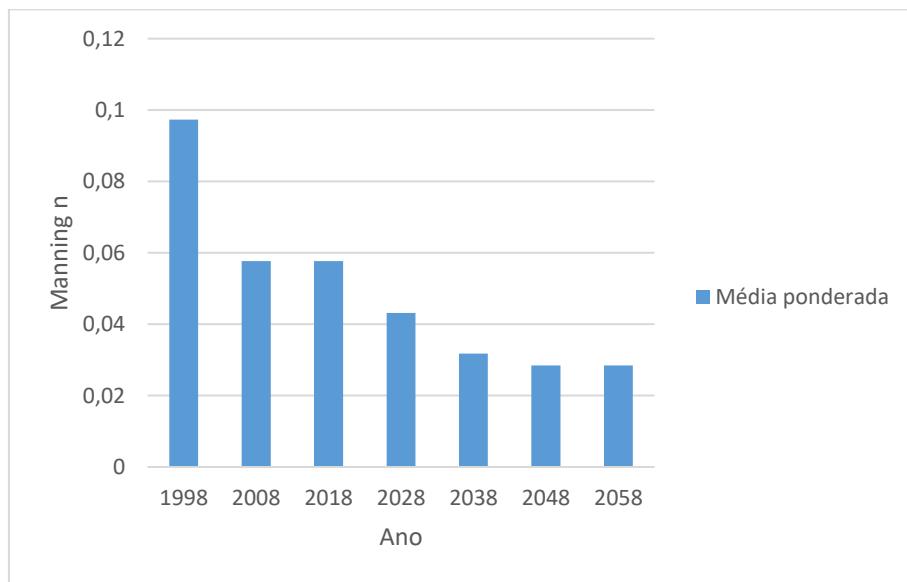
| Ano | Média ponderada |
|------|-----------------|
| 1998 | 0,097311594 |
| 2008 | 0,057667844 |
| 2018 | 0,057667844 |
| 2028 | 0,043174023 |

| | |
|------|-------------|
| 2038 | 0,031763288 |
| 2048 | 0,028456826 |
| 2058 | 0,028456826 |

Fonte: O autor.

A tabela 10 mostra o cálculo da média ponderada sobre o valor n de Manning, que foi adotado no cálculo do tempo de concentração pelo método Onda Cinemática (1963). Além disso estima-se que o coeficiente de *manning* foi alterado em relação a modificação do uso e ocupação do solo no decorrer dos anos de 1998 a 2058 e seu valor é reduzido em torno de 80% conforme pode ser visualizado no gráfico 2.

Gráfico 2 - Queda do valor n de Manning até 2058.



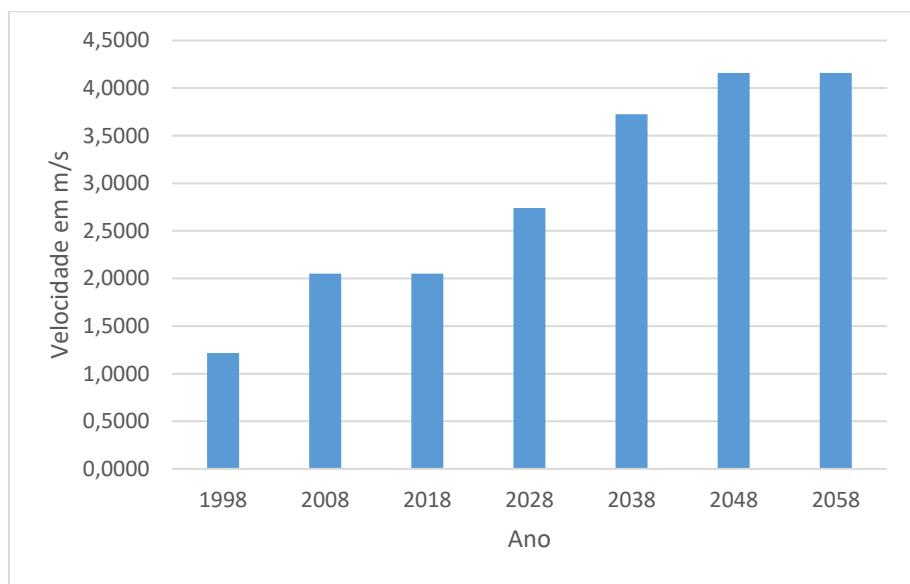
Fonte: O autor.

Analisando o gráfico 2 é possível compreender a progressão de queda do valor do coeficiente de Manning. E conforme visto na revisão bibliográfica, este valor relaciona o escoamento precipitado com a superfície, nota-se em tabelas disponíveis por autores que valores maiores de *manning* estão ligados a uso dos solos naturais, como pastos e vegetação, desta forma é possível verificar que com o passar dos anos estas coberturas de solo são substituídas por terrenos diversos, ou por meio da impermeabilização.

Aplicando a fórmula que calcula a velocidade (Equação 11) do escoamento superficial sobre o valor de *manning* é possível notar a progressão da velocidade (Gráfico

3) com a diminuição do coeficiente de Manning durante os anos. Para isso foi considerado de forma hipotética um raio hidráulico R de 1 metro, no entanto considerando a mesma declividade da bacia no valor de 0.013972 m/m.

Gráfico 3 – Estimativa do aumento da velocidade do escoamento superficial.



Fonte: O autor.

Ao reparar o gráfico 3 entende-se que a partir do fato explicado anteriormente sobre a substituição de coberturas naturais, e como ela se aplica a alteração do coeficiente de Manning, tem-se a velocidade do escoamento superficial mostrando que são indiretamente proporcionais entre si, conforme o valor n de Manning é diminuído a velocidade do escoamento é aumentada. Sendo o *manning*, e o CN apresentados como dois parâmetros necessários para obter importantes variáveis no processo de desenvolvimento do hidrograma de projeto, as curvas IDF também tem papel importante no cálculo do tempo de concentração pelo método onda cinemática. Elas são utilizadas para estimar o tempo de concentração, e sua obtenção se deu através do software Pluvio 2.1, selecionando o município de Uberlândia e obtendo os parâmetros K a, b, c, e d.

Com a junção de todos estes parâmetros os tempos de concentração foram calculados com os métodos apresentados, sendo possível verificar a variação do tempo de um método pelo outro, bem como a variação de métodos para bacias urbanas e rurais, conforme o quadro 5 a seguir que disponibiliza essas informações:

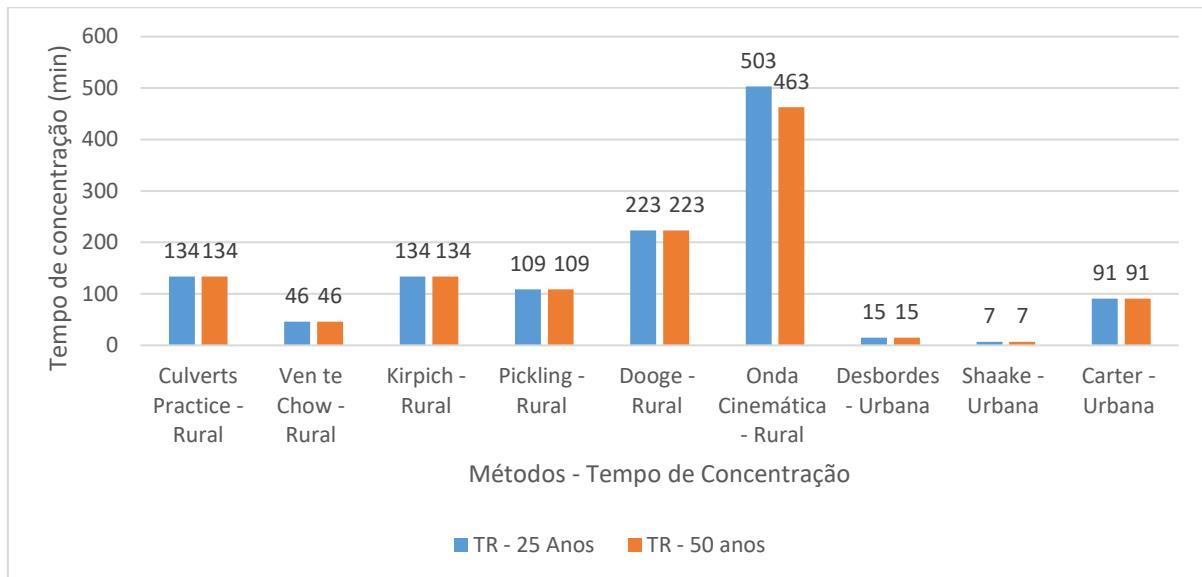
Quadro 5 - Tipos e portes de bacias hidrográficas para cálculo de tc .

| Autor | Área (km ²) | Tipo |
|-----------------------------|-------------------------|--------|
| Culverts Practice (1955) | < 0,45 | Rural |
| Ven Te Chow (1962) | 20 | Rural |
| Kirpich (1940) | < 0,45 | Rural |
| Picking (Pinto et al (1976) | - | Rural |
| Giandotti (1940) | - | Rural |
| SCS lag (1975) | < 8,1 | Rural |
| Dooge (1956) | < 140 | Rural |
| Onda cinemática (1963) | - | Rural |
| Schaake et al (1967) | < 0,7 | Urbana |
| Carter (1961) | < 21 | Urbana |
| Desbordes | < 51 | Urbana |

Fonte: Silveira (2005). Adapt. Autor (2020).

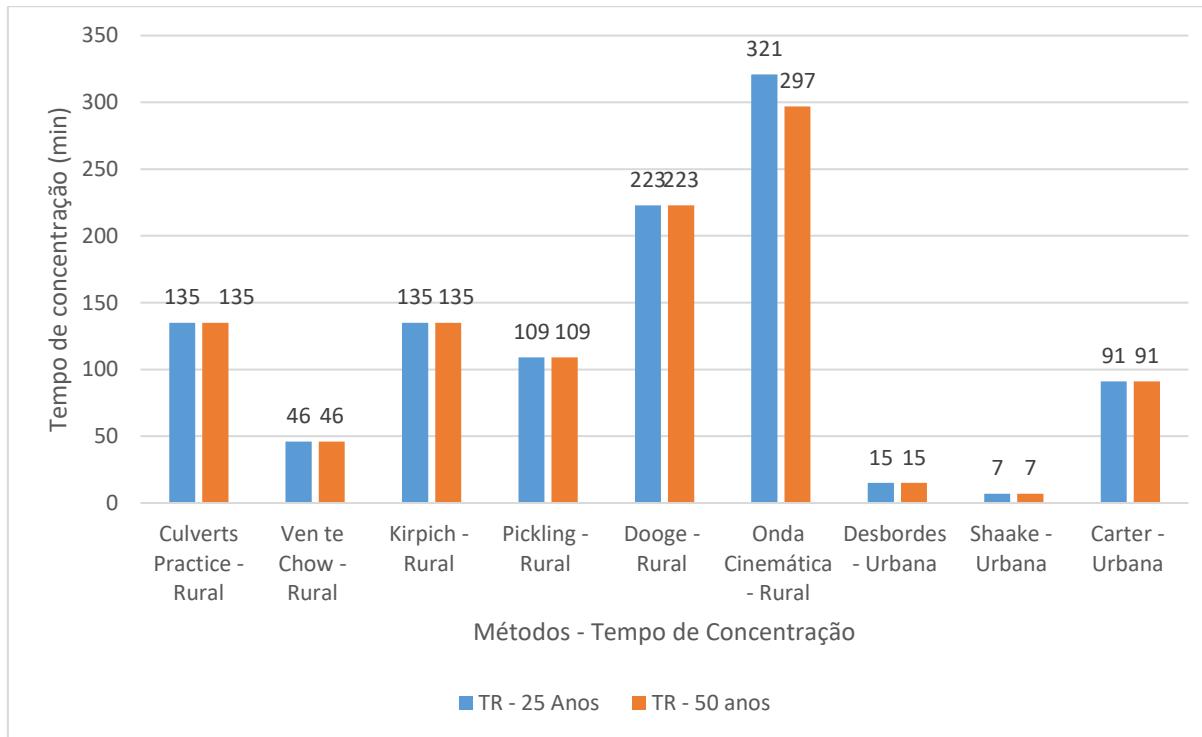
O quadro 5 foi desenvolvido conforme as informações apresentadas no trabalho de Silveira (2005), e o mesmo afirma que tais métodos ainda estão ausentes de informações importantes sobre as características das bacias além da dificuldade de acesso as publicações originais. Enfim observando os valores de tempo de concentração calculados por estes métodos nota-se uma grande discrepância entre os mesmos conforme apresentado nos gráficos 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Em primeiro lugar se dá pela caracterização de bacias, sendo elas rurais e urbanas, e diferentes áreas em km².

Gráfico 4 - Tempo de concentração para o ano de 1998



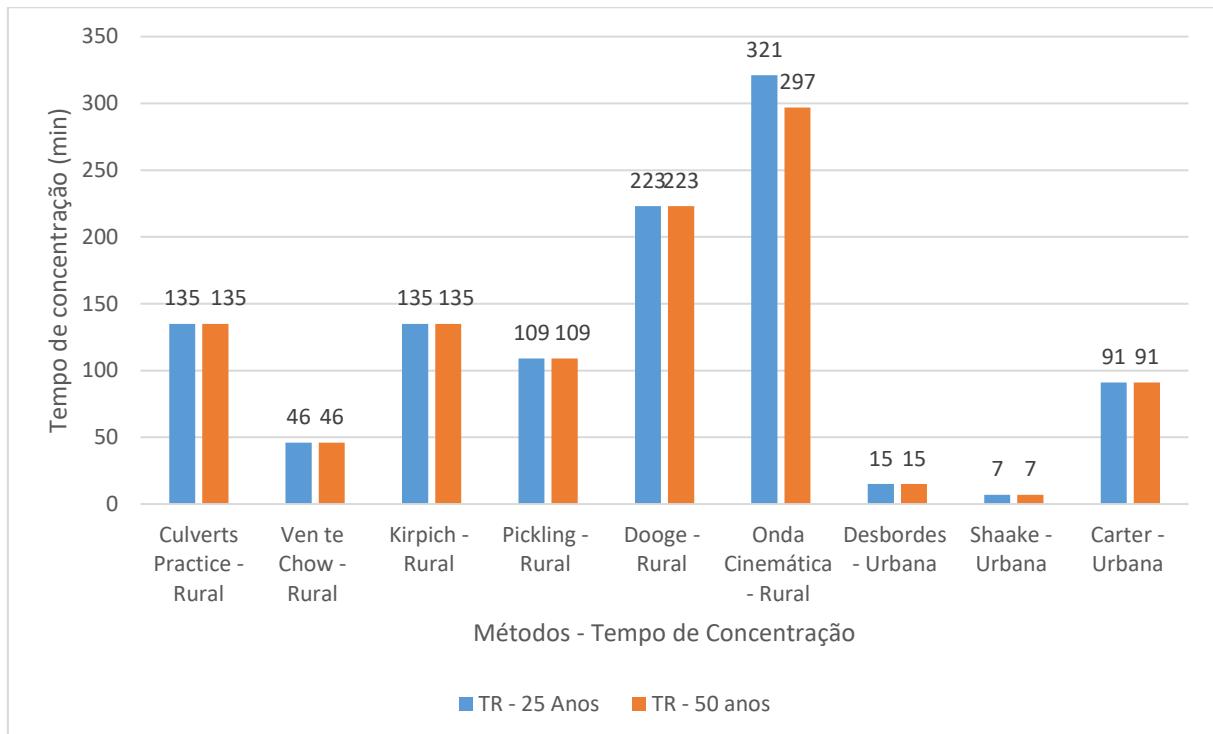
Fonte: O autor.

Gráfico 5 - Tempo de concentração para o ano de 2008



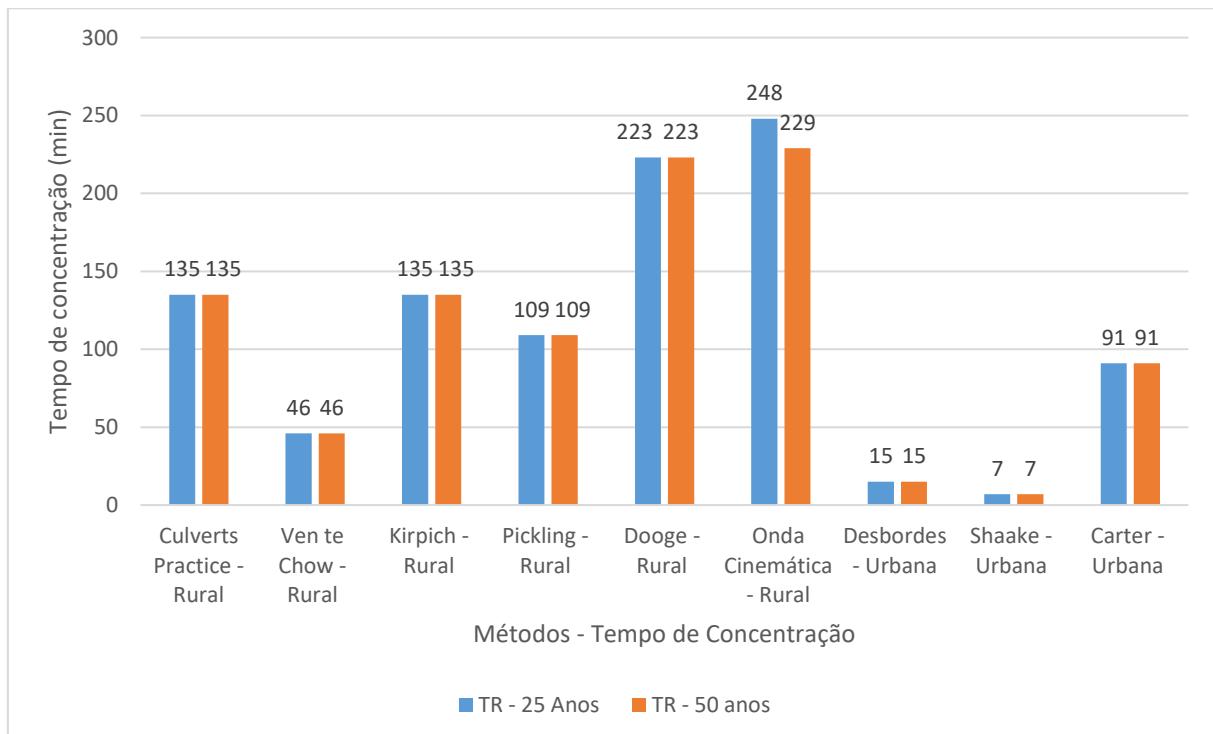
Fonte: O autor.

Gráfico 6 - Tempo de concentração para o ano de 2028



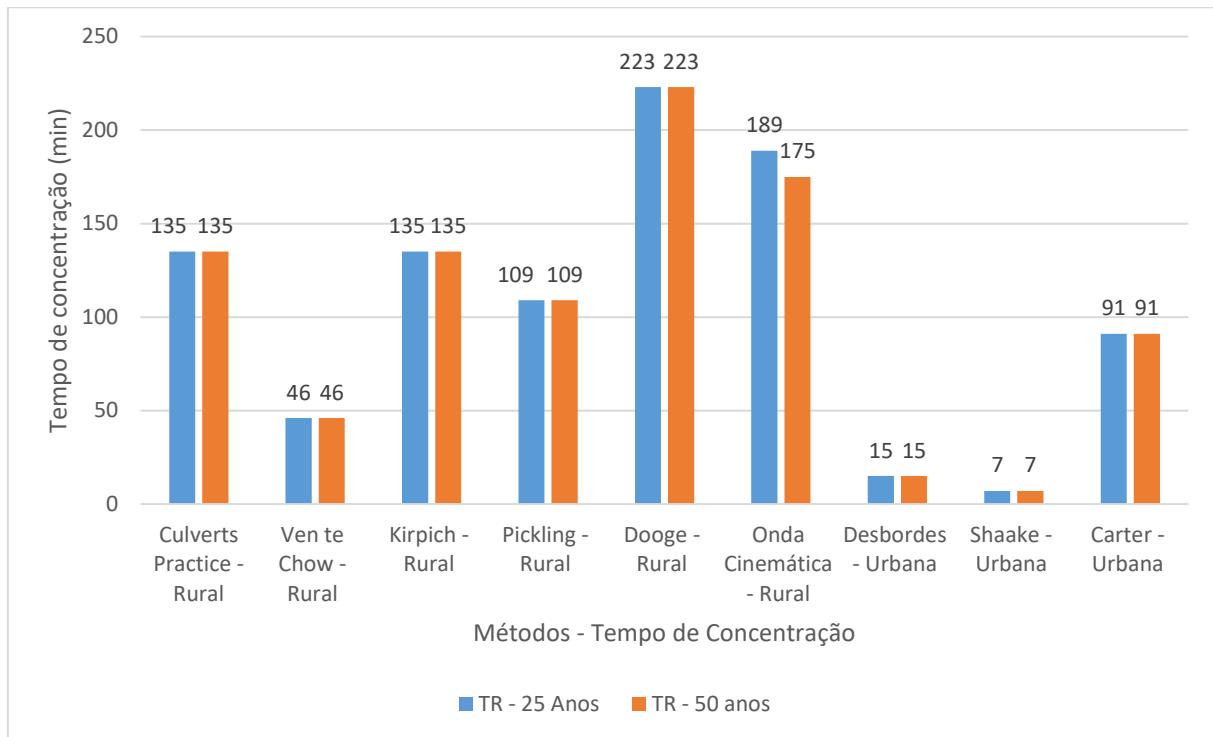
Fonte: O autor.

Gráfico 7 -Tempo de concentração para o ano de 2038



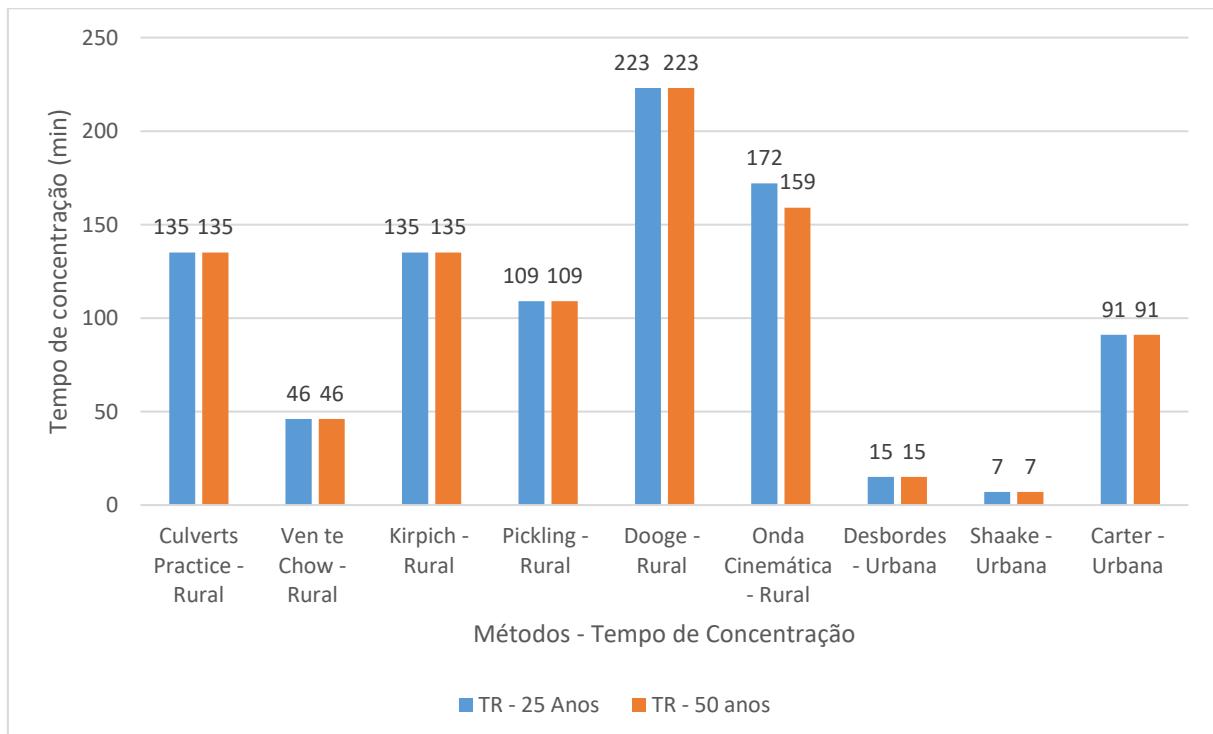
Fonte: O autor.

Gráfico 8 -Tempo de concentração para o ano de 2048



Fonte: O autor.

Gráfico 9 - Tempo de concentração para o ano de 2058



Fonte: O autor.

Percebe-se que únicos métodos que sofreram alterações durante os anos são Dooge (1956) e Onda Cinemática (1963). Conforme o quadro 4 Dooge (1956) é indicado para bacias rurais de grande porte, Onda Cinemática (1963) também abrange esse tipo de bacia. Os métodos indicados para bacias urbanas, no entanto permaneceram no mesmo valor, e apresentam uma grande diferença de tempo dos demais. Como hipótese, o método por Onda Cinemática (1963) utiliza mais variáveis como a IDF, o que explora melhor o cálculo pois considera uma variável relacionada a precipitação. Entende-se, portanto, que bacias urbanizadas possuem um tempo reduzido de concentração pelo fato de possuírem uma fração maior de áreas impermeabilizadas em relação as bacias rurais. Mas para fins de padronização será adotado como tempo de concentração o mesmo valor conforme adotado por Vergütz (2016), de 2 horas, para o qual a autora sugere que esta duração é o tempo próximo a média dos valores encontrado em cada método.

Sendo assim, é de interesse da pesquisa demonstrar que a predição do uso do solo futuro altera estes dados fundamentais para a elaboração de projetos hidráulicos. Mas ainda assim por meio destas informações é possível perceber que ainda faltam estudos a fim de garantir a integridade dos resultados, sendo pela discrepância dos mesmos e pela falta de padronização de caracterização de bacias que necessitam encontrar o tempo de concentração.

O tempo de concentração é o parâmetro solicitado para a distribuição temporal por blocos alternados, que define a intensidade para ser transformada em vazão no método Santa Bárbara. Utilizando, portanto, o tempo de duração de 120 minutos, e a IDF de Uberlândia, tem-se a intensidade em mm/h para um tempo de retorno de 25 (Tabela 11 e Gráfico 10) e 50 anos (Tabela 12 e gráfico 11):

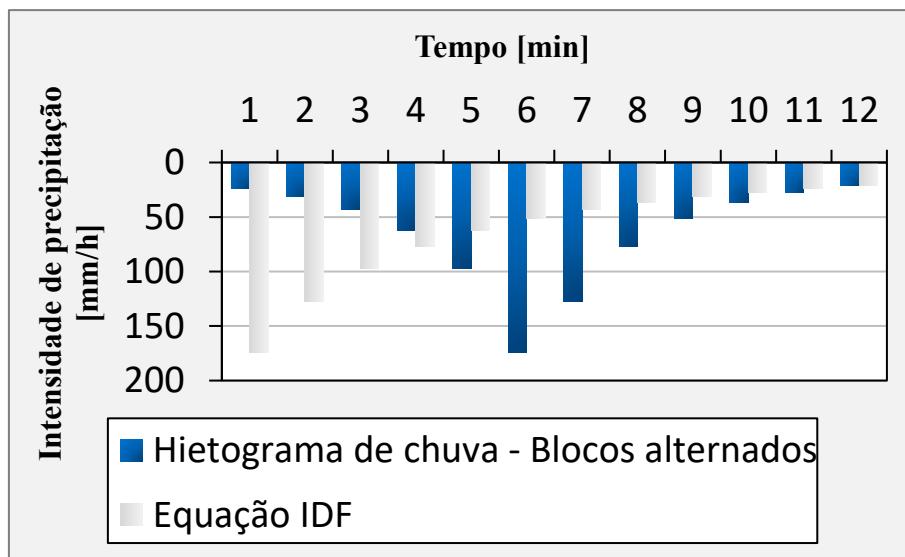
Tabela 11 - Memorial de cálculo para a determinação do hietograma por blocos alternados TR = 25.

| Passo | Alternado | td (min) | i (mm/h) | P = (mm) | i.td (mm) | ΔP (mm) | ΔP/t (mm/h) | t (min) | i (mm/h) |
|-------|-----------|----------|----------|----------|-----------|---------|-------------|---------|----------|
| 1 | 11 | 10 | 174,6 | 29,1 | 29,1 | 174,6 | 174,6 | 10 | 24,0 |
| 2 | 9 | 20 | 151,1 | 50,4 | 21,3 | 127,6 | 127,6 | 20 | 31,4 |
| 3 | 7 | 30 | 133,2 | 66,6 | 16,2 | 97,3 | 97,3 | 30 | 42,9 |
| 4 | 5 | 40 | 119,0 | 79,4 | 12,8 | 76,6 | 76,6 | 40 | 61,9 |
| 5 | 3 | 50 | 107,6 | 89,7 | 10,3 | 61,9 | 61,9 | 50 | 97,3 |
| 6 | 1 | 60 | 98,2 | 98,2 | 8,5 | 51,1 | 51,1 | 60 | 174,6 |
| 7 | 2 | 70 | 90,3 | 105,3 | 7,1 | 42,9 | 42,9 | 70 | 127,6 |

| | | | | | | | | |
|----|----|-----|------|-------|-----|------|-----|------|
| 8 | 4 | 80 | 83,6 | 111,4 | 6,1 | 36,5 | 80 | 76,6 |
| 9 | 6 | 90 | 77,8 | 116,6 | 5,2 | 31,4 | 90 | 51,1 |
| 10 | 8 | 100 | 72,7 | 121,2 | 4,6 | 27,4 | 100 | 36,5 |
| 11 | 10 | 110 | 68,3 | 125,2 | 4,0 | 24,0 | 110 | 27,4 |
| 12 | 12 | 120 | 64,4 | 128,8 | 3,5 | 21,3 | 120 | 21,3 |

Fonte: O autor.

Gráfico 10 - Distribuição temporal por blocos alternados TR = 25.



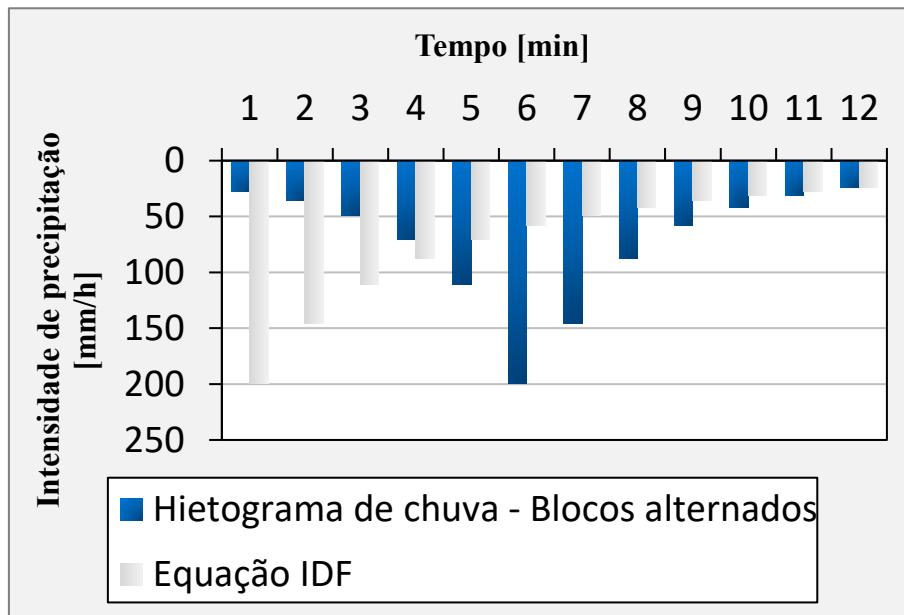
Fonte: O autor.

Tabela 12 - Memorial de cálculo para a determinação do hietograma por blocos alternados TR = 50.

| Passo | Alternado | td [min] | P = i.td [mm] | ΔP / t [mm/h] | t [min] | i [mm/h] |
|-------|-----------|-------------|------------------|--------------------------|---------|----------|
| 1 | 11 | 10 | 199,2 | 33,2 | 10 | 27,4 |
| 2 | 9 | 20 | 172,4 | 24,3 | 20 | 35,9 |
| 3 | 7 | 30 | 151,9 | 18,5 | 30 | 48,9 |
| 4 | 5 | 40 | 135,8 | 14,6 | 40 | 70,6 |
| 5 | 3 | 50 | 122,8 | 11,8 | 50 | 111,0 |
| 6 | 1 | 60 | 112,0 | 9,7 | 60 | 199,2 |
| 7 | 2 | 70 | 103,0 | 8,2 | 70 | 145,5 |
| 8 | 4 | 80 | 95,3 | 6,9 | 80 | 87,4 |
| 9 | 6 | 90 | 88,7 | 6,0 | 90 | 58,3 |
| 10 | 8 | 100 | 83,0 | 5,2 | 100 | 41,6 |
| 11 | 10 | 110 | 77,9 | 4,6 | 110 | 31,2 |
| 12 | 12 | 120 | 73,4 | 4,0 | 120 | 24,3 |

Fonte: O autor.

Gráfico 11 - Distribuição temporal por blocos alternados TR = 25.



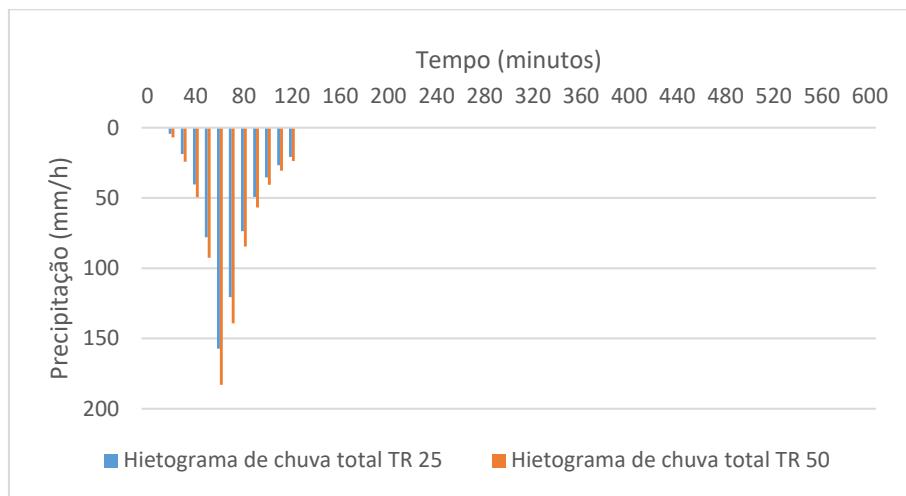
Fonte: O autor.

As tabelas 11 e 12 mostram os procedimentos de cálculo a fim de se obter a intensidade em mm/h pelo método por blocos alternados. Os gráficos 10 e 11 por sua vez organizaram os blocos de precipitação conforme a explicação do método na revisão bibliográfica considerando a maior parcela no meio e reorganizando as demais conforme ilustrado acima. O passo de cálculo foi considerado 10 minutos para uma duração de uma chuva de 120 minutos pois foi o que melhor viabilizou a intensidade no gráfico.

Modificando o tempo de retorno entre 25 e 50 anos, nota-se que a variação da intensidade máxima em cada um dos cálculos tem um aumento de 14,08%. Supõe-se então que esse aumento na precipitação em mm/h quanto maior o tempo de retorno maior a precipitação no entanto menor a probabilidade de que a chuva torrencial ocorra em relação ao tempo de retorno de 25 anos.

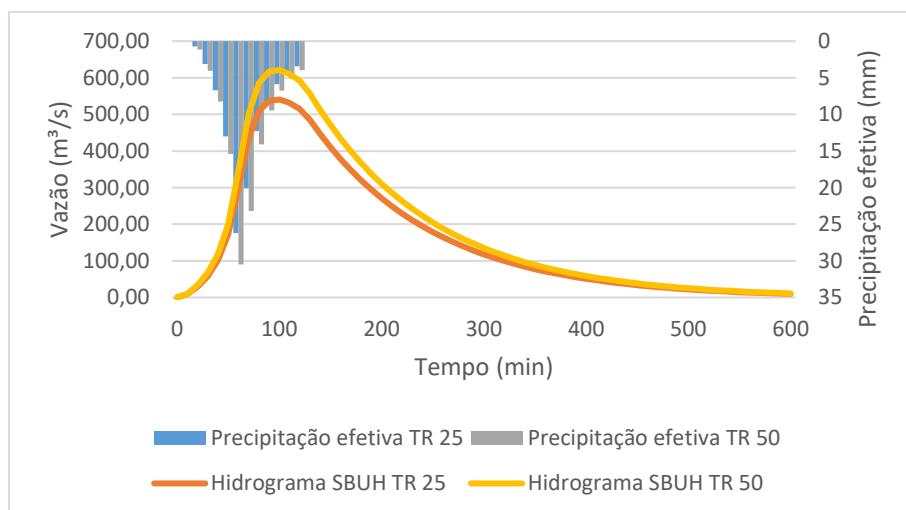
Sendo assim estes hietogramas (Gráfico 11 e 12) são os dados de entrada tanto para a elaboração do hietograma de chuva total (Gráfico 12) para cada um dos anos bem como para o hidrograma de projeto pelo método Santa Bárbara (Gráficos 13, 14, 15, 16, 17, 18, e 19) que estima a vazão no exutório da bacia de São Pedro no decorrer dos anos.

Gráfico 11 - Hietograma de chuva total de projeto.



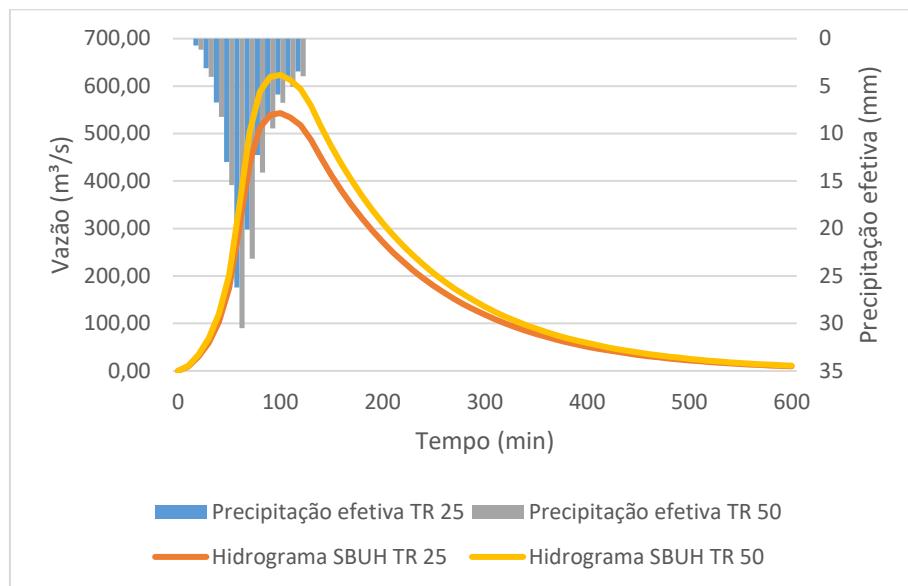
Fonte: O autor.

Gráfico 12 - Hidrograma para o uso do solo em 1998.



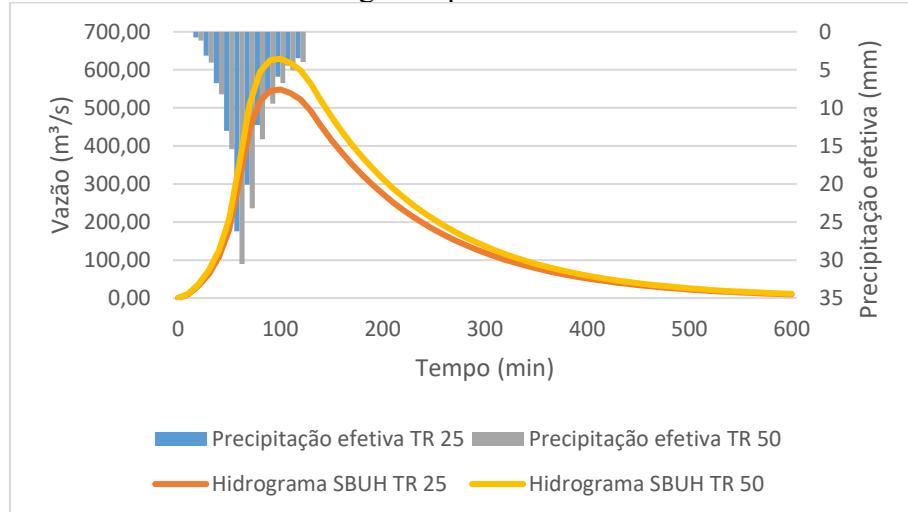
Fonte: O autor.

Gráfico 13 - Hidrograma para o uso do solo em 2008.



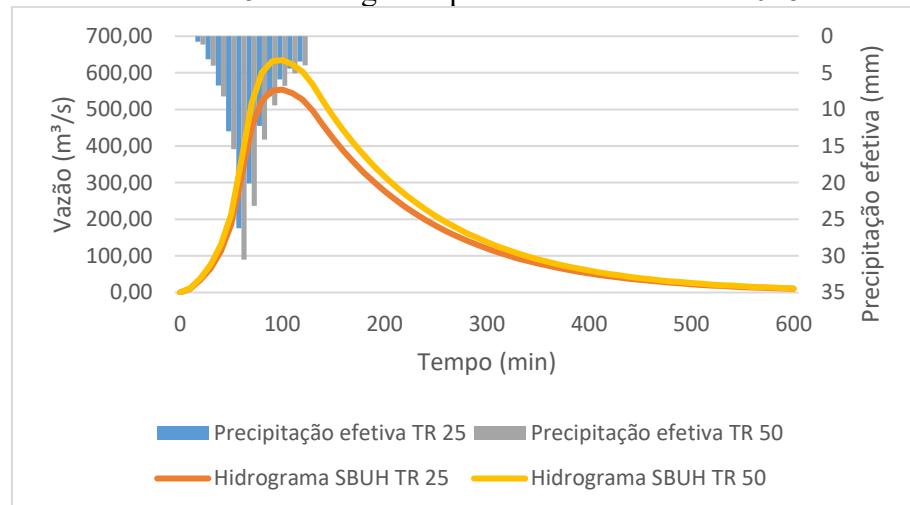
Fonte: O autor.

Gráfico 14 - Hidrograma para o uso do solo em 2018.



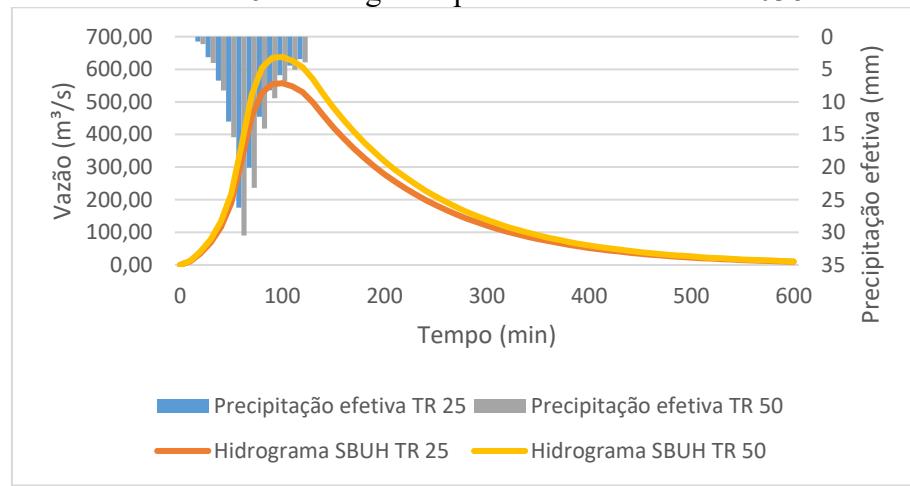
Fonte: O autor.

Gráfico 15 - Hidrograma para o uso do solo em 2028.



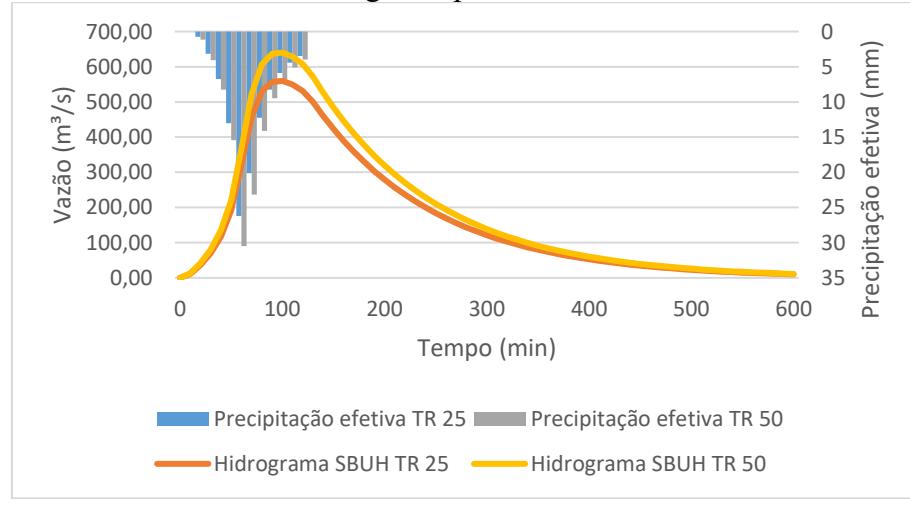
Fonte: O autor.

Gráfico 16 - Hidrograma para o uso do solo em 2038



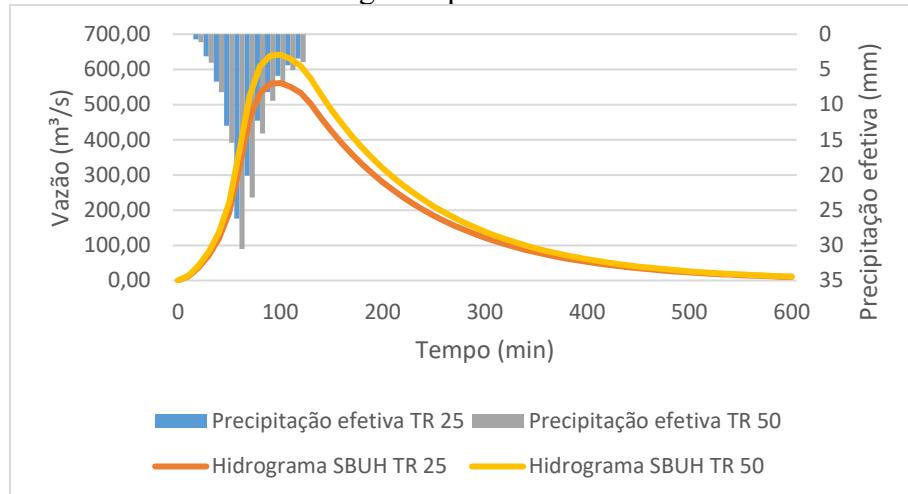
Fonte: O autor.

Gráfico 17 - Hidrograma para o uso do solo em 2048



Fonte: O autor.

Gráfico 18 - Hidrograma para o uso do solo em 2058.



Fonte: O autor.

O hietograma de chuva total no gráfico 12 corresponde ao processo de separação do escoamento com auxílio do método SCS-CN que resultou na intensidade de precipitação efetiva. Observando os hidrogramas apresentados nos gráficos 13, 14, 15, 16, 17, 18, e 19 é possível constatar a vazão no exutório da bacia de São Pedro durante os anos de 1998 a 2058, para dois tempos de retorno 25 e 50 anos.

Confirma-se o aumento da vazão (m^3/s) por conta da alteração do uso e ocupação do solo e especialmente pelo aumento das áreas impermeáveis no decorrer de 1998 a 2058. Nota-se também que há diferença do pico de vazão adotando um tempo de retorno de 25 e 50 anos, o que é evidente que estes parâmetros devem ser adotados em projeto de drenagem com cautela e com a finalidade de adequá-los a demanda prevista de vazão.

Verifica-se, portanto, que o método Santa Barbara acompanha o aumento da taxa de impermeabilização para cada ano, e isso o caracteriza como um método de eficiente quando se planeja projetar a vazão para cenários futuros de uso e ocupação do solo. No entanto isso foi possível com a predição do uso do solo para os decênios de 2028, 2038, 2048, e 2058 aplicando a Cadeia de Markov em análises espaciais.

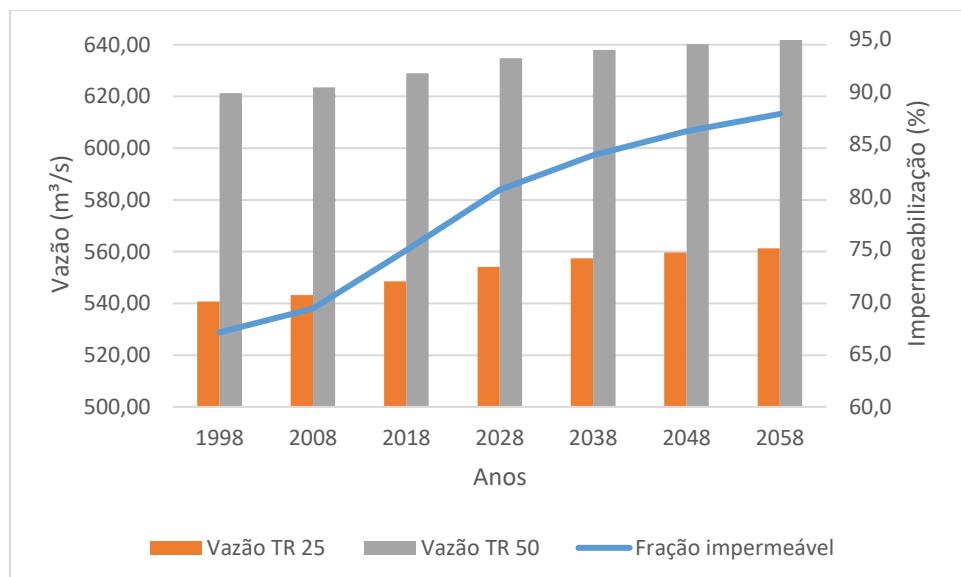
Desta forma com o passar dos anos a predição obtida pela Cadeia de Markov determinou a áreas de expansão da área urbana na bacia de São Pedro, e o aumento da vazão decorrente deste processo. É importante atentar sobre o seguinte fato, a escolha de um cenário urbano para 2058 mostra que a vazão de pico chega em um possível limiar com a impermeabilização da bacia em 87,91%, conforme pode ser visualizado no gráfico 20 e na tabela 13 abaixo:

Tabela 13 - comparação da fração impermeável com o aumento da vazão durante os anos.

| Ano | Imp(%) | Vazão máx. (m ³ /s) | |
|------|--------|--------------------------------|----------|
| | | TR 25 | TR 50 |
| 1998 | 67,10 | 540,6927 | 621,2781 |
| 2008 | 69,36 | 543,1678 | 623,5125 |
| 2018 | 74,92 | 548,4922 | 629,0096 |
| 2028 | 80,69 | 554,1604 | 634,7143 |
| 2038 | 83,97 | 557,3825 | 637,9571 |
| 2048 | 86,28 | 559,6518 | 640,241 |
| 2058 | 87,91 | 561,2530 | 641,8525 |

Fonte: O autor.

Gráfico 19 – Comparação do tempo de retorno no aumento da vazão pela impermeabilização.



Fonte: O autor.

A partir do gráfico 20 verifica-se um comportamento comentando anteriormente que relaciona o aumento da vazão com a taxa de impermeabilização, é possível notar o limiar ocorrendo nas últimas 3 décadas em relação as vazões de pico encontradas no cálculo do hidrograma. É notório o aumento da vazão, mesmo que o método Santa Bárbara seja acessível e de fácil aplicação, as vazões encontradas podem estar superdimensionadas.

O fato de o método Santa Bárbara não considerar outras variáveis demonstra este fato, variáveis relacionadas a dispositivos de retenção de precipitação e vazão, sistemas

de drenagem, bem como a geomorfologia e outras características físicas que compreendem toda bacia hidrográfica de São Pedro. Além disso, ressalta-se que projetos de drenagem devem ter um cuidado rigoroso na elaboração dos cálculos, pelas incertezas de situações importantes no projeto. Portanto recomenda-se que os projetos de drenagem urbana compreendam cálculos que considerem todas as particularidades de uma determinada bacia hidrográfica para que isso resulte em projetos eficientes.

5 CONCLUSÃO

A análise da tendência de expansão do uso e ocupação na bacia hidrográfica de São Pedro com o processo estocástico da cadeia de Markov, apresenta-se como um importante recurso para fornecer análises para cenários posteriores e como esta expansão pode impactar em outros fatores ligados ao uso e ocupação do solo. O escoamento como apresentado na bibliografia é um dos fenômenos naturais que é alterado com o aumento de áreas impermeabilizadas provenientes da expansão de uso e ocupação do solo.

A partir do uso da classificação por segmentação em imagens orbitais de escala média permitiu a estimativa da tendência da mudança do uso e ocupação na bacia hidrográfica de São Pedro para os anos de 1998, 2008 e 2018. Inicialmente com a classificação do uso e ocupação dos mapas, foi quantificado que a área impermeável (Tabela 13) em 1998 era de 67,10%, em 2008 houve um aumento para 69,36%, e deste ano para 2018 constatou um aumento significativo de 5,56% totalizando em 74,92% de área impermeável para este ano.

A análise preditiva realizada com a classificação do uso dos solos de 1998 e 2008, e com a definição dos pesos relativos das demais variáveis, auxiliaram na determinação do potencial de transição da classe de uso do solo nos decênios até 2058. Os testes de aderência de Cramer para essas variáveis obtiveram valores acima de 0,40 (Tabela 5), sendo 0,4147 para o MDE, 0,4732 para a distância na mancha urbana de 2018, e 0,4646 para a distância das vias de tráfego. Portanto a pesquisa considerou como aceitáveis para a execução do modelo MPL redes neurais. Contudo, entende-se que estes testes de aderência podem ter seus valores melhorados por meio de tratamentos nas imagens orbitais antes do processo de classificação e no uso de produtos de outros satélites.

A execução do modelo resultou na predição do mapa de uso do solo para o ano de 2018, sendo assim foi necessário validar este de maneira local, e global. Ambas utilizam como dado base para validação a classificação do uso do solo real para o ano de 2018. E primeiramente do ponto de vista local (Figura 32) o modelo acertou 33% das áreas existentes na imagem real do ano de 2018 (Figura 18), ou seja, o modelo previu a transição de pixels na região do tipo de solo testado para área urbana, e este de fato mudou para área urbana. A porcentagem de erro de 60%, quer dizer que o modelo previu a permanência do tipo de solo, mas houve transição na região.

Essa porcentagem de erro mesmo que seja superior a de acerto, não justificou como um problema para o trabalho uma vez que se levar em conta o que é observado como tendência de crescimento com base nos mapas de 1998, 2008 e 2018, é possível verificar que estas regiões mostram ser tendências de crescimento da área urbana.

Portanto, observando os mapas de 1998, 2008 e 2018 (Figuras 16, 17, e 18) as regiões em tendência de expansão na bacia estão a leste e em áreas, centro e ao sul da bacia. Essa disposição pode ser verificada, primeiramente de forma genérica pelo comportamento da mancha urbana, em seguida a partir das análises de perda e ganho de vegetação (Figura 21) e solo exposto (Figura 22), e principalmente pelos mapas de potencial de transição (Figuras 29 e 30), obtidos após a execução do modelo.

Portanto validar o modelo no sentido local, caracterizou como uma importante premissa para que a tendência de expansão em cenários futuros acompanhe o que é esperado nas regiões dos mapas de reais. Logo a validação global a partir do teste Kappa foi realizada para confirmar a o grau de concordância entre o mapa da predição, e o mapa real. O resultado de 86,55% mostrou se aceitável com base nas premissas do teste.

Além disso a classe água que não foi considerada na modelagem do potencial de transição pode ter implicado para que o teste Kappa resultasse em um valor maior de concordância. E por fim considera-se que eventualmente o resultado deste teste Kappa seja reduzido para os anos de 2028, 2038, 2048 e 2058.

Com a validação do modelo para a predição de 2018 a matriz de transição da cadeia de Markov foi calculada para os decênios de 2018, 2028, 2038, 2048 e 2058 (Figuras 33, 34, 35, e 36). Primeiramente a estimativa mostrou que a tendência de crescimento resultou numa fração impermeável, de 87,91% (Tabela 13) na bacia de São Pedro no ano de 2058. Além disso verificou-se como foi a alteração de outros parâmetros

físicos da bacia hidrográfica de São Pedro, como o valor de *manning* que teve valor reduzido em 80% (Gráfico 2), com a redução deste coeficiente houve o aumento de 4 vezes a na velocidade de escoamento superficial (Gráfico 3), ressaltando que foi considerado um raio hidráulico hipotético de 1 m, e a declividade média do talvegue principal para essa análise.

O valo de CN passou por uma análise que cruzava as informações sobre a característica geotécnica do tipo do solo e sobre qual grupo hidrológico de solo eles pertenciam, logo aplicando uma média ponderada do produto da área do tipo de solo em km^2 com o respectivo valor de CN indicado pela tabela 9, sobre a área total obteve-se um valor médio de CN para a bacia hidrográfica de São Pedro, de 91,50. Ressalta-se, que não foram considerados a existência e a possibilidade de ampliação de infraestrutura de drenagem, bem como outras variáveis que poderiam refinar o modelo e torná-lo mais robusto do ponto de vista de previsão. Isso se justifica no foco da pesquisa que era avaliar a capacidade da ferramenta e da metodologia proposta.

No que se refere a intensidade efetiva de precipitação, encontradas por meio das curvas IDF e aplicando o método de distribuição temporal por blocos alternados, além de fixar uma duração de chuva de 2 horas, encontrou picos diferentes de intensidade, sendo 157,22 mm/h para 25 anos, e 183,03 mm/h para 50 anos (Gráfico 12). Com isso observa-se que o tempo de retorno reage em conformidade com estes dois valores uma vez que admite se que o tempo de retorno maior é indicado para projetos mais conservadores.

Portanto possuindo todas estas análises o método Santa Barbara foi responsável por calcular a evolução do escoamento superficial desde 1998 a 2058. Neste cálculo notou-se que a progressão do aumento na taxa de impermeabilização acompanhou a vazão durante os anos. O cálculo contabilizou (Tabela 13) uma vazão de 540,69 m^3/s considerando um tempo de retorno de 25 anos, e 621,28 m^3/s considerando um tempo de retorno de 50 anos para o ano de 1998. De 1998 para 2008 houve um aumento de 2,48 m^3/s para o tempo de retorno de 25 anos, e 2,23 m^3/s para um tempo de retorno de 50 anos.

Houve um aumento significativo de 2008 para 2018 (Gráfico 20) na taxa de impermeabilização, e a vazão acompanhou esse aumento resultando em 5,32 m^3/s , e 5,50 m^2/s para um tempo de retorno igual a 25 anos e 50 anos respectivamente. Por fim levando em conta o aumento da taxa de impermeabilização, a vazão do escoamento superficial foi

estimada em 561,25 m³/s para um tempo de retorno de 25 anos e 641,85 m³/s para um tempo de retorno de 50 anos.

Visto que o processo estocástico cadeia de Markov possui várias aplicações para estimar comportamentos futuros, este método estatístico aplicado a análises espaciais demonstrou ser promissor pelo conjunto de outras análises que o acompanham a fim de verificar potenciais mudanças futuras, ganhos e perdas de diferentes usos dos solos, dentre outros. Portanto ainda outros estudos são necessários testando outros tipos de modelagem e outras variáveis que auxilia na análise do processo de transição, bem como validando-os com o intuito de fortalecer o submodelo de transição. No entanto para o objetivo do trabalho que abrange a visualização de um dado fenômeno urbano sendo este o escoamento superficial com a mudança do uso do solo, e a predição conta com um importante documento que possibilita estimar a magnitude de vazões futuras, a fim de apoiar o planejamento urbano.

O estudo sobre a predição de áreas urbanas contribuiu para analisar a progressão, e a modificação de fenômenos urbanos relacionados a precipitação, e como a cobertura terrestre pode modificar parâmetros relacionados ao tempo de escoamento superficial e finalmente a modificação do hidrograma da bacia do Córrego São Pedro em Uberlândia, MG, Brasil. Esta metodologia apresentou potencial para ser aplicada em outros estudos a fim de verificar num cenário urbano de 2058 quais outros fenômenos urbanos podem ter modificações explicadas através da predição.

No entanto a utilização de métodos para demonstrar como um fenômeno urbano pode ser alterado a partir da expansão urbana, necessita de fundamentos consistentes uma vez que é possível testar a precisão, e validar uma predição pelos próprios SIG que realizam estas análises, os métodos utilizados para quantificar fenômenos urbanos devem ser submetidos aos mesmos testes de consistência.

Os métodos aqui utilizados são responsáveis por obter um hidrograma de projeto, do qual leva em conta variáveis físicas que são diretamente ligadas ao uso e ocupação, e que tiveram como contribuição um dos objetivos específicos que é a expansão da área urbana da bacia de São Pedro. Mas, conforme demonstrado nos procedimentos que antecedem os resultados da vazão no exutório, existe incerteza e empirismo ligado aos métodos hidráulicos e hidrológicos.

Como trabalho futuro, recomenda-se ampliar o número de variáveis como a infraestrutura de drenagem, e outras restrições ao escoamento espacial; melhorar a escala dos dados de entrada de dados; realizar o pré-processamento das imagens por meio das correções de atmosfera e azimute da plataforma; como forma de promover análises mais robustas. Além disso, mudanças no método Santa Bárbara para considerar variações de tamanho de bacia e tipos de ocupação. Dessa forma, as futuras simulações contribuirão para a exatidão e visualização prévia de situações críticas que complementarão os projetos de drenagem urbana e manejo de águas pluviais na perspectiva de planos de infraestrutura urbana evitando novos desastres.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULRAZZAK, Mohamed et al. Flash flood risk assessment in urban arid environment: case study of Taibah and Islamic universities' campuses, Medina, Kingdom of Saudi Arabia. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.780-796, jan. 2019. Informa UK Limited.

<https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1545705>

ANDRADE, R. F. de. **Mapeamento Geotécnico Preliminar em Escala de Semi-Detalhe (1:25.000) da Área de Expansão Urbana de Uberlândia**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia - MG, 2005.

ANDRADE, S. L.; FERREIRA, V. de O.; SILVA, M. M. Elaboração de um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, [S.l.], v. 24, n. 41, p.1-16, 6 jan. 2014. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2014v24n41p1>

BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 5-16, 2000. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v5n4.p5-16>

BONITO, R. F. **RISCOS DE ACIDENTES E MORTES EM USUÁRIOS DE MOTOCICLETAS EM UBERLÂNDIA – MG**. 2011. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

BORZENKOVA, I. I. Types and Characteristics of Precipitation. **Hydrological Cycle**, Russia, v. 2, n. 1, p.1-9, ago. 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3

BRASIL. Lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acessado em: 14 de maio.

CAIXETA, A. C. M.; NISHIYAMA, Lui.; Caracterização Morfométrica Da Bacia Do Córrego São Pedro Em Uberlândia – Mg Utilizando Técnicas De Geoprocessamento. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICO**, 21., 2015, Brasília - DF. **Anais**. Brasília - DF: ABRH, 2015. p. 1 - 7.

CANHOLI, A. P.; **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. ed. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2014.

CHANG, L.; HUANG, S.; Assessing urban flooding vulnerability with an emergency approach. **Landscape and Urban Planning**, [s.l.], v. 143, p.11-24, nov. 2015. Elsevier BV.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.004>

CHAVES, M. E. D. LOURENÇONI D.; SOARES, J.; F.; FERREIRA E., PENA, M. R. da S.; MIRANDA L. H. de. GEOMORFOLOGIA E PLANEJAMENTO AMBIENTAL: MAPEAMENTO DO RELEVO E DELIMITAÇÃO DAS CLASSESS DE DECLIVIDADE NO MUNICÍPIO DE CAMPOS GERAIS - MG. In: X CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 10., 2016, Poços de Caldas. **Anais**. Poços de Caldas: IFMG, 2016. p. 1 - 6.

CHIN, David A. Estimating Peak Runoff Rates Using the Rational Method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v. 145, n. 6, p.2-8, jun. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001387)

CHING, W.; NG, M. K.; **Markov Chains**: Models, Algorithms and Applications. USA: Springer Science+Business Media, Inc., 2006.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n. 303, de 20 de março de 2002. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 2002.

COSTA, J. de J. da S.; **Probabilidade e Processos Estocásticos**. São Paulo - SP: Vozes Ltda, 1971.

DUARTE, G. **Organização e Representação de Dados Geográficos**. Rio de Janeiro: Puc-rio, 2019. Color.

EASTMAN, J. Ronald. **TerrSet - Geospatial Monitoring and Modeling System**: Manual. Worcester, Massachusetts, Usa: Clark University, 2016.

EMBRAPA. **LANDSAT**: Land Remote Sensing Satellite. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html>. Acesso em: 2 maio 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa Produção e Informação, 5^a Ed., 2018.

FERREIRA, C. L. Rios urbanos e os processos de transformação da paisagem: uma discussão sobre o ribeirão São Bartolomeu na cidade de Viçosa, Minas Gerais.2012. 42p. Monografia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **DRAINAGE MANUAL 625-040-002**: Drainage Manual. Tallahassee, Florida: Office of Design, Drainage Section, 2017.

FONTOURA NETO, A. G. da; PONTES, H. M. M; GONZAGA L; BRAUNS, M. do R; SIGOLO M; RIBEIRO, M. P. C; CAVARARO R. **Manual Técnico de Uso da Terra.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2013. 171 p.

G1 Triangulo Mineiro. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/2013/05/chuva-ventos-fortes-e-granizo-causam-desespero-em-uberlandia.html>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

GROSTEIN, M. D. Metrópole e Expansão Urbana: A Persistência de Processos "Insustentáveis". **São Paulo Perspectiva**, [s.l.], vol.15, n.1, p.13-19. jan. 2001. <https://doi.org/10.1590/S0102-88392001000100003>

GUAZZELLI, Alex. **Prevendo o futuro, Parte 1: O Que é a Análise Preditiva?** 2012. Disponível em: <<https://www.ibm.com/developerworks/br/industry/library/ba-predictive-analytics1/index.html>>. Acesso em: 05 dez. 2018.

HAQUE, A.; ASAMI, Y. Optimizing urban land use allocation for planners and real estate developers. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s.l.], v. 46, p. 57-69, mai. 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.04.004>

HARDER, C. **The ArcGIS® Book: Big Ideas about Applying Geography to Your World.** New York Street, Redlands, California: Esri Press, 2015. 156 p.

HEGAZY, Ibrahim Rizk; KALOOP, Mosbeh Rashed. Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.117-124, jun. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.02.005>

HONG, Y.; ADLER, R.; HUFFMAN, G. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 43, n. 2, p. 245-256, 13 mar. 2007.

<https://doi.org/10.1007/s11069-006-9104-z>

HOUGHTALEN, R. J.; HWANG, N. H. C.; AKAN, A. O. **Engenharia Hidráulica.** 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012

HUANG, H. el al. The changing pattern of urban flooding in Guangzhou, China. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 622-623, p.394-401, mai. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.358>

JOHNSON, R. GIS Technology for Disasters and Emergency Management. **An Esri White Paper.** New York, p. 2-6. mai. 2000.

JONKMAN, S.N.; BOCKARJOVA M.; KOK, M.; BERNADINI P. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. **Ecological Economics**, [s.l.], v. 66, n. 1, p. 77-90, mai. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.022>

KAR, R.; REDDY, G. P. O.; KUMAR, N.; SINGH, S. K. Monitoring spatio-temporal dynamics of urban and peri-urban landscape using remote sensing and GIS – A case study from Central India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.401-411, dez. 2018. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.12.006>

KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York: Springer, 2013.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>

LENGLER, C.; MENDES, C. A. B. O Financiamento do Investimento Público no Sistema de Drenagem Urbana de Águas Pluviais no Brasil. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, v. 17, n. 31, p. 60-74, jun. 2015.
<https://doi.org/10.21452/rde.v17i31.2250>

LU, Qi; JOYCE, Justin; IMEN, Sanaz; CHANG, Ni-bin. Linking socioeconomic development, sea level rise, and climate change impacts on urban growth in New York City with a fuzzy cellular automata-based Markov chain model. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, [s.l.], v. 46, n. 3, p.551-572, 21 jul. 2017. SAGE Publications.
<https://doi.org/10.1177/2399808317720797>

MAHINY, A.S.; TURNER, B. J. Modeling Past Vegetation Change Through Remote Sensing and G.I.S: A Comparison of Neural Networks and Logistic Regression Methods. **Environment and Society**, Australian, p. 1-24, 2003.

MAHMON, N. A.; YA'ACOB, N.; YUSOF, A. L.; JAAFAR, J. Classification Methods for Remotely Sensed Data: Land Use and Land Cover Classification Using Various Combinations of Bands. **Jurnal Teknologi**, Malaysia, v. 10, n. 74, p.89-96, mar. 2015.
<https://doi.org/10.11113/jt.v74.4838>

MAMÉDIO, F.; CASTRO, N.; CORSEIUL, C. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.1-17, 20 jul. 2018. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH.
<https://doi.org/10.21168/rega.v15e1>

Markov, A.A. ‘Rasprostranenie zakona bol'shih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga’. Izvestiya Fiziko-matematicheskogo obschestva pri Kazanskom universitete, 2 ser. t.15, 135–156, 1906.

MARQUES, A. P. V. **A Produção Do Espaço Urbano No Loteamento Vila Marielza Em Uberlândia (Mg) 1981/2017: contradições espaciais e jurídicas na busca pelo direito à cidade**. 2018. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade

Federal de Goiás, Catalão - Go, 2018.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, 1998. 814 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de.; ROSA, A. N. de C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B. de.; BAPTISTA, G. M. de M.; BRITES, R; S. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB - Universidade de Brasília, 2012.

NGUYEN, T. A.; et al. Toward a sustainable city of tomorrow: a hybrid Markov–Cellular Automata modeling for urban landscape evolution in the Hanoi city (Vietnam) during 1990–2030. **Environment, Development and Sustainability**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.429-446, 19 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC.

<https://doi.org/10.1007/s10668-017-0046-2>

PORANGABA, G. F. Ortiz. **O CLIMA URBANO DAS CIDADES DO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO**: uma análise do campo térmico de Assis, Cândido Mota, Maracaí e Tarumã. 2015. 354 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

RADWAN, Taher M.; BLACKBURN, G. Alan; WHYATT, J. Duncan; ATKINSON, Peter M. Dramatic Loss of Agricultural Land Due to Urban Expansion Threatens Food Security in the Nile Delta, Egypt. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 11, n. 3, p.1-20, 8 fev. 2019. MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/rs11030332>

RIMAL, B. et al. Land Use/Land Cover Dynamics and Modeling of Urban Land Expansion by the Integration of Cellular Automata and Markov Chain. **ISPRS - International Journal of Geo-information**, [s.l.], v. 7, n. 4, p.1-21, 19 abr. 2018. MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/ijgi7040154>

RODRIGUES, M. J; SOARES, B. R. Os Planos Urbanos de Uberlândia (1907/1980): considerações iniciais. In: **I simpósio regional de geografia perspectivas para o cerrado no século XXI**. Uberlândia, 2003.

ROMALI, N.S. APPLICATION OF HEC-RAS AND ARC GIS FOR FLOODPLAIN MAPPING IN SEGAMAT TOWN, MALAYSIA. **International Journal of Geomate**, [s.l.], v. 14, n. 43, p.125-131, 1 mar. 2018. International Journal of Geomate.

<https://doi.org/10.21660/2018.43.3656>

SANTIAGO, C. M. C.; SALES, M. C. L.; SILVA, E. V. da. Caracterização Geomorfologica da Bacia Hidrografica do Rio São Nicolau-PI. **Revista do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí**, Teresina/Piauí, v. 6, n. 2, p.150-164, jun. 2017.

SANTOS, A. R. dos; PELUZIO, T. M. de O.; SAITO, N. S. **SPRING 5.1.2: Passo a Passo: Aplicações Práticas.** Espírito Santo; Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Ufes – PPGCF/CCA-UFES, 2010.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.i], v. 10, n. 4, p.05-18, out. 2005.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>

SHAH, H.; GHAZALI, R. Prediction of Earthquake Magnitude by an improved ABC-MLP. **Developments in E-systems Engineering**. 2011. P.6.

<https://doi.org/10.1109/DeSE.2011.37>

SIDDQUI, A. el at. Urban growth dynamics of an Indian metropolitan using CA Markov and Logistic Regression. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [s.l.], p.1-18, dez. 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.006>

SILVA, L. M. da. **Cadeias de Markov e Aplicações**. 2017. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Matemática, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, 2017.

SILVA, L. P. et al. Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**, [s.l.], v. 21, p.1-13, mar. 2020. Elsevier BV.

<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00811>

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, Rs, v. 1, n. 10, p.5-23, mar. 2005.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>

SILVEIRA, E. M. de O. **The Geostatistical Context Employed in Remote Sensing Applications: Image Classification, Change Detection and Forest Inventory**. 2018. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras – MG, 2018.

SMITH, M. J de; GOODCHILD, M. F; A LONGLEY, P. **Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools**. 6. ed. Uk, London: The Winchelsea Press, 2018. 618 p

SOBRAL B. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; TERASSI, P. M. de B.; MÚNIZ-JÚNIOR, J. G. R.; Variabilidade Espaço-Temporal e Interanual da Chuva no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.i], v. 22, n. 14, p.281-308, jun. 2018.

<https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>

TOMAZ, P. Fórmula de Manning e Canais. In: TOMAZ, Plínio. **Curso de Manejo de águas pluviais**. [s.i]: Eng. Plínio Tomaz, 2013. Cap. 50. p. 1-70.

TUCCI, C. E. M; BERTONI, J. C. (Org). **Inundações Urbanas na América do Sul 1^a** ed.; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre-RS. jan. 2003. 156 p. Tucci, C.E.M. e Marques, D.M.L.M. Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, pp. 363-382. 2000.

TUCCI, C.E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre - Rs: da UFRGS/ABRH, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre - RS: ABRH/RHAMA, 2007. 393 p.

USGS. **USGS Global Visualization Viewer–Landsat 8**. Disponível em:<<http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 2 setembro 2018.

VALERIANO, M. de M. **Modelo Digital de Elevação com Dados SRTM Disponíveis para a América do Sul**. 2004. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geomática, Inpe, São José dos Campos, 2004.

VAZ, V. B. **Avaliação do Custo Do Risco De Inundações Urbanas**: Estudo de Caso dos Danos de Inundação em Porto Alegre –RS. 2015. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre –rs, 2015

VERGÜTZ, L. A. A. **Análise da Implantação de Reservatórios de Detenção na Bacia de São Pedro e Modelagem Hidrodinâmica da Avenida Governador Rondon Pacheco**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia - Ufu, Uberlândia - MG, 2016.

WENG, Q. M. Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. **Environmental Management**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.737-748, dez. 2001.

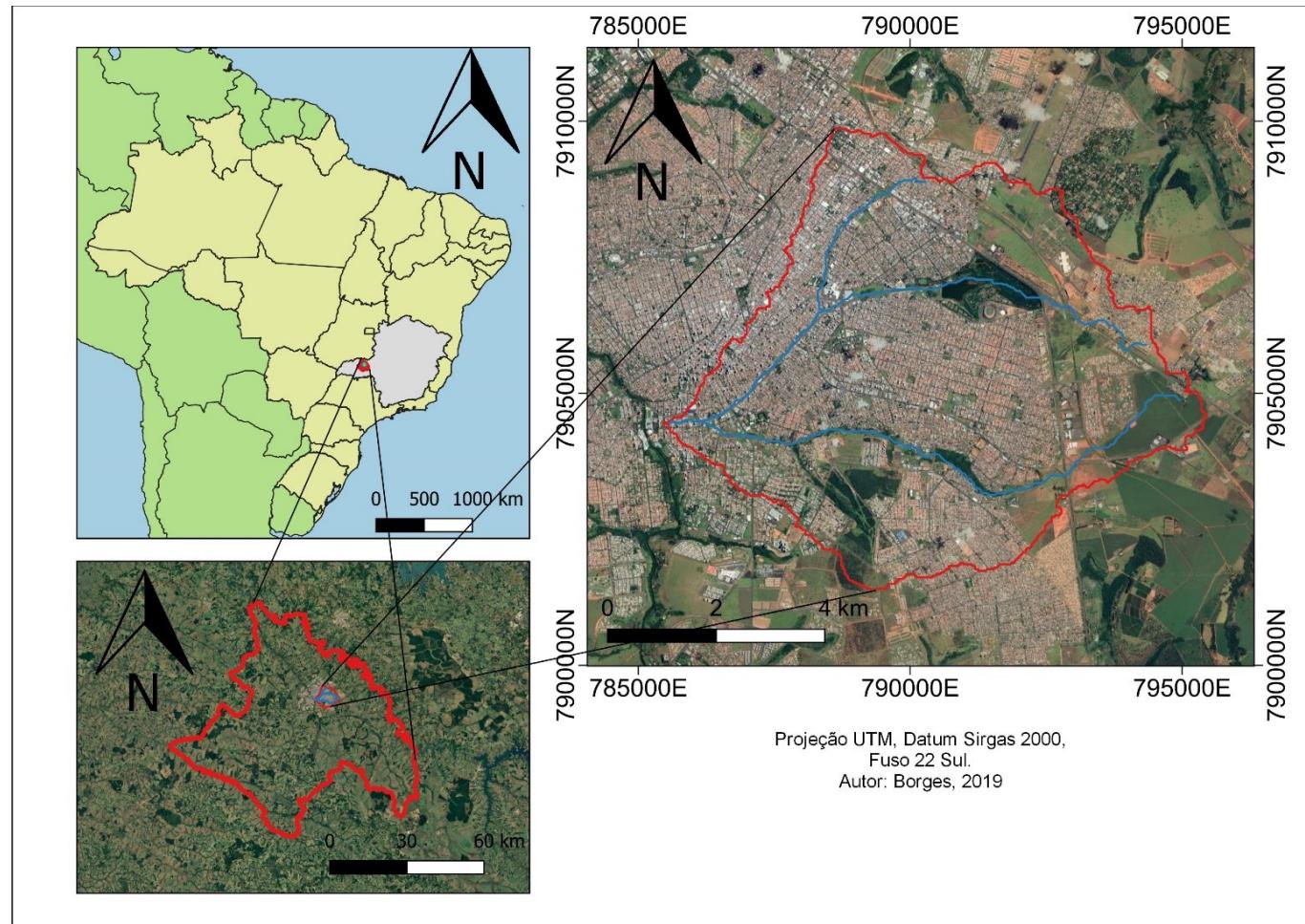
<https://doi.org/10.1007/s002670010258>

ZHOU, Q. et al. Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 658, p.24-33, mar. 2019. Elsevier BV.

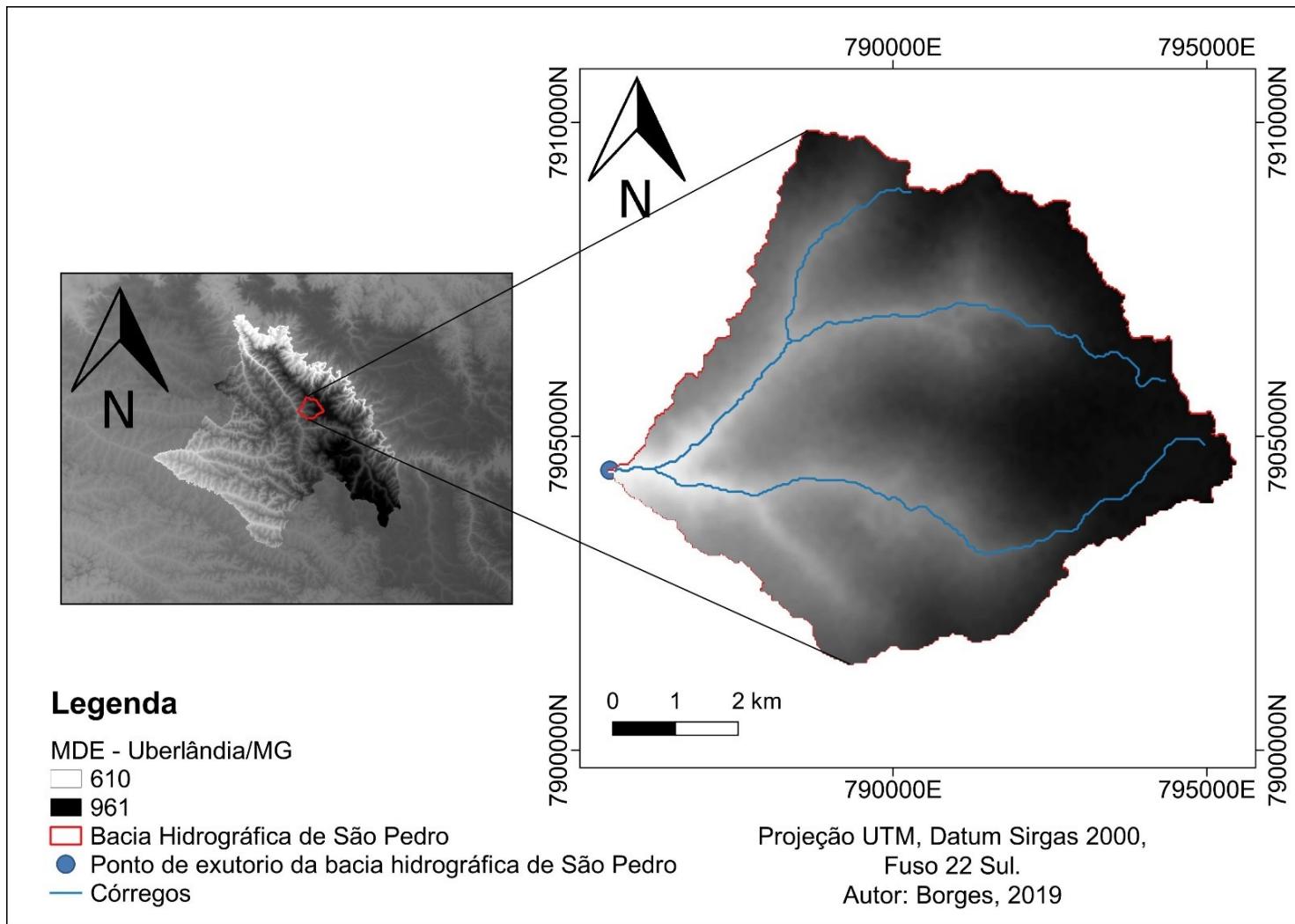
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184>

APÊNDICE A – MAPAS

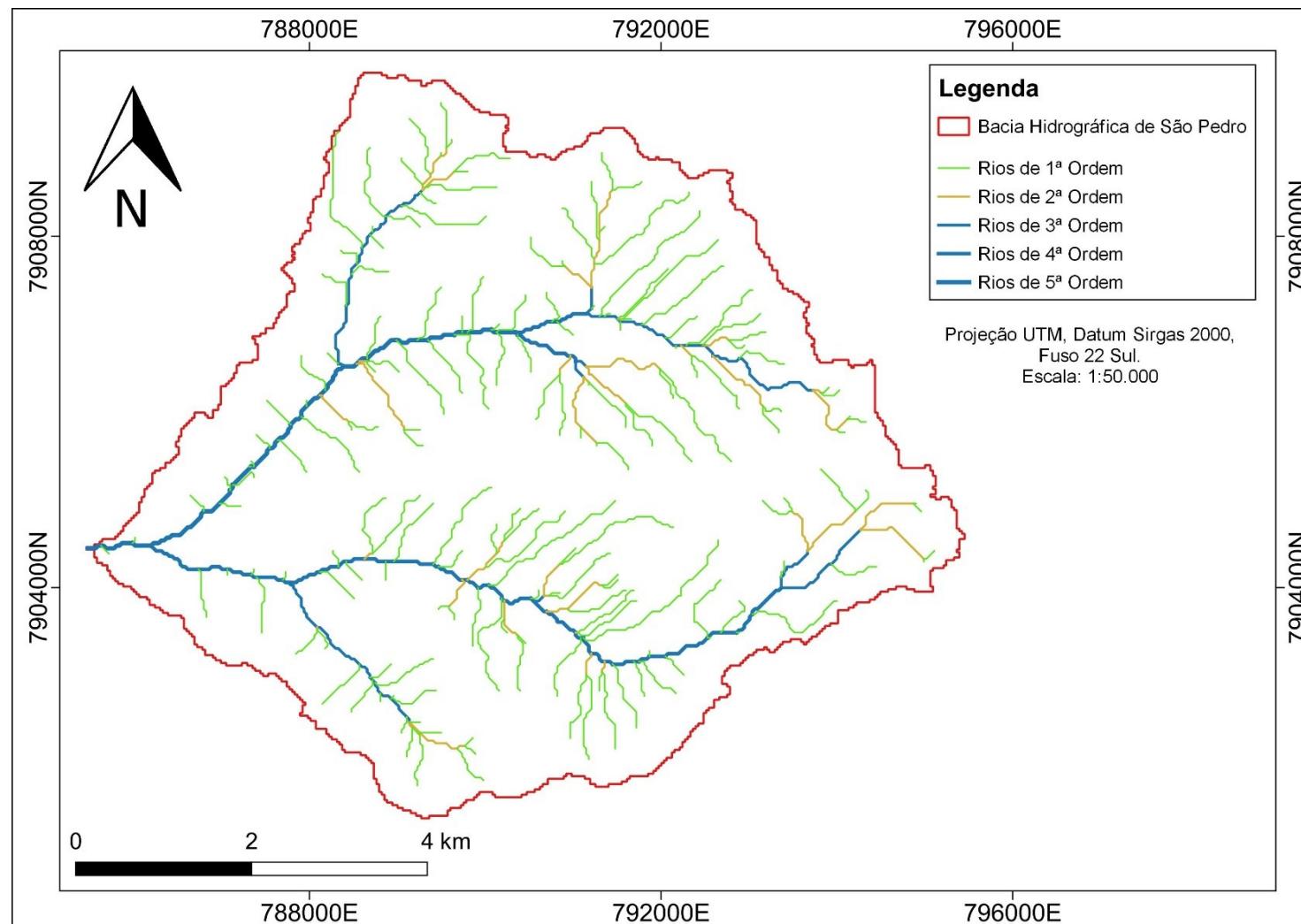
Mapa da localização da área de estudo em Uberlândia - MG



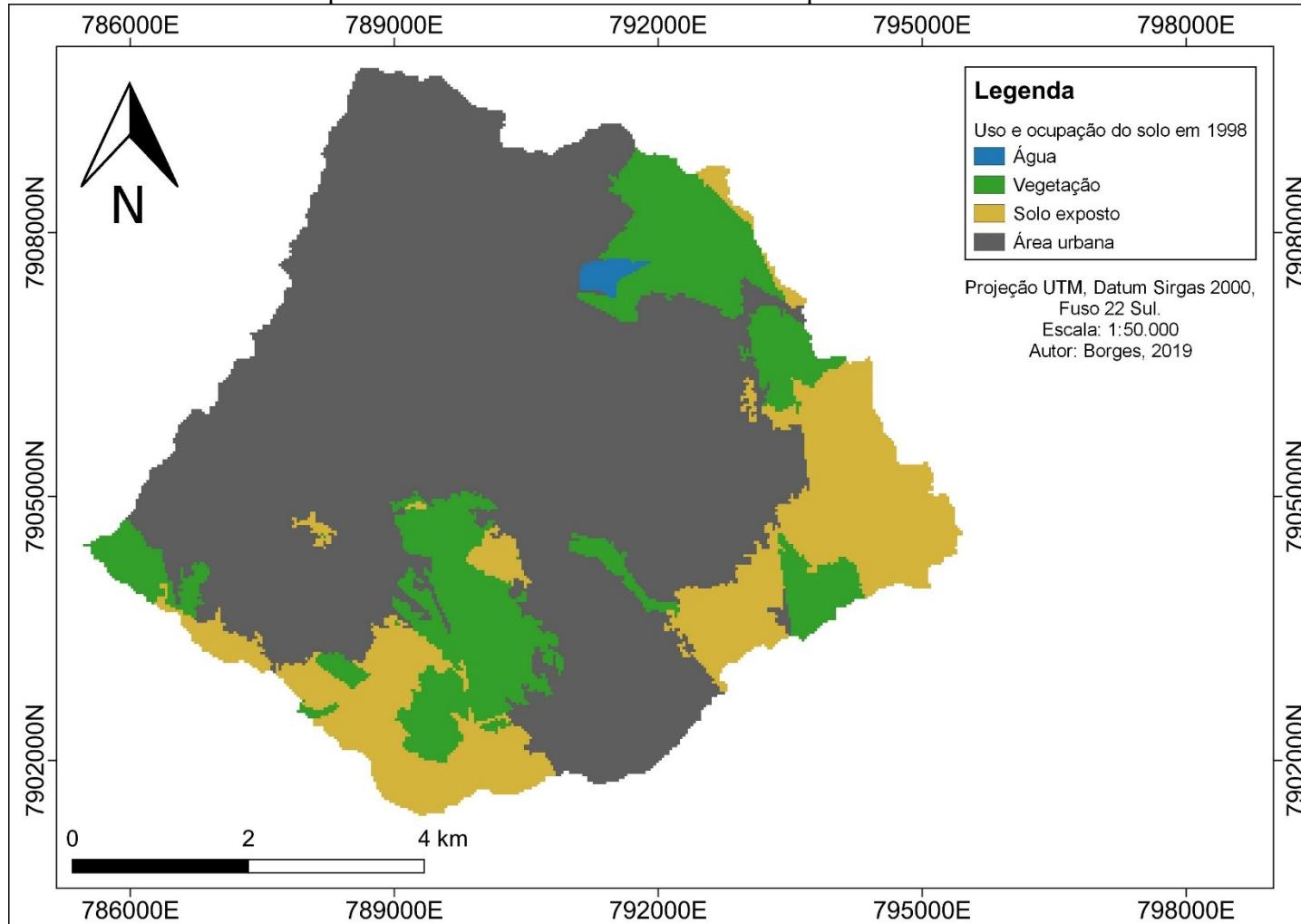
Mapa de altimetria da bacia de São Pedro por imagem TOPODATA – DRS – INPE



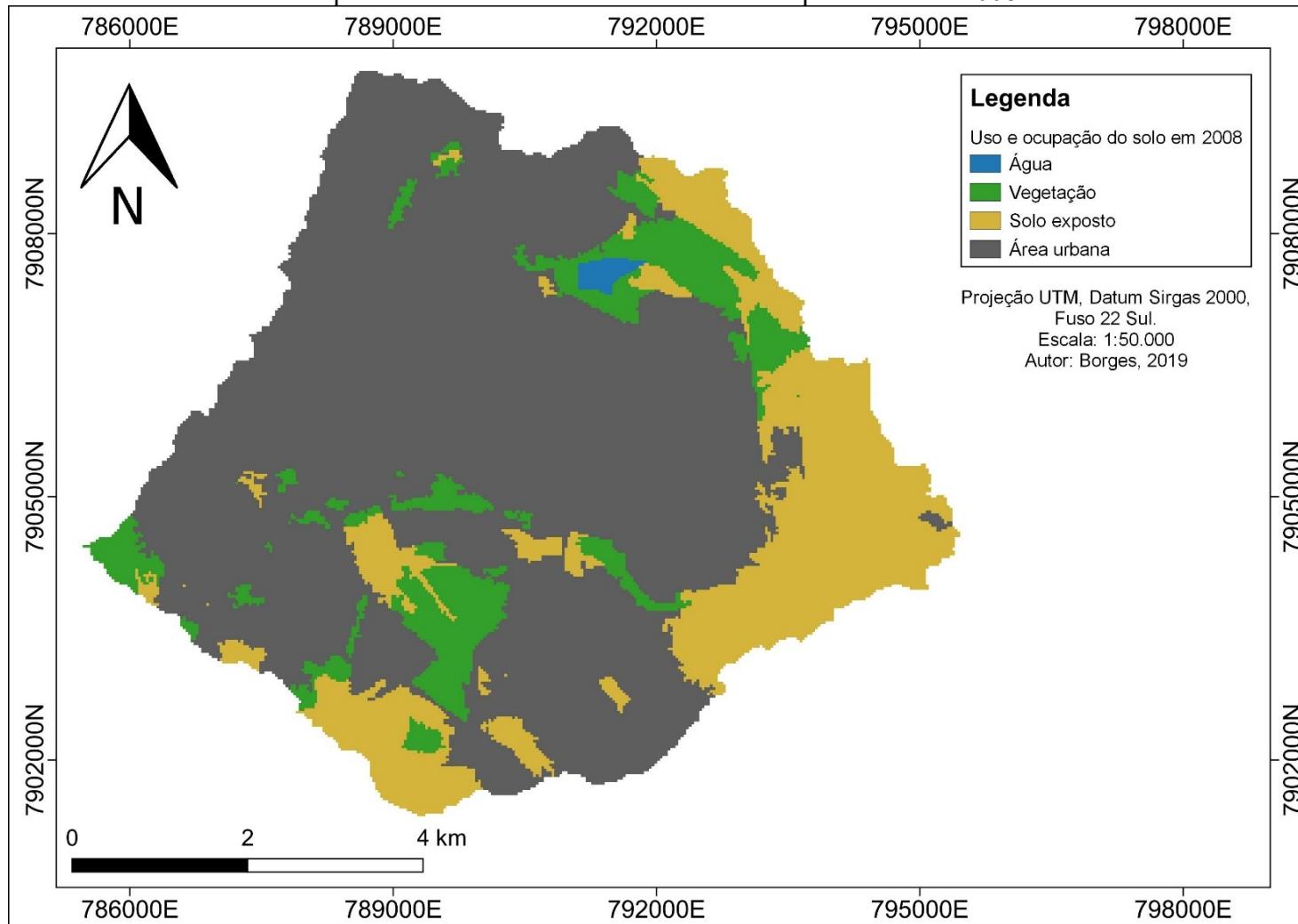
Mapa de hierarquização dos cursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Pedro.



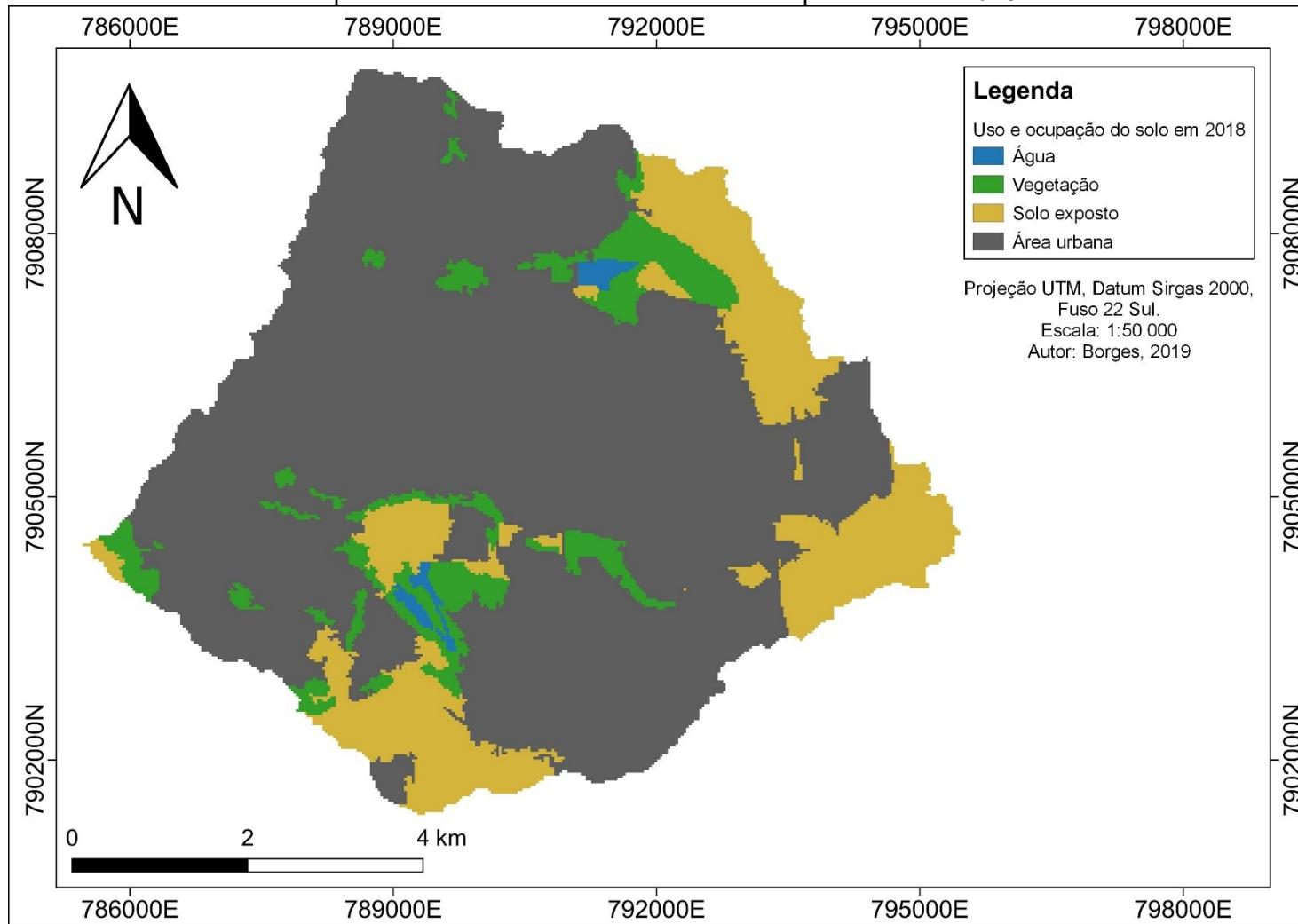
Mapa de Uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 1998.



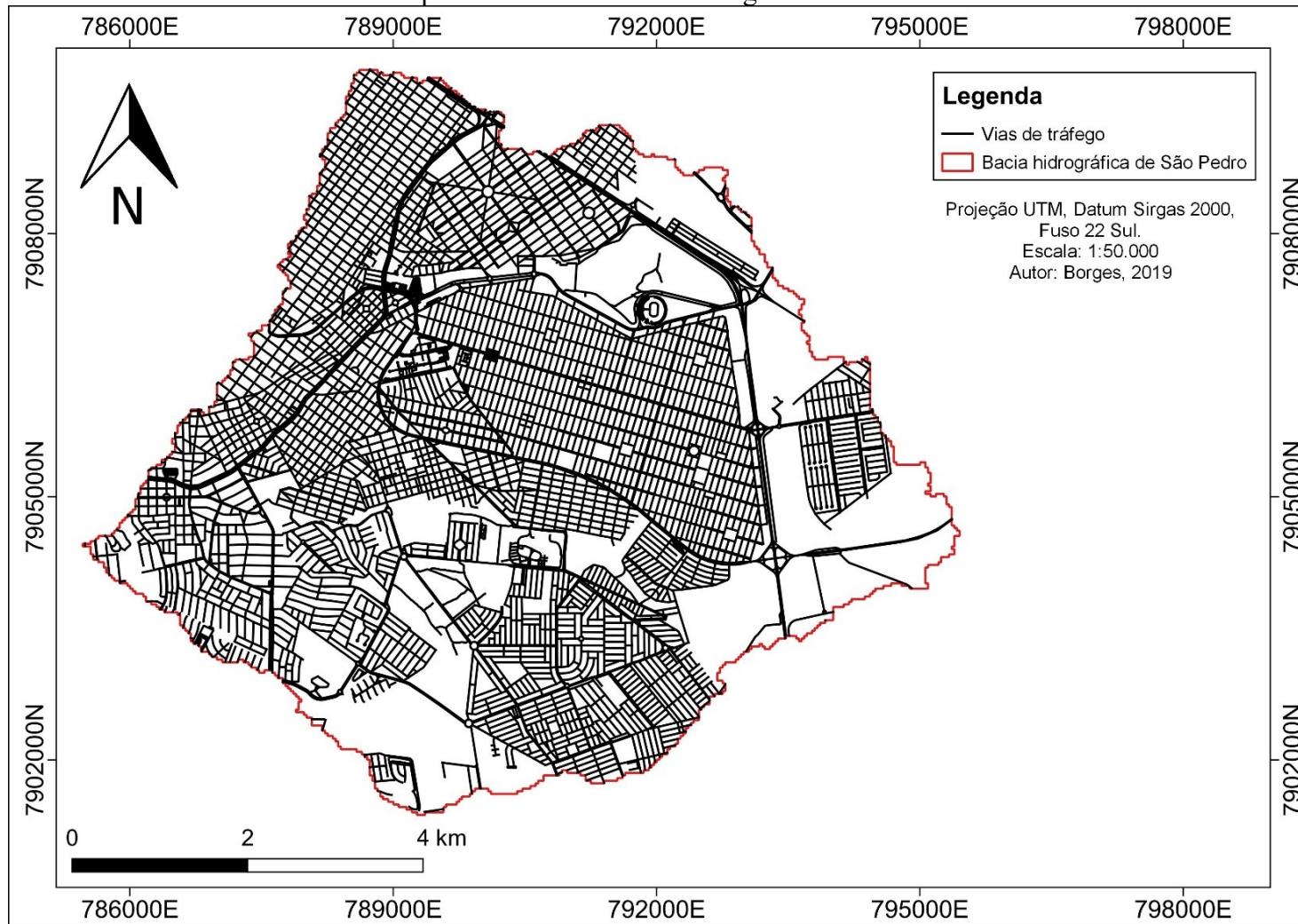
Mapa de Uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2008.



Mapa de Uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2018.



Mapa de vias da bacia do Córrego do São Pedro.



Mapa de distância de acesso à vias.

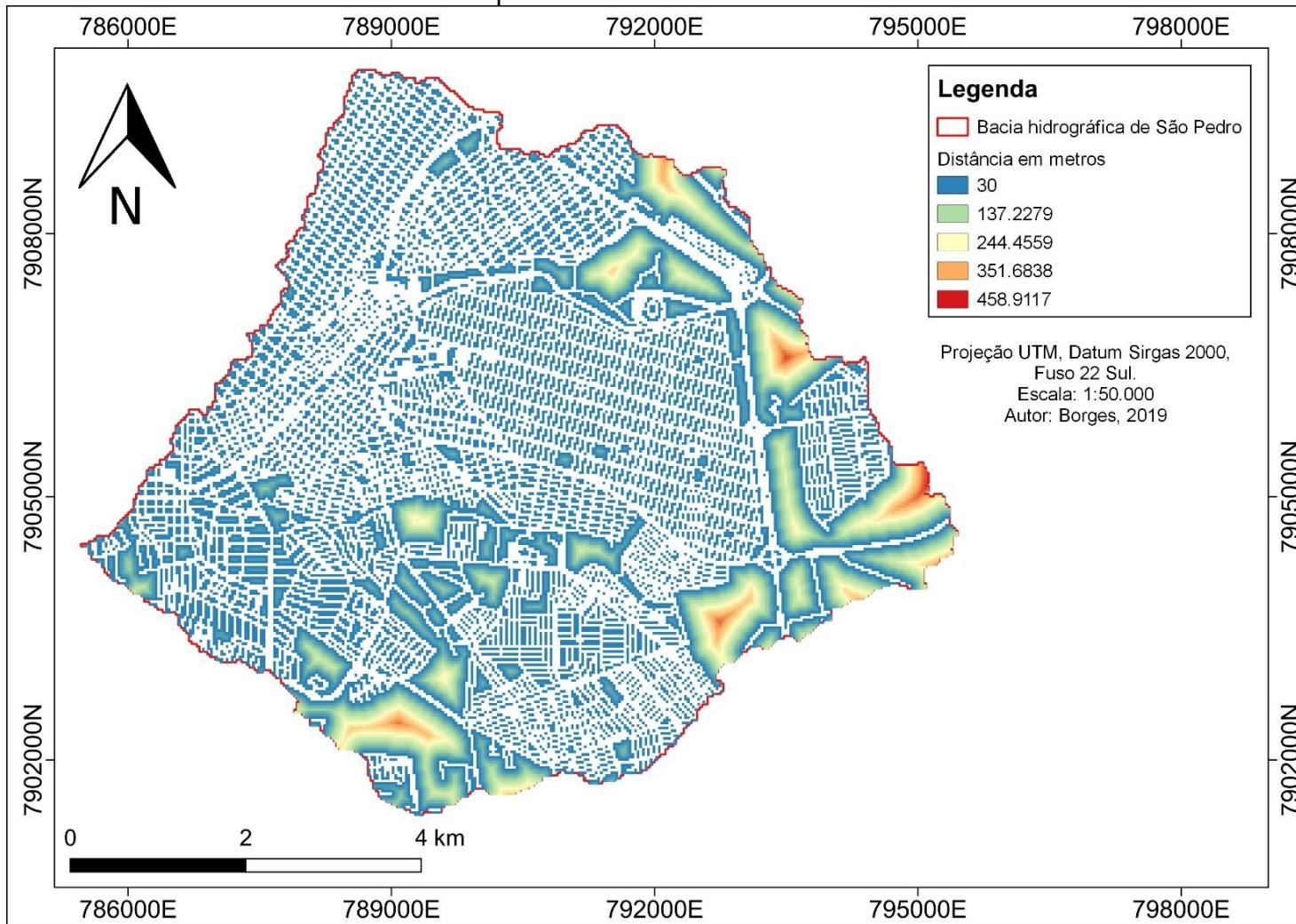
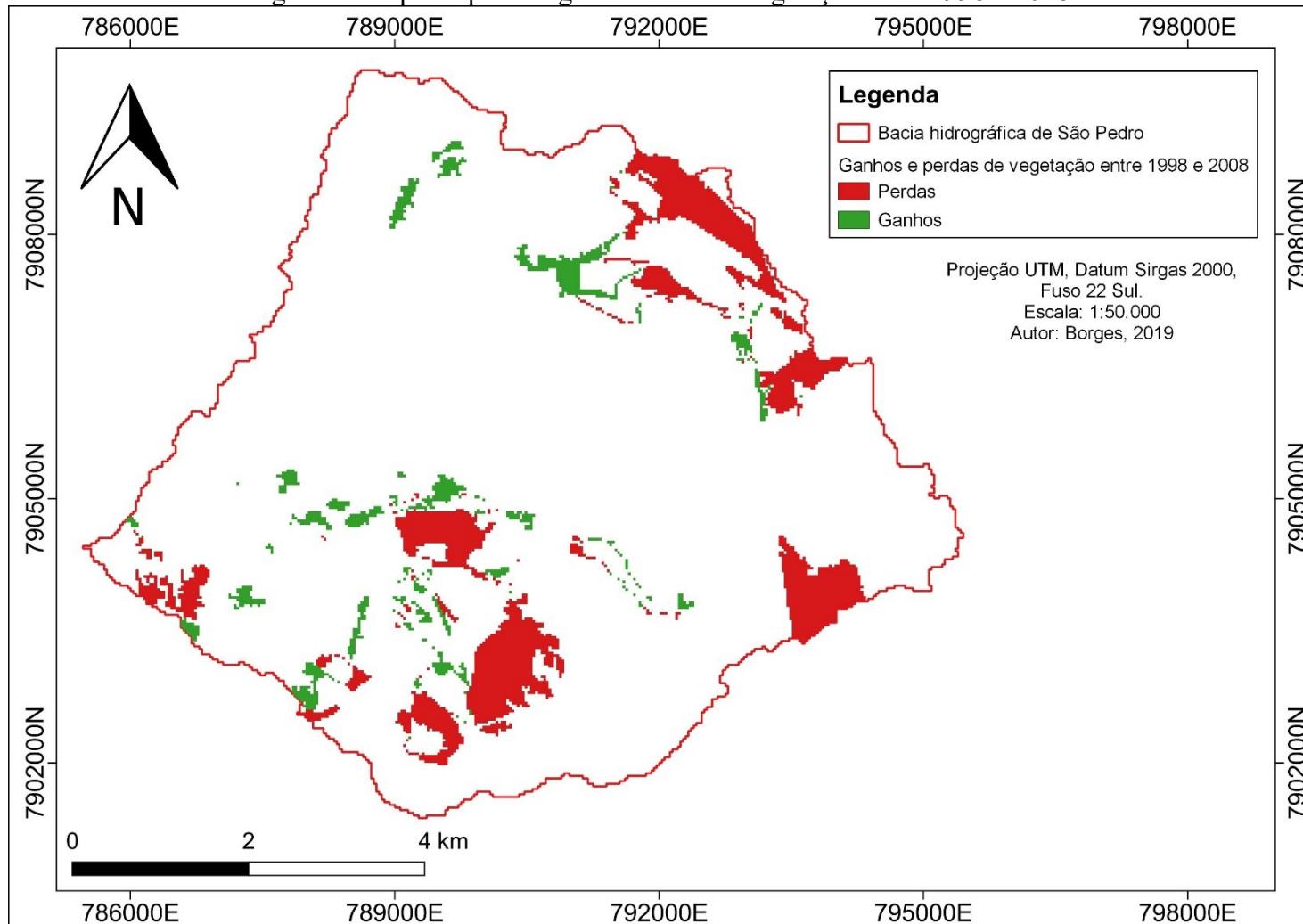
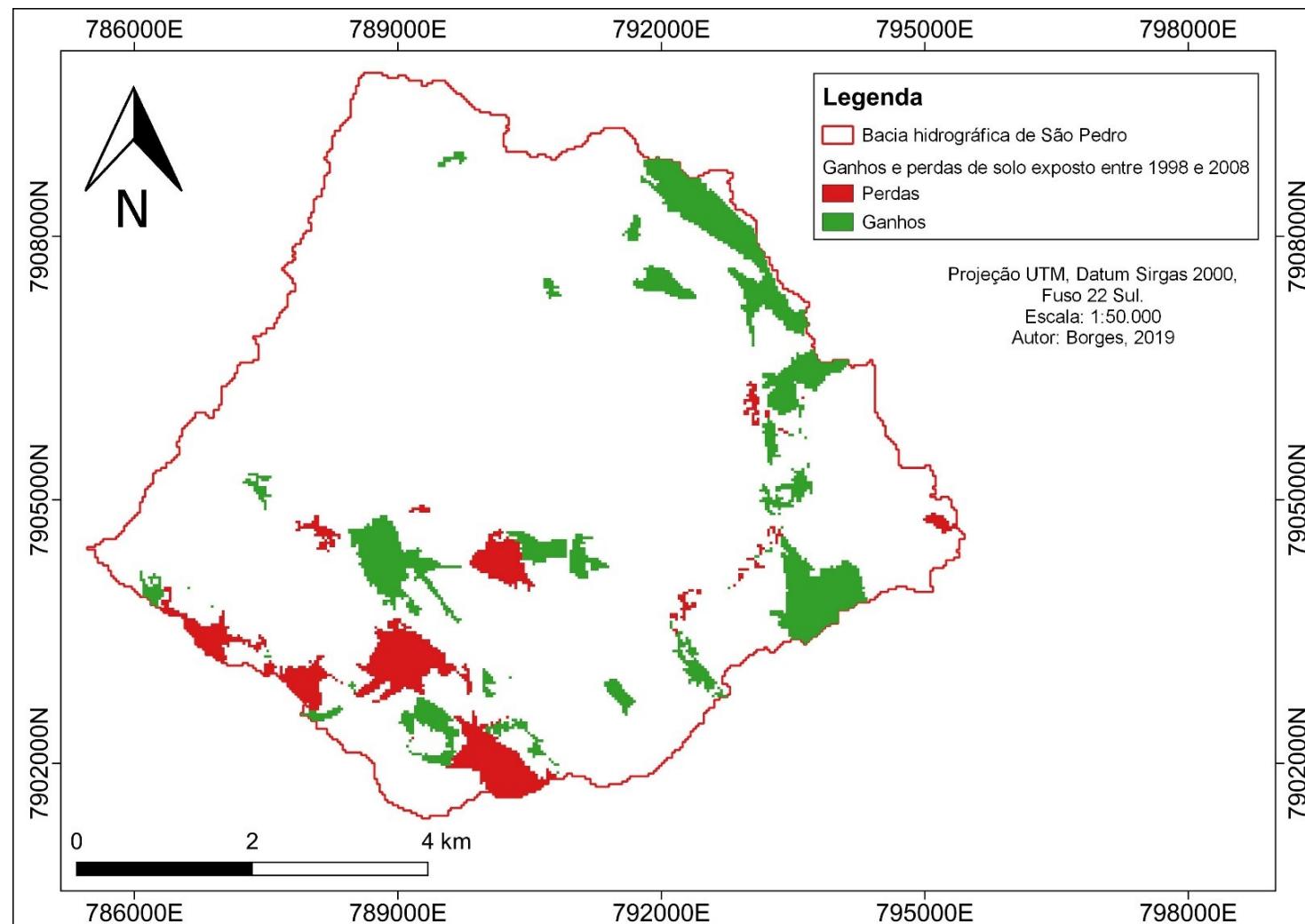
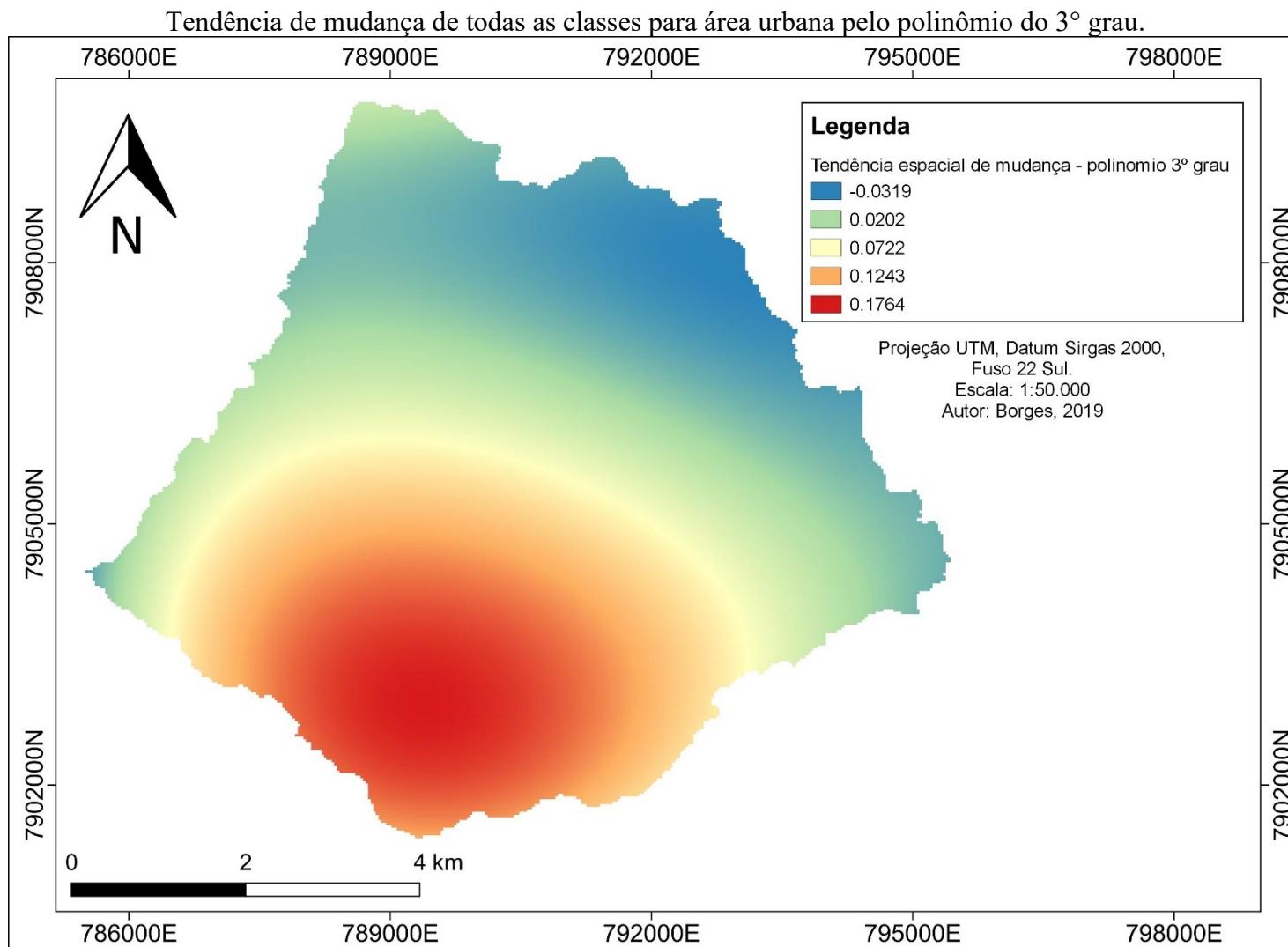


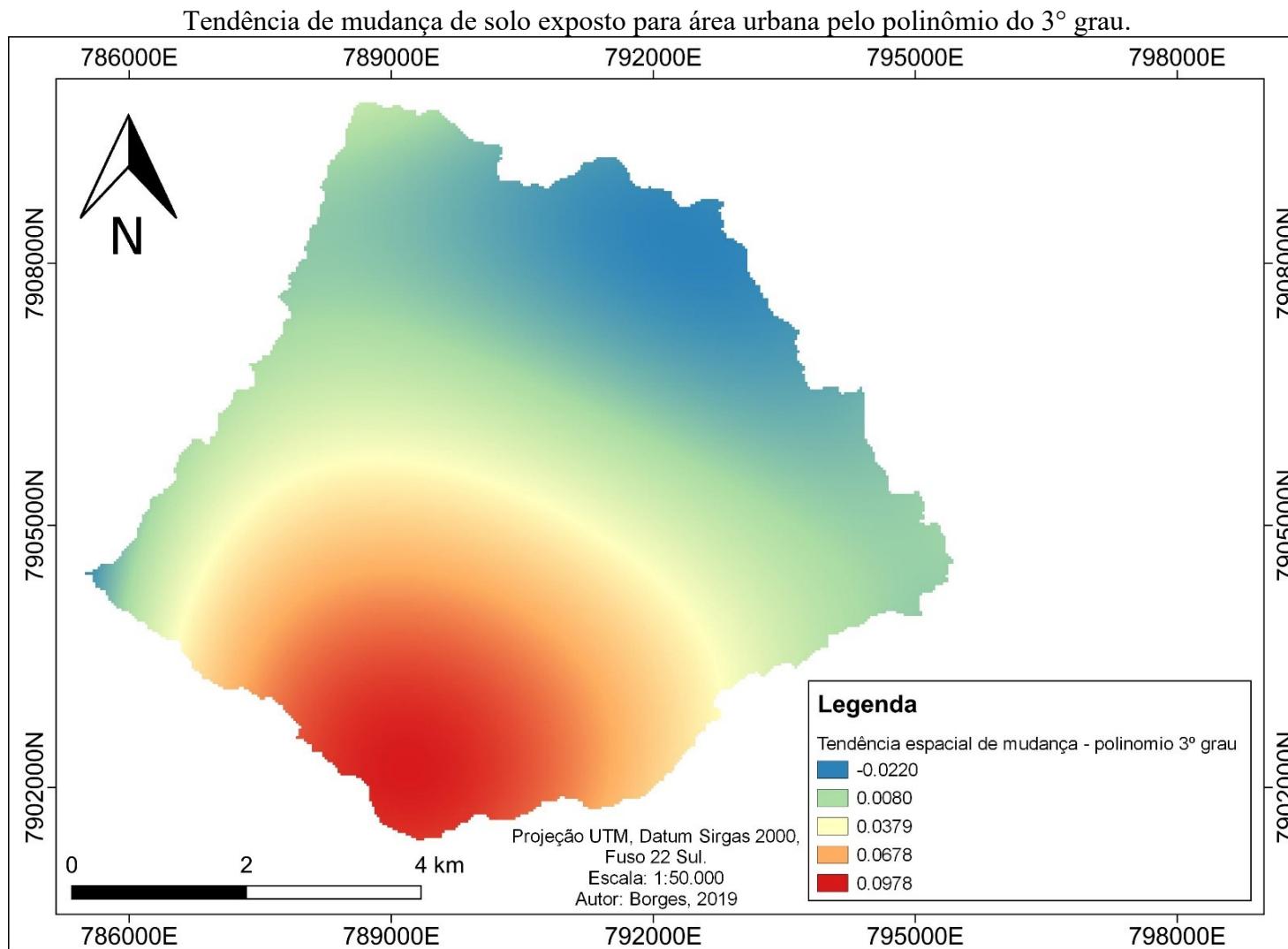
Figura do mapa de perda e ganho da classe vegetação entre 1998 e 2018.

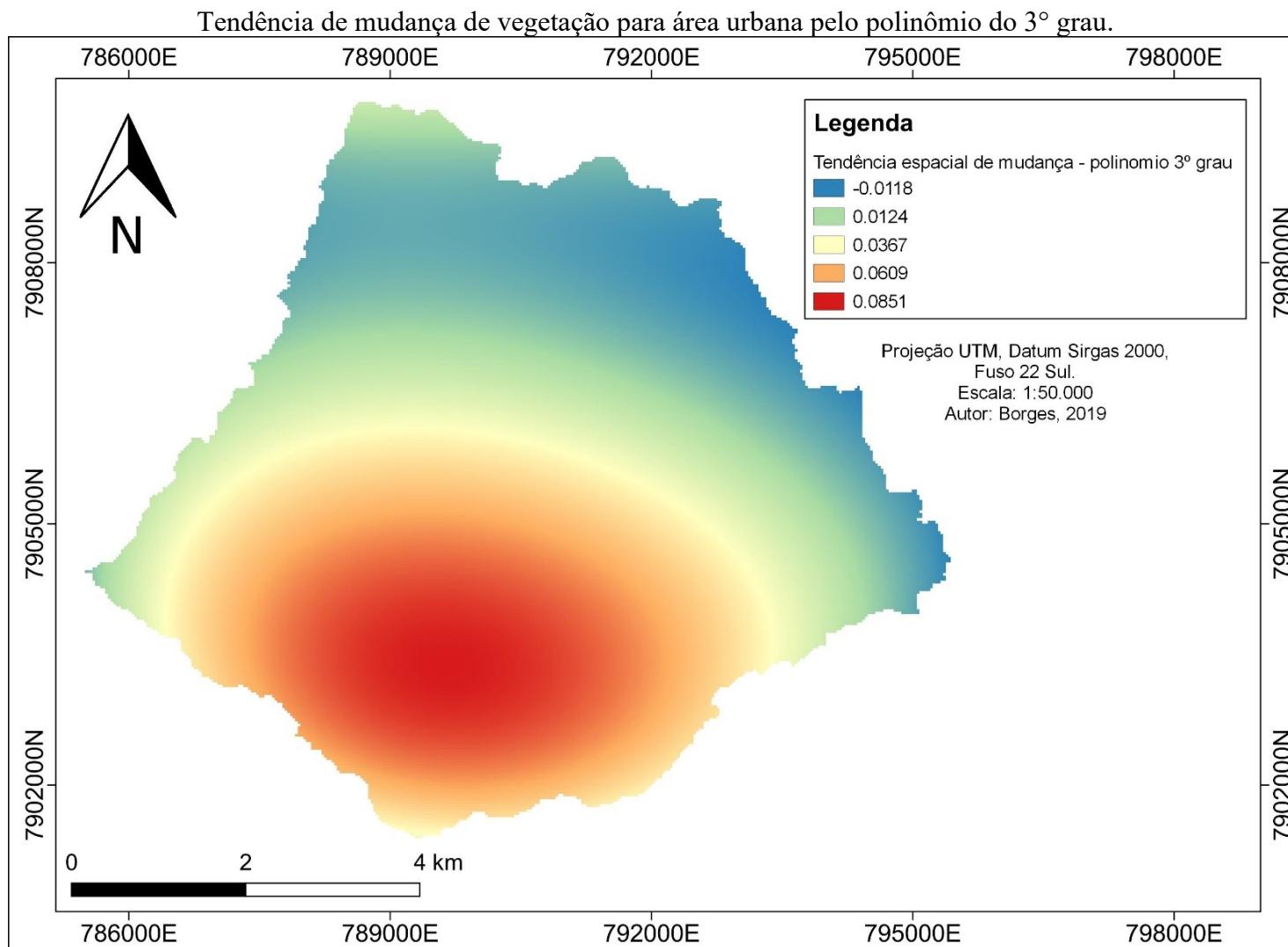


Mapa de perda e ganhos da classe solo exposto entre 1998 e 2018.

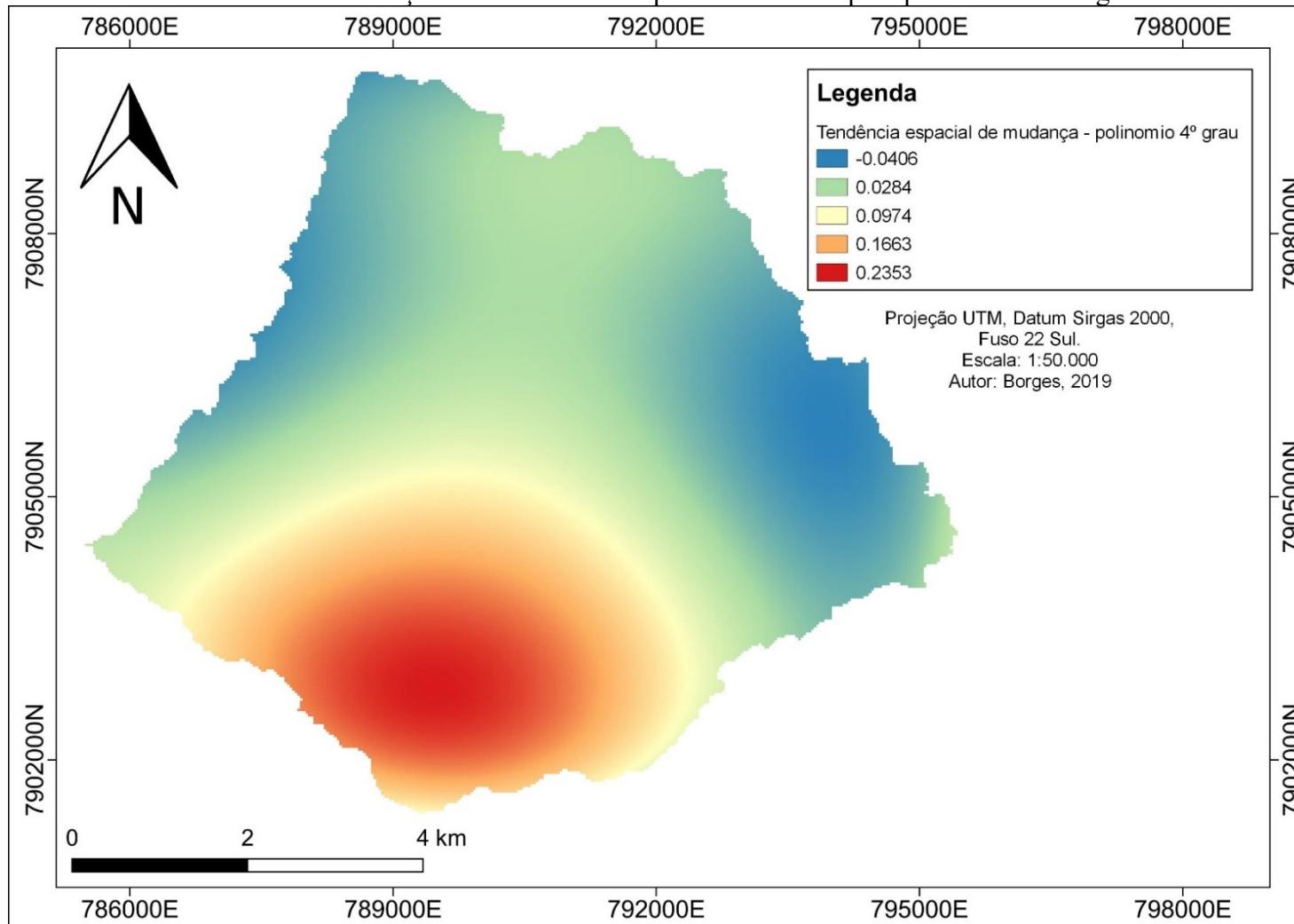


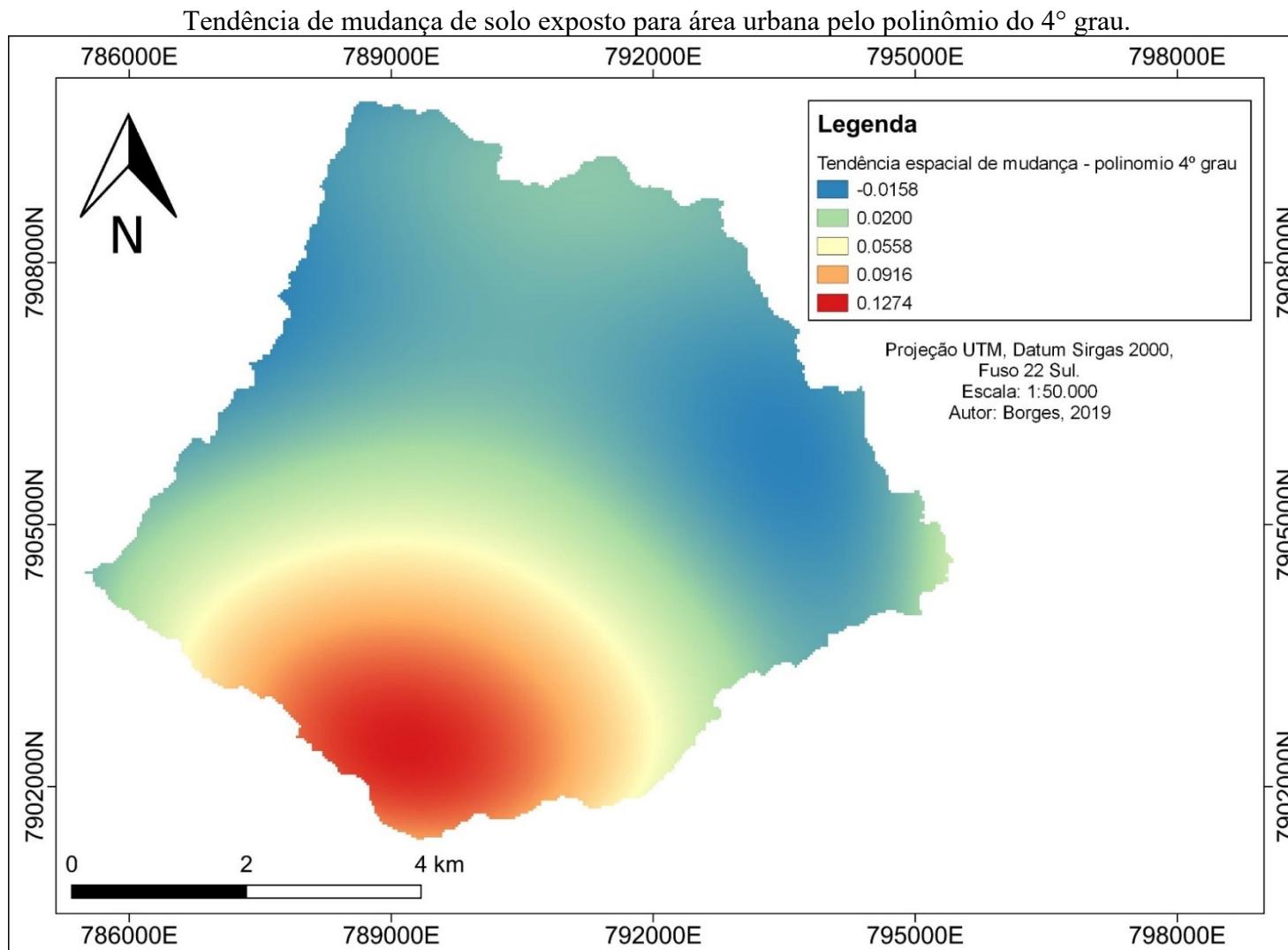




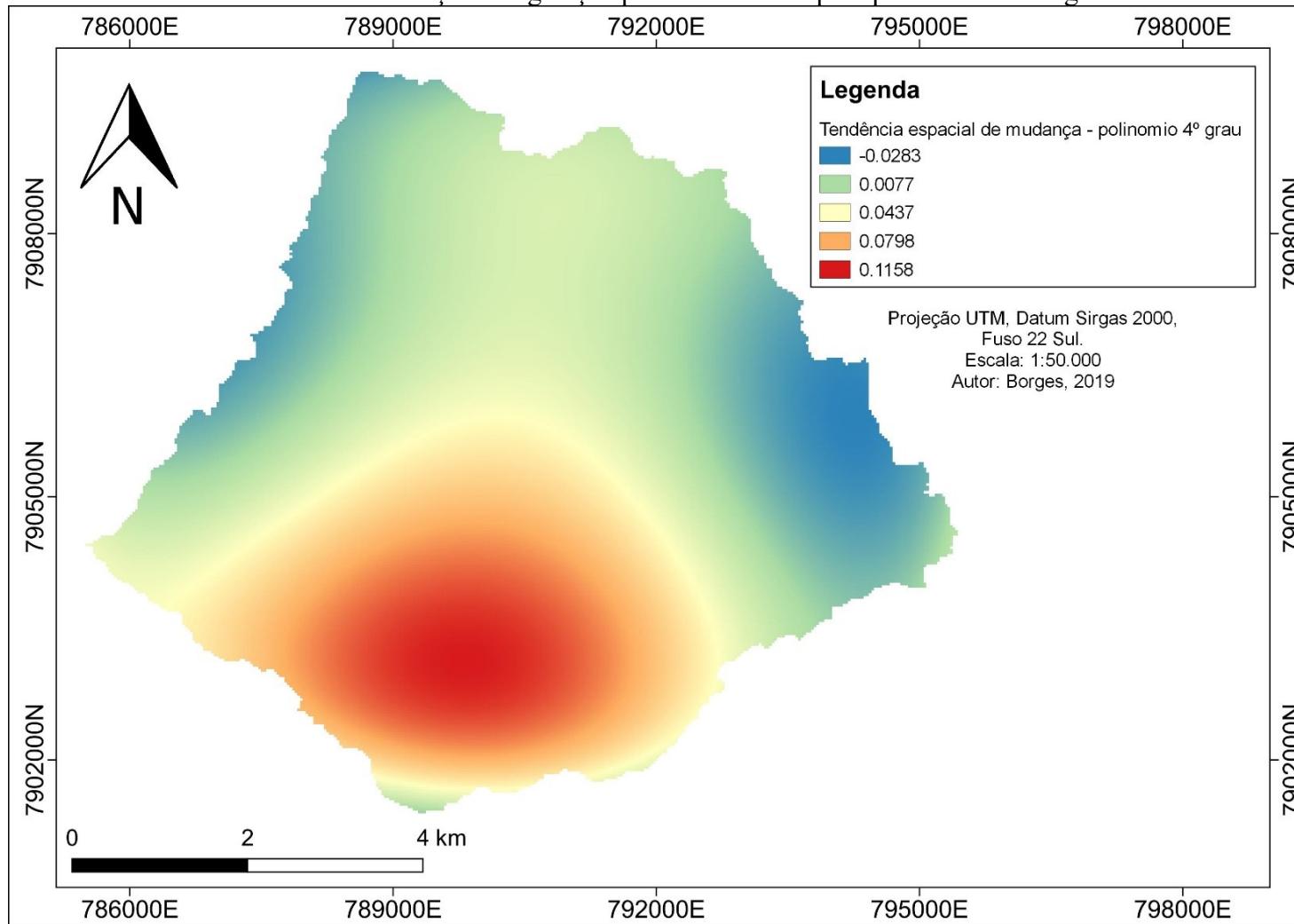


Tendência de mudança de todas as classes para área urbana pelo polinômio do 4º grau.

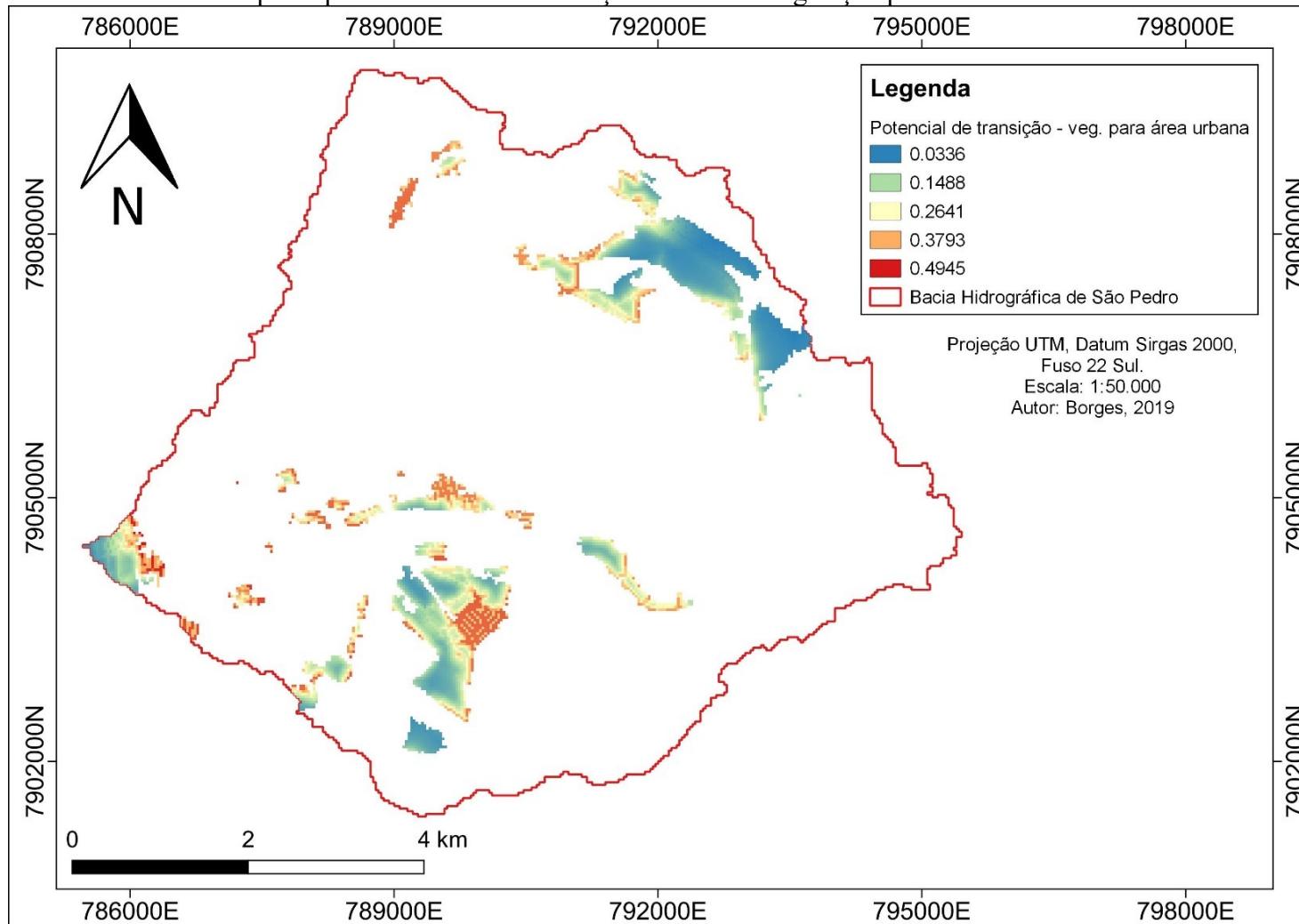




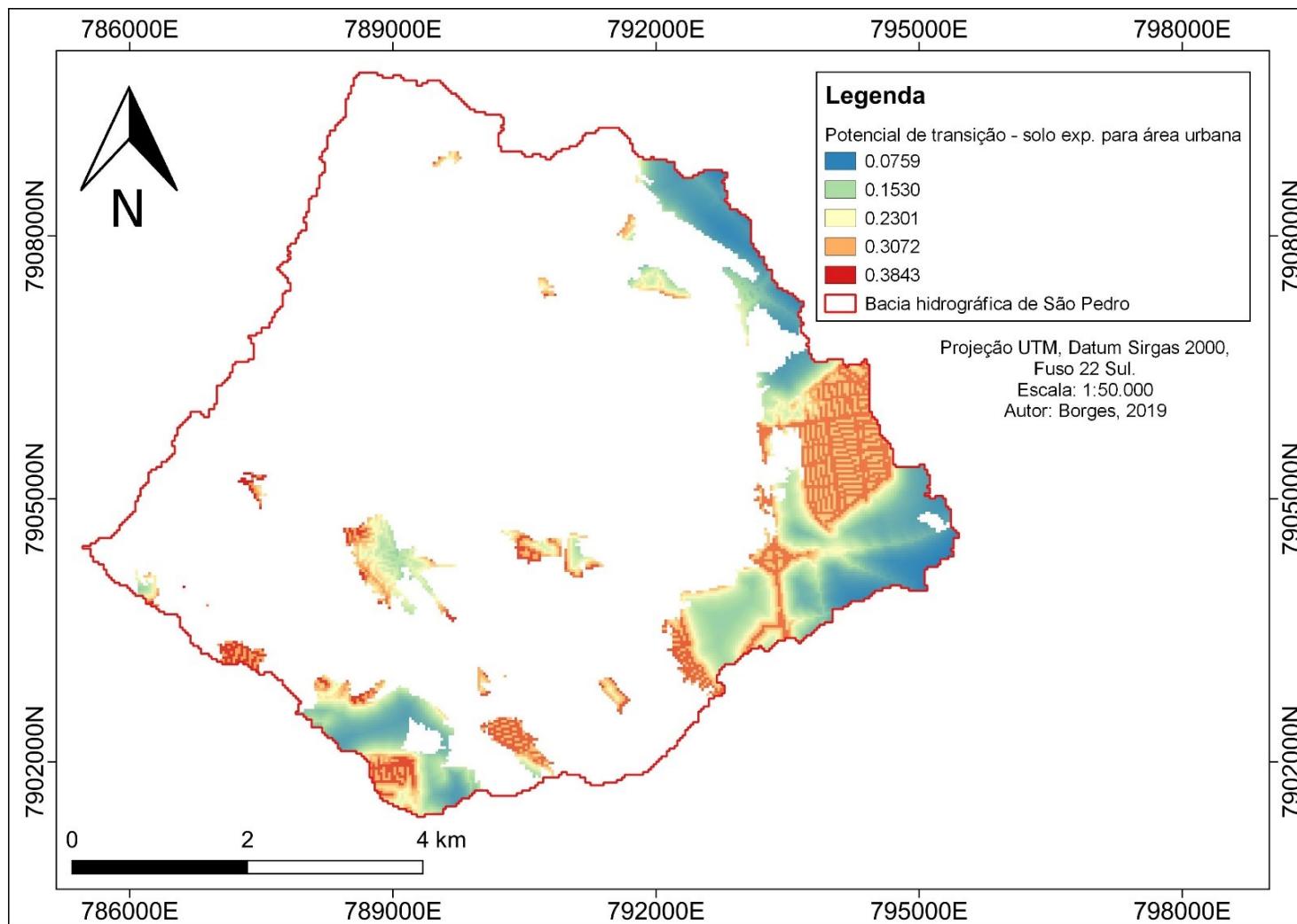
Tendência de mudança de vegetação para área urbana pelo polinômio do 4º grau.

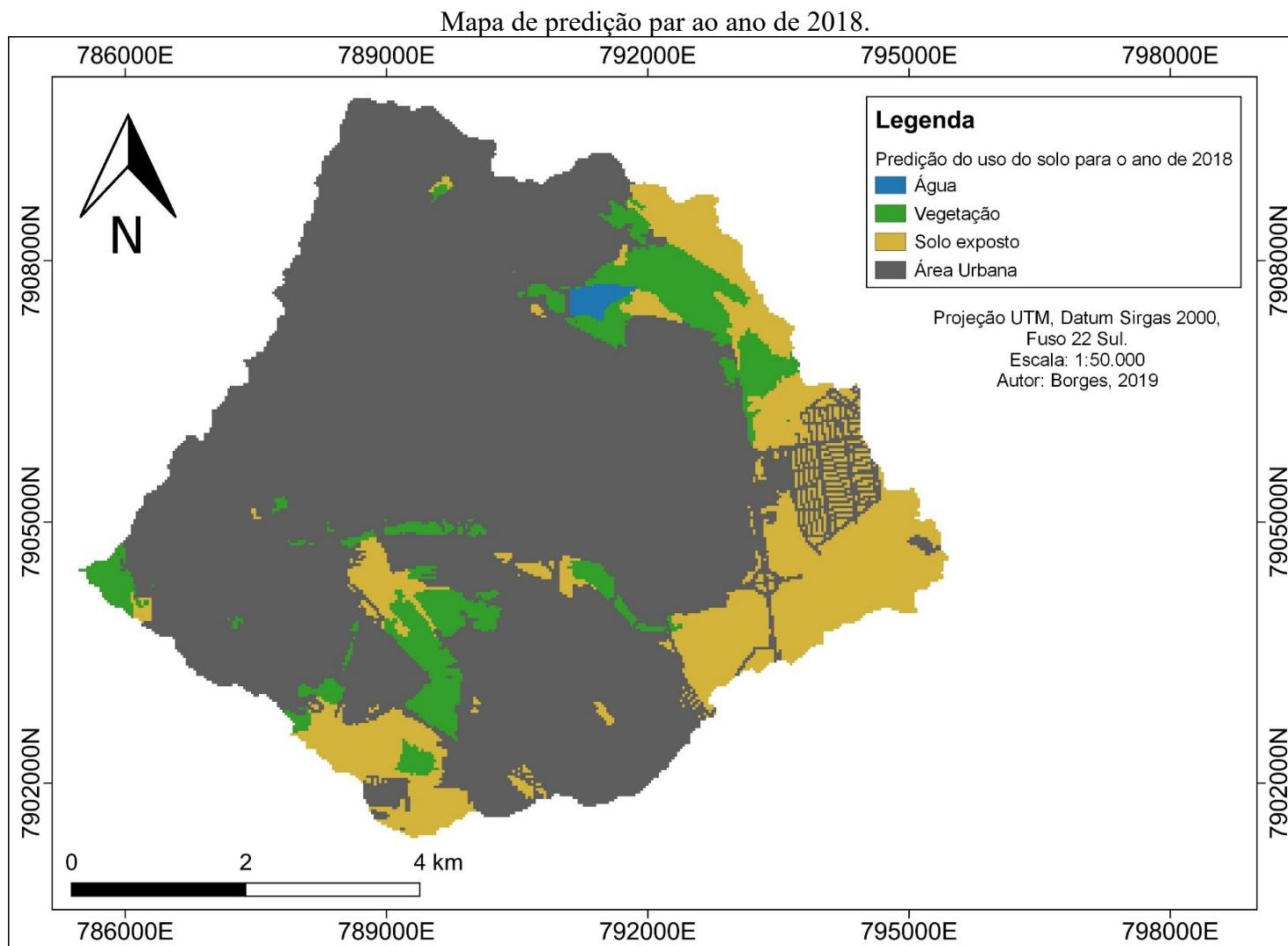


Mapa de probabilidade de mudança de áreas de vegetação para áreas urbanas.

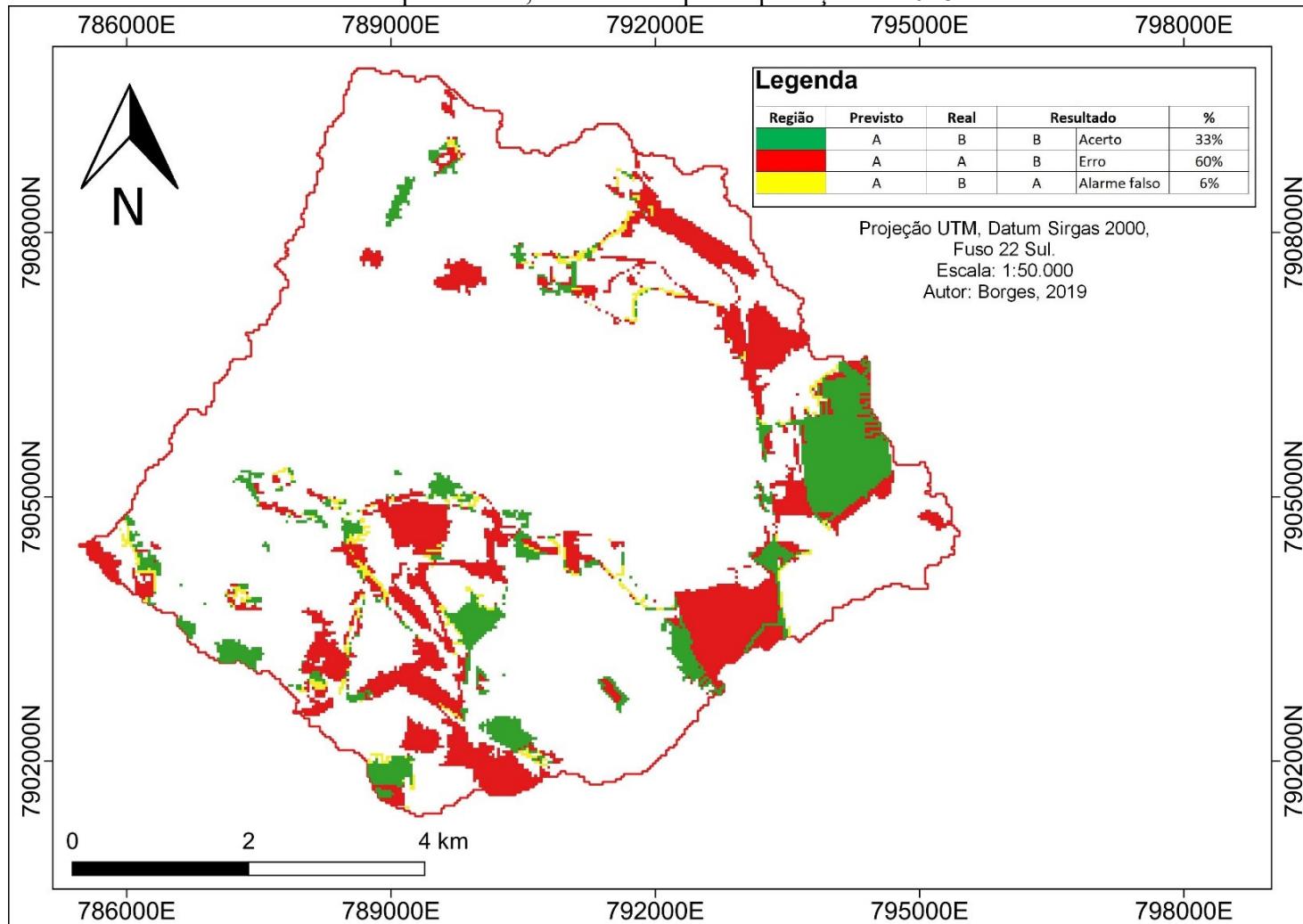


Mapa de Probabilidade de mudança de áreas de solo exposto para áreas urbanas.

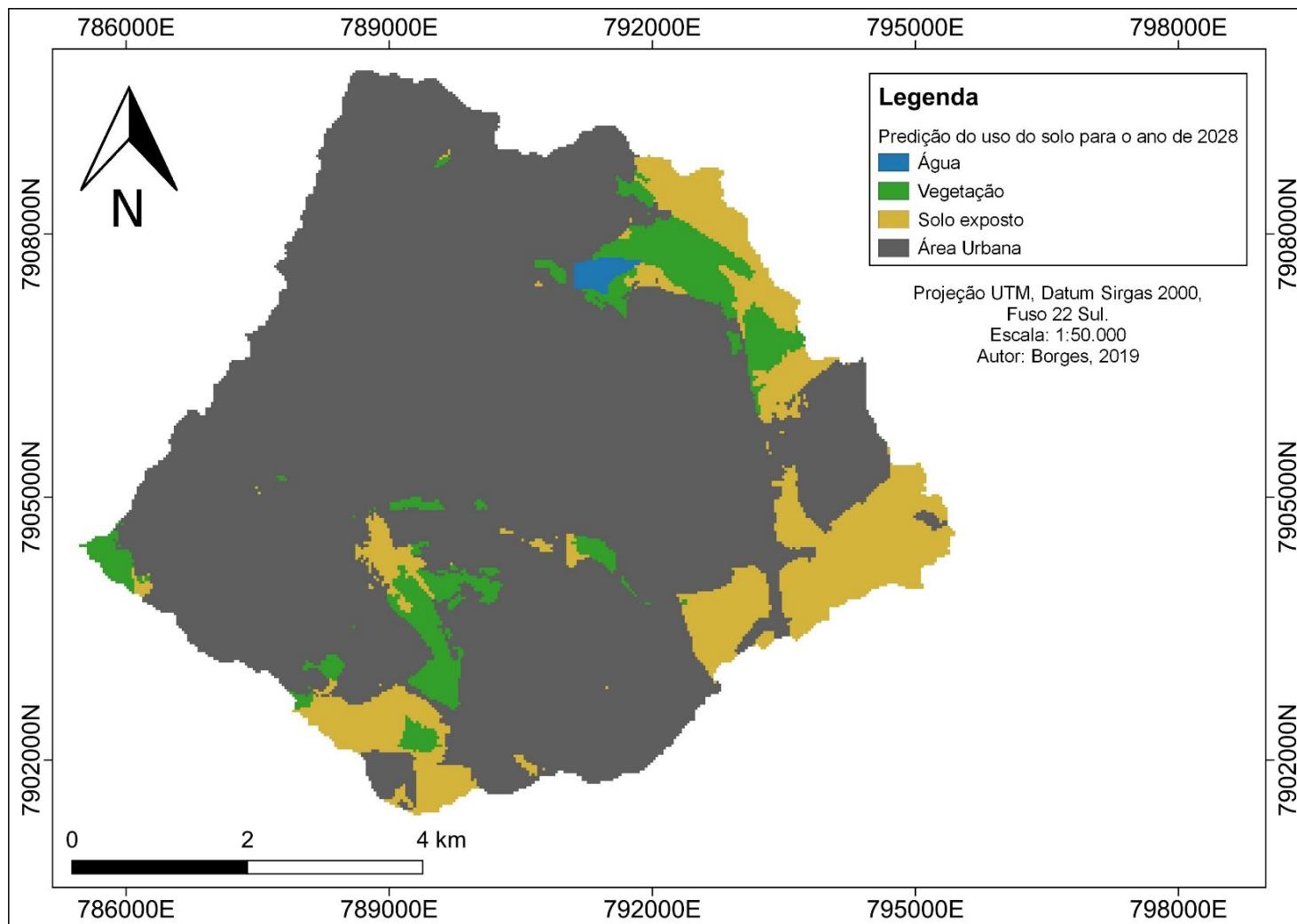




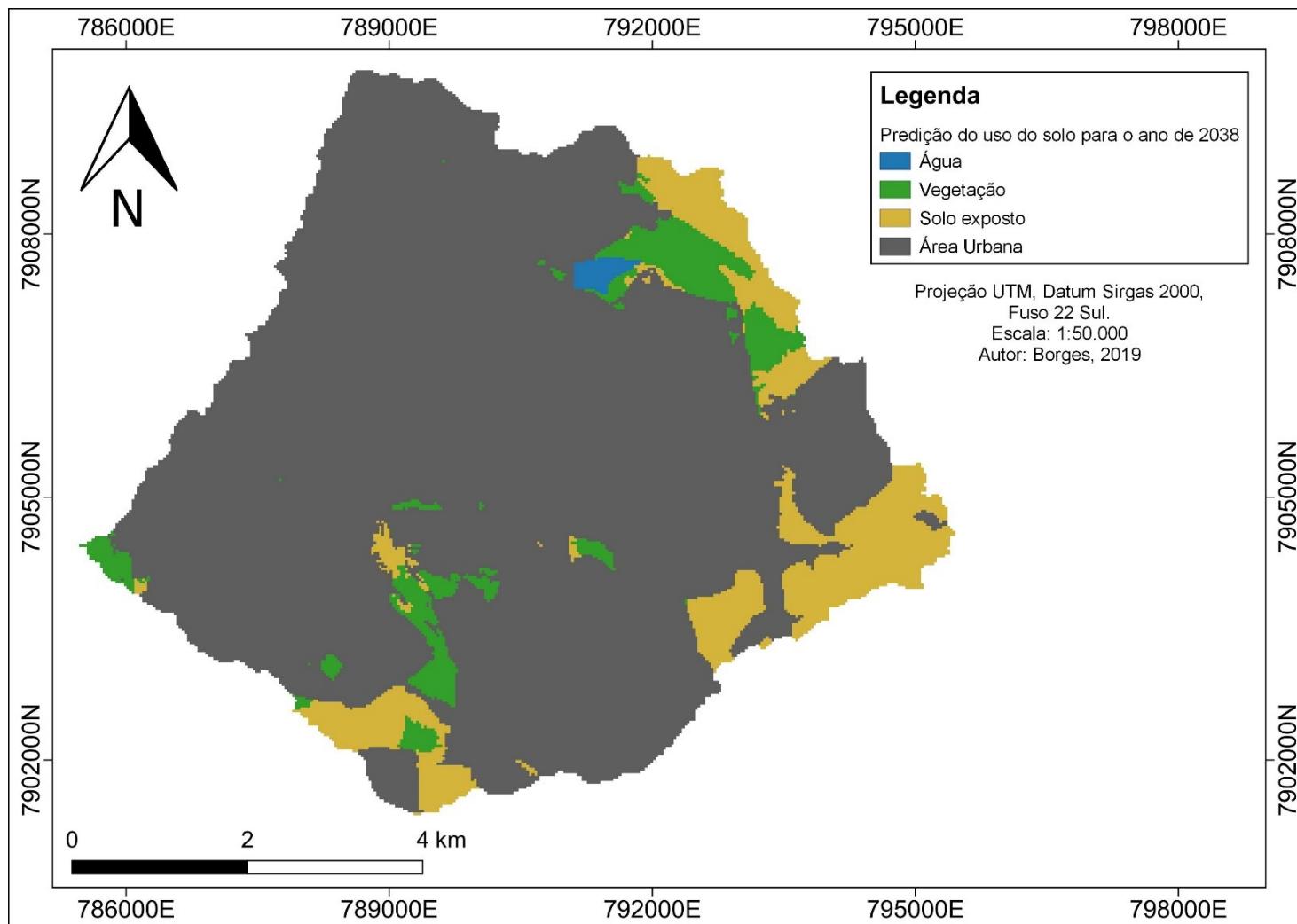
Mapa e acerto, erro e alerta para a predição de 2018.



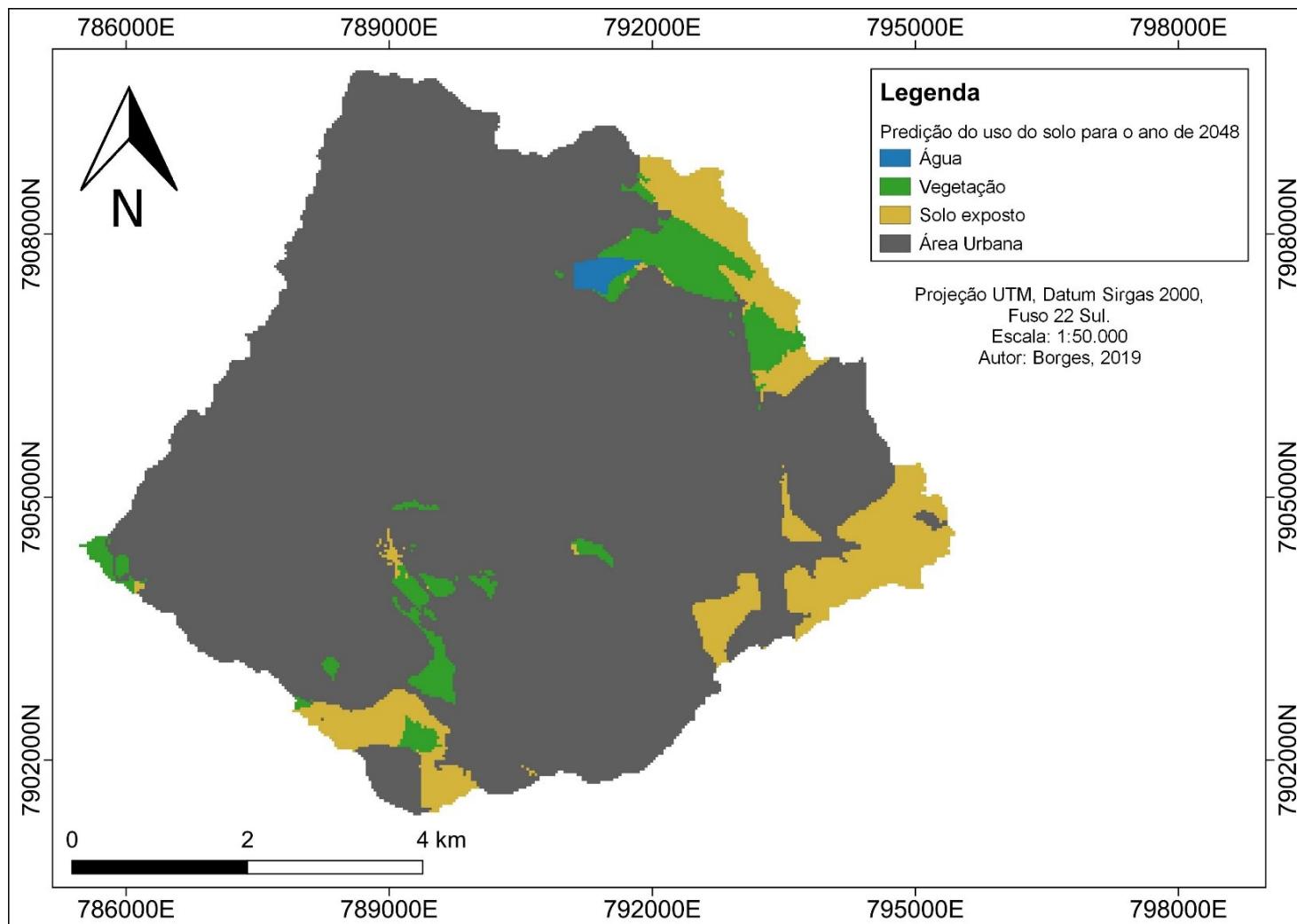
Mapa de predição do uso do solo para 2028.



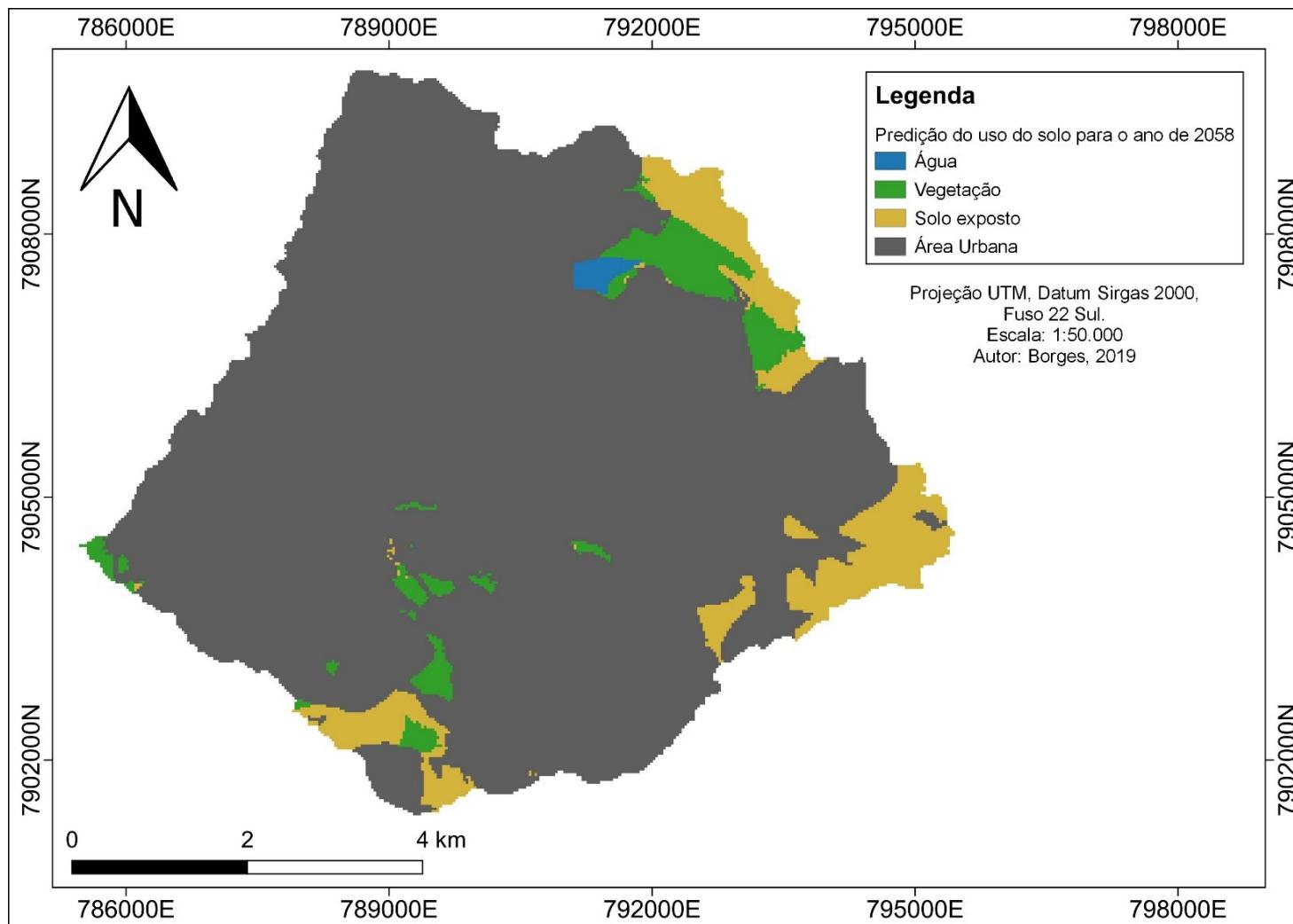
Mapa de predição do uso do solo para 2038.



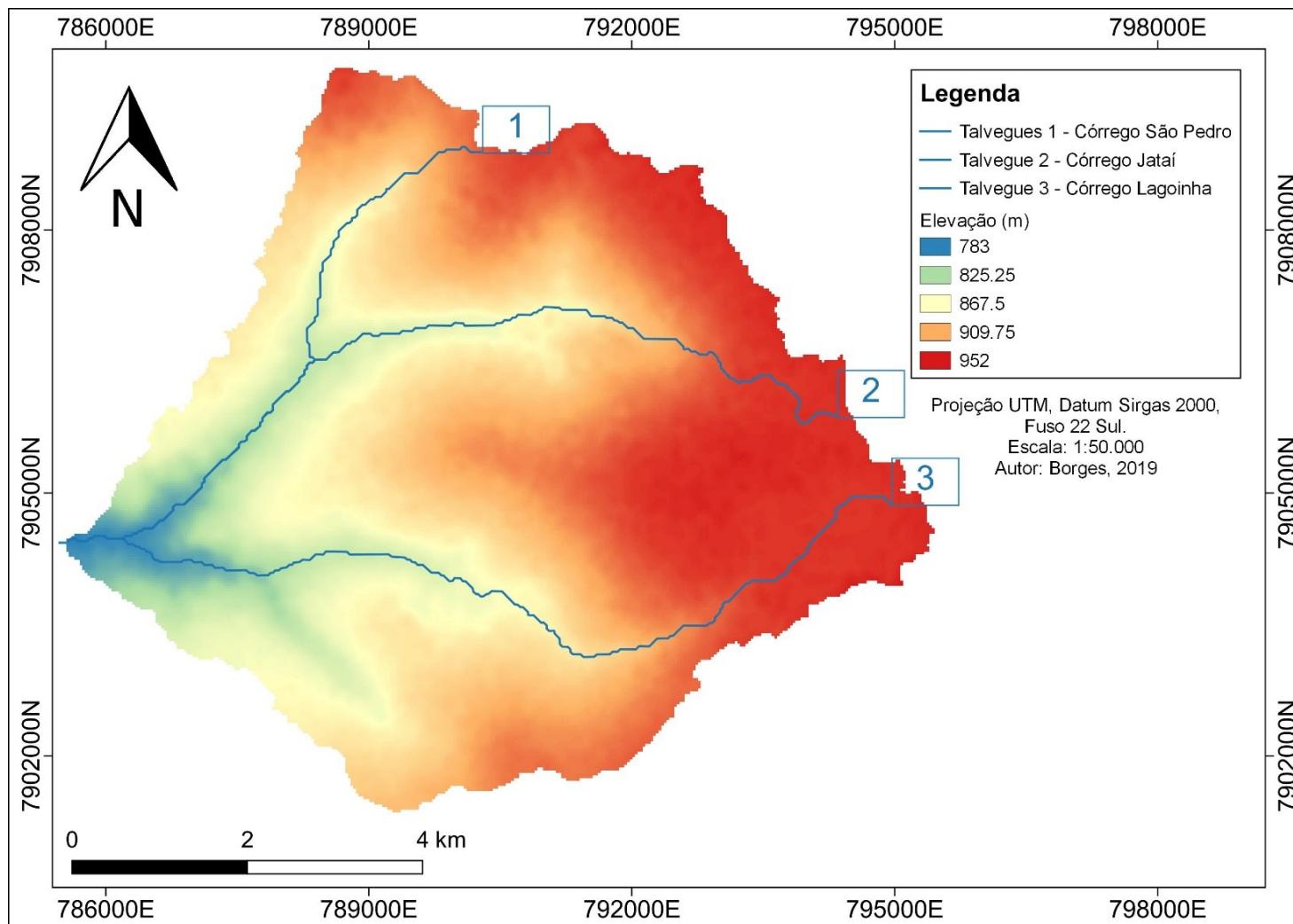
Mapa de predição do uso do solo para 2048.



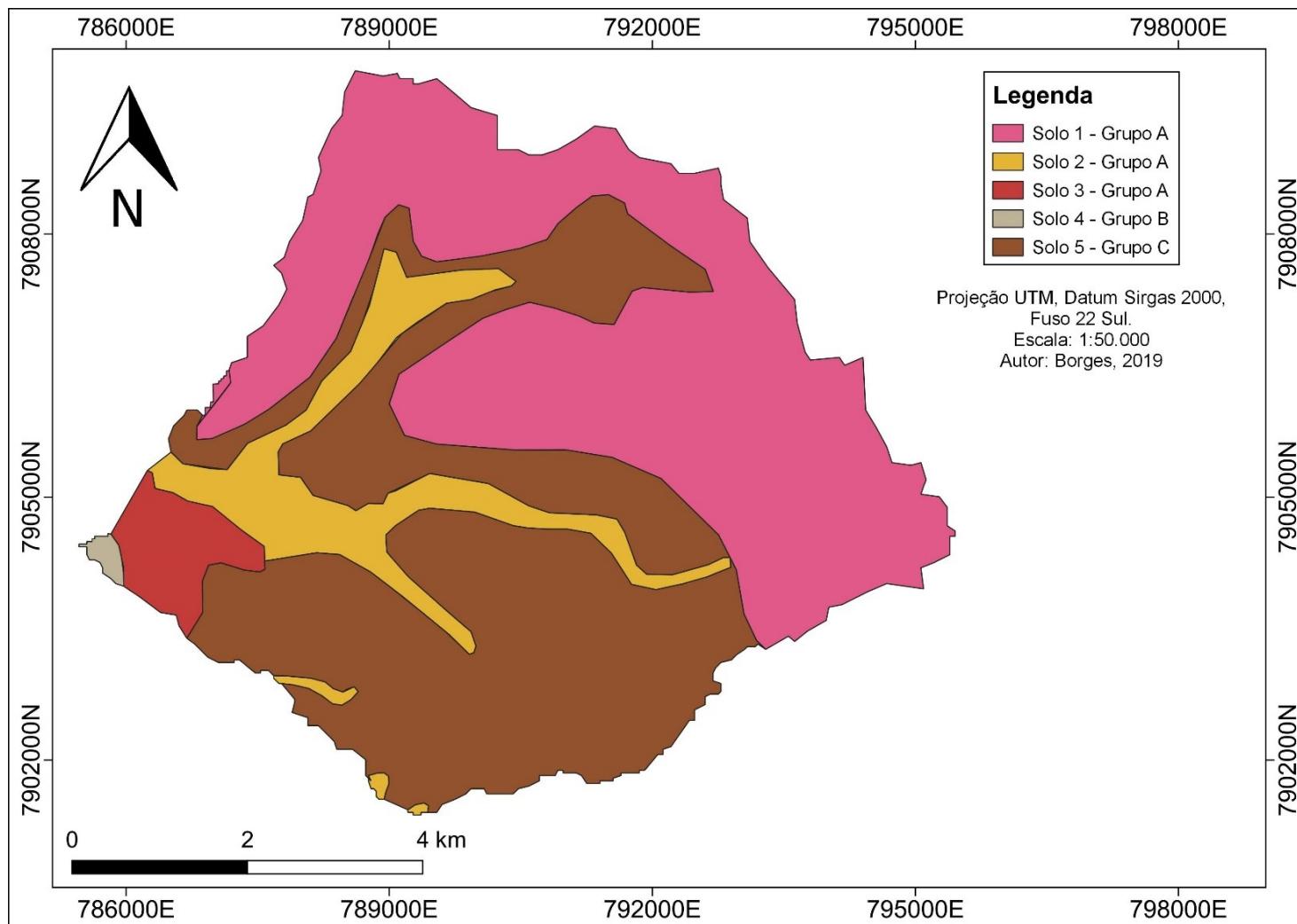
Mapa de predição do uso do solo para 2058



Mapa do MDE da bacia de São Pedro e identificação dos talvegues.



Mapa da identificação solos para cálculo do CN.



APÊNDICE B – TABELAS E QUADROS

Matriz de transição do uso do solo para o ano de 2018.

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urb. |
|--------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Água | 0.8475 | 0.1345 | 0.0179 | 0 |
| Vegetação | 0.0022 | 0.4651 | 0.301 | 0.2317 |
| Solo Exposto | 0 | 0.0309 | 0.7536 | 0.2156 |
| Área Urb. | 0.0003 | 0.0298 | 0.0445 | 0.9254 |

Matriz de transição do uso do solo para o ano de 2028.

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urb. |
|--------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Água | 0.7186 | 0.1771 | 0.0692 | 0.035 |
| Vegetação | 0.003 | 0.2328 | 0.3771 | 0.3871 |
| Solo Exposto | 0.0001 | 0.0441 | 0.5867 | 0.3691 |
| Área Urb. | 0.0006 | 0.0429 | 0.0836 | 0.8729 |

Matriz de transição do uso do solo para o ano de 2038

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urb. |
|--------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Água | 0.6095 | 0.1822 | 0.1199 | 0.0884 |
| Vegetação | 0.0032 | 0.1319 | 0.3715 | 0.4935 |
| Solo Exposto | 0.0003 | 0.0496 | 0.4718 | 0.4782 |
| Área Urb. | 0.0009 | 0.0486 | 0.1148 | 0.8357 |

Matriz de transição do uso do solo para o ano de 2048

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urb. |
|--------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Água | 0.517 | 0.1731 | 0.1601 | 0.1499 |
| Vegetação | 0.0031 | 0.0879 | 0.3416 | 0.5673 |
| Solo Exposto | 0.0005 | 0.0519 | 0.3918 | 0.5558 |
| Área Urb. | 0.0011 | 0.0512 | 0.1383 | 0.8094 |

Matriz de transição do uso do solo para o ano de 2058

| | Água | Vegetação | Solo Exposto | Área Urb. |
|--------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Água | 0.4386 | 0.1595 | 0.1887 | 0.2133 |
| Vegetação | 0.003 | 0.0688 | 0.3092 | 0.619 |
| Solo Exposto | 0.0007 | 0.0529 | 0.3356 | 0.6108 |
| Área Urb. | 0.0013 | 0.0524 | 0.1556 | 0.7907 |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 1998 considerando TR = 25

| SBUH 1998 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218.4168 | 0 | 8.736673 |
| 10 | 24.02971679 | 4.004952798 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 218.4168 | 304.9007 | 8.736673 | 28.97044 |
| 20 | 31.42903281 | 5.238172134 | 9.243125 | 0.719077 | 0.719077 | 4.314463 | 304.9007 | 473.0358 | 28.97044 | 57.77027 |
| 30 | 42.86621891 | 7.144369819 | 16.38749 | 3.838205 | 3.119128 | 18.71477 | 473.0358 | 742.8065 | 57.77027 | 101.7823 |
| 40 | 61.92400128 | 10.32066688 | 26.70816 | 10.56787 | 6.729667 | 40.378 | 742.8065 | 1231.466 | 101.7823 | 172.6106 |
| 50 | 97.26952978 | 16.2115883 | 42.91975 | 23.55736 | 12.98948 | 77.9369 | 1231.466 | 2288.159 | 172.6106 | 299.5868 |
| 60 | 174.6481234 | 29.10802057 | 72.02777 | 49.76166 | 26.20431 | 157.2258 | 2288.159 | 1696.779 | 299.5868 | 435.0173 |
| 70 | 127.567415 | 21.26123584 | 93.28901 | 69.85369 | 20.09202 | 120.5521 | 1696.779 | 1024.291 | 435.0173 | 509.0588 |
| 80 | 76.62406408 | 12.77067735 | 106.0597 | 82.11324 | 12.25956 | 73.55735 | 1024.291 | 684.3591 | 509.0588 | 536.6801 |
| 90 | 51.08612726 | 8.514354543 | 114.574 | 90.34115 | 8.227903 | 49.36742 | 684.3591 | 489.3153 | 536.6801 | 540.6927 |
| 100 | 36.48378276 | 6.08063046 | 120.6547 | 96.23859 | 5.897444 | 35.38466 | 489.3153 | 367.1863 | 540.6927 | 531.6973 |
| 110 | 27.3575236 | 4.559587267 | 125.2143 | 100.671 | 4.432361 | 26.59417 | 367.1863 | 285.6911 | 531.6973 | 515.2766 |
| 120 | 21.27483904 | 3.545806507 | 128.7601 | 104.1232 | 3.452297 | 20.71378 | 285.6911 | 0 | 515.2766 | 485.4821 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 485.4821 | 446.6436 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 446.6436 | 410.9121 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 410.9121 | 378.0391 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 378.0391 | 347.796 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 347.796 | 319.9723 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 319.9723 | 294.3745 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 294.3745 | 270.8246 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 270.8246 | 249.1586 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249.1586 | 229.2259 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 229.2259 | 210.8878 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 210.8878 | 194.0168 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 194.0168 | 178.4955 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 178.4955 | 164.2158 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 164.2158 | 151.0786 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 151.0786 | 138.9923 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 138.9923 | 127.8729 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 127.8729 | 117.6431 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117.6431 | 108.2316 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 108.2316 | 99.57309 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.57309 | 91.60724 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91.60724 | 84.27866 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 84.27866 | 77.53637 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77.53637 | 71.33346 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71.33346 | 65.62678 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.62678 | 60.37664 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.37664 | 55.54651 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.54651 | 51.10279 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.10279 | 47.01456 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.01456 | 43.2534 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.2534 | 39.79313 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.79313 | 36.60968 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.60968 | 33.6809 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.6809 | 30.98643 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.98643 | 28.50752 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.50752 | 26.22692 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.22692 | 24.12876 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.12876 | 22.19846 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.19846 | 20.42258 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.42258 | 18.78878 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.78878 | 17.28568 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.28568 | 15.90282 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.90282 | 14.6306 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.6306 | 13.46015 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.46015 | 12.38334 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.38334 | 11.39267 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.39267 | 10.48126 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.48126 | 9.642755 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.1232 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.642755 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 1998 considerando TR = 50

| SBUH 1998 50 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249.162 | 0 | 9.96648 |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 249.162 | 356.6881 | 9.96648 | 33.40317 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 356.6881 | 552.5894 | 33.40317 | 67.10202 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 552.5894 | 862.3054 | 67.10202 | 118.3296 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 862.3054 | 1420.79 | 118.3296 | 200.1871 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1420.79 | 2626.646 | 200.1871 | 346.0696 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2626.646 | 1942.744 | 346.0696 | 501.1596 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1942.744 | 1171.679 | 501.1596 | 585.6437 |
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1171.679 | 782.5118 | 585.6437 | 616.9598 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 782.5118 | 559.3659 | 616.9598 | 621.2781 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 559.3659 | 419.6915 | 621.2781 | 610.7382 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 419.6915 | 326.5099 | 610.7382 | 591.7272 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 326.5099 | 0 | 591.7272 | 557.4494 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 557.4494 | 512.8534 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 512.8534 | 471.8252 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 471.8252 | 434.0792 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 434.0792 | 399.3528 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 399.3528 | 367.4046 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 367.4046 | 338.0122 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 338.0122 | 310.9713 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 310.9713 | 286.0936 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 286.0936 | 263.2061 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 263.2061 | 242.1496 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242.1496 | 222.7776 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 222.7776 | 204.9554 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 204.9554 | 188.559 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 188.559 | 173.4743 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 173.4743 | 159.5963 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 159.5963 | 146.8286 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 146.8286 | 135.0823 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 135.0823 | 124.2757 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 124.2757 | 114.3337 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 114.3337 | 105.187 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 105.187 | 96.77202 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96.77202 | 89.03026 |
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 89.03026 | 81.90784 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.90784 | 75.35521 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75.35521 | 69.3268 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.3268 | 63.78065 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63.78065 | 58.6782 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58.6782 | 53.98394 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 53.98394 | 49.66523 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49.66523 | 45.69201 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45.69201 | 42.03665 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42.03665 | 38.67372 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38.67372 | 35.57982 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35.57982 | 32.73343 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32.73343 | 30.11476 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.11476 | 27.70558 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27.70558 | 25.48913 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.48913 | 23.45 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23.45 | 21.574 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.574 | 19.84808 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.84808 | 18.26024 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.26024 | 16.79942 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.79942 | 15.45546 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.45546 | 14.21903 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.21903 | 13.0815 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.0815 | 12.03498 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.03498 | 11.07219 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.07219 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2008 considerando TR = 25

| SBUH 2008 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 226.2291 | 0 | 9.049163 | |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 226.2291 | 313.9068 | 9.049163 | 29.93066 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 313.9068 | 481.1915 | 29.93066 | 59.34014 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 481.1915 | 750.1701 | 59.34014 | 103.8474 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 750.1701 | 1238.143 | 103.8474 | 175.0721 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1238.143 | 2294.234 | 175.0721 | 302.3614 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2294.234 | 1699.24 | 302.3614 | 437.9115 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1699.24 | 1025.37 | 437.9115 | 511.863 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1025.37 | 684.9644 | 511.863 | 539.3273 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 684.9644 | 489.7026 | 539.3273 | 543.1678 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 489.7026 | 367.4554 | 543.1678 | 534.0007 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 367.4554 | 285.889 | 534.0007 | 517.4144 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 285.889 | 0 | 517.4144 | 487.4568 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 487.4568 | 448.4603 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 448.4603 | 412.5835 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 412.5835 | 379.5768 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 379.5768 | 349.2106 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 349.2106 | 321.2738 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 321.2738 | 295.5719 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 295.5719 | 271.9261 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 271.9261 | 250.172 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250.172 | 230.1583 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 230.1583 | 211.7456 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 211.7456 | 194.806 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 194.806 | 179.2215 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 179.2215 | 164.8838 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 164.8838 | 151.6931 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 151.6931 | 139.5576 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 139.5576 | 128.393 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 128.393 | 118.1216 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 118.1216 | 108.6718 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 108.6718 | 99.9781 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.9781 | 91.97985 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91.97985 | 84.62146 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 84.62146 | 77.85175 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77.85175 | 71.62361 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71.62361 | 65.89372 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.89372 | 60.62222 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.62222 | 55.77244 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.77244 | 51.31065 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.31065 | 47.2058 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.2058 | 43.42933 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.42933 | 39.95499 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.95499 | 36.75859 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.75859 | 33.8179 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.8179 | 31.11247 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31.11247 | 28.62347 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.62347 | 26.33359 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.33359 | 24.22691 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.22691 | 22.28875 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.28875 | 20.50565 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.50565 | 18.8652 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.8652 | 17.35598 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.35598 | 15.96751 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.96751 | 14.69011 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.69011 | 13.5149 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.5149 | 12.43371 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.43371 | 11.43901 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.43901 | 10.52389 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.52389 | 9.681977 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | | 9.681977 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2008 considerando TR = 50

| SBUH 2008 50 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 257.554 | 0 | 10.30216 | |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 257.554 | 365.5483 | 10.30216 | 34.40208 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 365.5483 | 560.1332 | 34.40208 | 68.67718 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 560.1332 | 868.8039 | 68.67718 | 120.3405 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 868.8039 | 1426.444 | 120.3405 | 202.5232 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1426.444 | 2631.604 | 202.5232 | 348.6432 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2631.604 | 1944.705 | 348.6432 | 503.8041 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1944.705 | 1172.529 | 503.8041 | 588.1891 |
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1172.529 | 782.9871 | 588.1891 | 619.3547 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 782.9871 | 559.6692 | 619.3547 | 623.5125 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 559.6692 | 419.9018 | 623.5125 | 612.8144 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 419.9018 | 326.6644 | 612.8144 | 593.6519 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 326.6644 | 0 | 593.6519 | 559.2263 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 559.2263 | 514.4882 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 514.4882 | 473.3291 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 473.3291 | 435.4628 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 435.4628 | 400.6258 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 400.6258 | 368.5757 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 368.5757 | 339.0897 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 339.0897 | 311.9625 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 311.9625 | 287.0055 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 287.0055 | 264.0451 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 264.0451 | 242.9214 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242.9214 | 223.4877 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 223.4877 | 205.6087 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 205.6087 | 189.16 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 189.16 | 174.0272 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 174.0272 | 160.105 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 160.105 | 147.2966 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 147.2966 | 135.5129 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 135.5129 | 124.6719 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 124.6719 | 114.6981 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 114.6981 | 105.5223 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 105.5223 | 97.08049 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97.08049 | 89.31405 |
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 89.31405 | 82.16893 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82.16893 | 75.59541 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75.59541 | 69.54778 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69.54778 | 63.98396 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63.98396 | 58.86524 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58.86524 | 54.15602 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54.15602 | 49.82354 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49.82354 | 45.83766 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45.83766 | 42.17064 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42.17064 | 38.79699 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38.79699 | 35.69323 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35.69323 | 32.83777 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32.83777 | 30.21075 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.21075 | 27.79389 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27.79389 | 25.57038 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.57038 | 23.52475 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23.52475 | 21.64277 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.64277 | 19.91135 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.91135 | 18.31844 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.31844 | 16.85297 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.85297 | 15.50473 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.50473 | 14.26435 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.26435 | 13.1232 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.1232 | 12.07335 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.07335 | 11.10748 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.10748 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2018 considerando TR = 25

| SBUH 2018 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 243.8717 | 0 | 9.754867 | |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 243.8717 | 333.7804 | 9.754867 | 32.08056 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 333.7804 | 498.8695 | 32.08056 | 62.82011 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 498.8695 | 765.9254 | 62.82011 | 108.3863 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 765.9254 | 1252.267 | 108.3863 | 180.4431 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1252.267 | 2306.952 | 180.4431 | 308.3764 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2306.952 | 1704.359 | 308.3764 | 444.1588 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1704.359 | 1027.607 | 444.1588 | 517.9047 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1027.607 | 686.218 | 517.9047 | 545.0253 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 686.218 | 490.5043 | 545.0253 | 548.4922 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 490.5043 | 368.0122 | 548.4922 | 538.9535 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 368.0122 | 286.2981 | 538.9535 | 522.0096 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 286.2981 | 0 | 522.0096 | 491.7008 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 491.7008 | 452.3647 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 452.3647 | 416.1755 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 416.1755 | 382.8815 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 382.8815 | 352.251 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 352.251 | 324.0709 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 324.0709 | 298.1452 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 298.1452 | 274.2936 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 274.2936 | 252.3501 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 252.3501 | 232.1621 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 232.1621 | 213.5891 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 213.5891 | 196.502 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 196.502 | 180.7818 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 180.7818 | 166.3193 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 166.3193 | 153.0138 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 153.0138 | 140.7727 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 140.7727 | 129.5108 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 129.5108 | 119.15 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 119.15 | 109.618 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 109.618 | 100.8485 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100.8485 | 92.78066 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 92.78066 | 85.3582 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85.3582 | 78.52955 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 78.52955 | 72.24718 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72.24718 | 66.46741 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 66.46741 | 61.15002 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61.15002 | 56.25801 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56.25801 | 51.75737 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.75737 | 47.61678 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.61678 | 43.80744 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.80744 | 40.30285 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40.30285 | 37.07862 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37.07862 | 34.11233 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.11233 | 31.38334 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31.38334 | 28.87267 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.87267 | 26.56286 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.56286 | 24.43783 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.43783 | 22.48281 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.48281 | 20.68418 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.68418 | 19.02945 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.02945 | 17.50709 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.50709 | 16.10652 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.10652 | 14.818 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.818 | 13.63256 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.63256 | 12.54196 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.54196 | 11.5386 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.5386 | 10.61551 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.61551 | 9.766271 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | | 9.766271 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2018 considerando TR = 50

| SBUH 2018 50_120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 278.2 | 0 | 11.128 |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 278.2 | 387.3459 | 11.128 | 36.85959 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 387.3459 | 578.6923 | 36.85959 | 72.55235 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 578.6923 | 884.7912 | 72.55235 | 125.2875 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 884.7912 | 1440.354 | 125.2875 | 208.2703 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1440.354 | 2643.802 | 208.2703 | 354.9749 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2643.802 | 1949.529 | 354.9749 | 510.3101 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1949.529 | 1174.623 | 510.3101 | 594.4514 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1174.623 | 784.1562 | 594.4514 | 625.2464 |
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 784.1562 | 560.4154 | 625.2464 | 629.0096 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 560.4154 | 420.4193 | 629.0096 | 617.9222 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 420.4193 | 327.0444 | 617.9222 | 598.387 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 327.0444 | 0 | 598.387 | 563.5978 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 563.5978 | 518.51 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 518.51 | 477.0292 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 477.0292 | 438.8668 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 438.8668 | 403.7575 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 403.7575 | 371.4569 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 371.4569 | 341.7403 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 341.7403 | 314.4011 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 314.4011 | 289.249 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 289.249 | 266.1091 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 266.1091 | 244.8204 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 244.8204 | 225.2347 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 225.2347 | 207.216 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 207.216 | 190.6387 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 190.6387 | 175.3876 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 175.3876 | 161.3566 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 161.3566 | 148.4481 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 148.4481 | 136.5722 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 136.5722 | 125.6464 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 125.6464 | 115.5947 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 115.5947 | 106.3471 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 106.3471 | 97.83937 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 97.83937 | 90.01222 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90.01222 | 82.81125 |
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82.81125 | 76.18635 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76.18635 | 70.09144 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70.09144 | 64.48412 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 64.48412 | 59.32539 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 59.32539 | 54.57936 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54.57936 | 50.21301 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50.21301 | 46.19597 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46.19597 | 42.50029 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42.50029 | 39.10027 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.10027 | 35.97225 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35.97225 | 33.09447 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.09447 | 30.44691 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.44691 | 28.01116 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.01116 | 25.77027 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.77027 | 23.70864 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23.70864 | 21.81195 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.81195 | 20.067 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.067 | 18.46164 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.46164 | 16.98471 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.98471 | 15.62593 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.62593 | 14.37586 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.37586 | 13.22579 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.22579 | 12.16772 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.16772 | 11.19431 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.19431 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2028 considerando TR = 25

| SBUH 2028 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 262.6536 | 0 | 10.50614 | |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 262.6536 | 354.9373 | 10.50614 | 34.36929 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 354.9373 | 517.689 | 34.36929 | 66.5248 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 517.689 | 782.6981 | 66.5248 | 113.2183 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 782.6981 | 1267.304 | 113.2183 | 186.1609 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1267.304 | 2320.492 | 186.1609 | 314.7799 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2320.492 | 1709.808 | 314.7799 | 450.8095 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1709.808 | 1029.989 | 450.8095 | 524.3366 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1029.989 | 687.5526 | 524.3366 | 551.0913 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 687.5526 | 491.3577 | 551.0913 | 554.1604 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 491.3577 | 368.6048 | 554.1604 | 544.2261 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 368.6048 | 286.7337 | 544.2261 | 526.9015 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 286.7337 | 0 | 526.9015 | 496.2188 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 496.2188 | 456.5213 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 456.5213 | 419.9996 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 419.9996 | 386.3996 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 386.3996 | 355.4876 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 355.4876 | 327.0486 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 327.0486 | 300.8847 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 300.8847 | 276.8139 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 276.8139 | 254.6688 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 254.6688 | 234.2953 |
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 234.2953 | 215.5517 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 215.5517 | 198.3076 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 198.3076 | 182.443 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 182.443 | 167.8475 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 167.8475 | 154.4197 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 154.4197 | 142.0661 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 142.0661 | 130.7009 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 130.7009 | 120.2448 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 120.2448 | 110.6252 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110.6252 | 101.7752 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101.7752 | 93.63317 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 93.63317 | 86.14252 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86.14252 | 79.25111 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 79.25111 | 72.91103 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72.91103 | 67.07814 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67.07814 | 61.71189 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61.71189 | 56.77494 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 56.77494 | 52.23295 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52.23295 | 48.05431 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48.05431 | 44.20996 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44.20996 | 40.67317 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40.67317 | 37.41931 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37.41931 | 34.42577 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.42577 | 31.67171 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31.67171 | 29.13797 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.13797 | 26.80693 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.80693 | 24.66238 |
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.66238 | 22.68939 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.68939 | 20.87424 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.87424 | 19.2043 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.2043 | 17.66795 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.66795 | 16.25452 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.25452 | 14.95416 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.95416 | 13.75782 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.75782 | 12.6572 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.6572 | 11.64462 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.64462 | 10.71305 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.71305 | 9.856008 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.856008 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2028 considerando TR = 50

SBUH 2028 50_120

| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
|-------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 299.6257 | 0 | 11.98503 |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 299.6257 | 409.9668 | 11.98503 | 39.40992 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 409.9668 | 597.9523 | 39.40992 | 76.5739 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 597.9523 | 901.3824 | 76.5739 | 130.4214 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 901.3824 | 1454.789 | 130.4214 | 214.2345 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1454.789 | 2656.46 | 214.2345 | 361.5457 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2656.46 | 1954.535 | 361.5457 | 517.0619 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1954.535 | 1176.795 | 517.0619 | 600.9502 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1176.795 | 785.3695 | 600.9502 | 631.3608 |
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 785.3695 | 561.1897 | 631.3608 | 634.7143 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 561.1897 | 420.9564 | 634.7143 | 623.223 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 420.9564 | 327.4387 | 623.223 | 603.3009 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 327.4387 | 0 | 603.3009 | 568.1344 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 568.1344 | 522.6836 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 522.6836 | 480.869 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 480.869 | 442.3994 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 442.3994 | 407.0075 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 407.0075 | 374.4469 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 374.4469 | 344.4911 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 344.4911 | 316.9318 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 316.9318 | 291.5773 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 291.5773 | 268.2511 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 268.2511 | 246.791 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 246.791 | 227.0477 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 227.0477 | 208.8839 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 208.8839 | 192.1732 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 192.1732 | 176.7994 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 176.7994 | 162.6554 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 162.6554 | 149.643 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 149.643 | 137.6715 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 137.6715 | 126.6578 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 126.6578 | 116.5252 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 116.5252 | 107.2032 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 107.2032 | 98.62692 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 98.62692 | 90.73676 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90.73676 | 83.47782 |
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83.47782 | 76.7996 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76.7996 | 70.65563 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70.65563 | 65.00318 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.00318 | 59.80293 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 59.80293 | 55.01869 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.01869 | 50.6172 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50.6172 | 46.56782 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46.56782 | 42.84239 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42.84239 | 39.415 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.415 | 36.2618 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.2618 | 33.36086 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.36086 | 30.69199 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.69199 | 28.23663 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.23663 | 25.9777 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.9777 | 23.89948 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23.89948 | 21.98753 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.98753 | 20.22852 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.22852 | 18.61024 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.61024 | 17.12142 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.12142 | 15.75171 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.75171 | 14.49157 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.49157 | 13.33225 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.33225 | 12.26567 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.26567 | 11.28441 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.28441 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2038 considerando TR = 25

| SBUH 2038 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 273.3303 | 0 | 10.93321 |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 273.3303 | 366.9641 | 10.93321 | 35.67033 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 366.9641 | 528.3872 | 35.67033 | 68.63075 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 528.3872 | 792.2327 | 68.63075 | 115.9651 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 792.2327 | 1275.851 | 115.9651 | 189.4112 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1275.851 | 2328.189 | 189.4112 | 318.4199 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2328.189 | 1712.905 | 318.4199 | 454.5901 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1712.905 | 1031.343 | 454.5901 | 527.9928 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1031.343 | 688.3112 | 527.9928 | 554.5395 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 688.3112 | 491.8428 | 554.5395 | 557.3825 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 491.8428 | 368.9418 | 557.3825 | 547.2233 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 368.9418 | 286.9814 | 547.2233 | 529.6824 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 286.9814 | 0 | 529.6824 | 498.787 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 498.787 | 458.8841 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 458.8841 | 422.1734 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 422.1734 | 388.3995 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 388.3995 | 357.3275 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 357.3275 | 328.7413 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 328.7413 | 302.442 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 302.442 | 278.2467 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 278.2467 | 255.9869 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 255.9869 | 235.508 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 235.508 | 216.6673 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 216.6673 | 199.3339 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 199.3339 | 183.3872 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 183.3872 | 168.7163 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 168.7163 | 155.219 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 155.219 | 142.8014 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 142.8014 | 131.3773 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 131.3773 | 120.8671 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 120.8671 | 111.1978 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 111.1978 | 102.3019 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 102.3019 | 94.11779 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94.11779 | 86.58836 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86.58836 | 79.6613 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 79.6613 | 73.28839 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73.28839 | 67.42532 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67.42532 | 62.03129 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 62.03129 | 57.06879 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57.06879 | 52.50329 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52.50329 | 48.30302 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48.30302 | 44.43878 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44.43878 | 40.88368 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40.88368 | 37.61299 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37.61299 | 34.60395 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.60395 | 31.83563 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31.83563 | 29.28878 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.28878 | 26.94568 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.94568 | 24.79002 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.79002 | 22.80682 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.80682 | 20.98228 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.98228 | 19.30369 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.30369 | 17.7594 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.7594 | 16.33865 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.33865 | 15.03156 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.03156 | 13.82903 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.82903 | 12.72271 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.72271 | 11.70489 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.70489 | 10.7685 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.7685 | 9.90702 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | | 9.90702 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2038 considerando TR = 50

| SBUH 2038 50 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 311.8053 | 0 | 12.47221 | |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 311.8053 | 422.8259 | 12.47221 | 40.85968 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 422.8259 | 608.9008 | 40.85968 | 78.85997 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 608.9008 | 910.8138 | 78.85997 | 133.3398 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 910.8138 | 1462.995 | 133.3398 | 217.6249 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1462.995 | 2663.656 | 217.6249 | 365.281 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2663.656 | 1957.381 | 365.281 | 520.9 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1957.381 | 1178.03 | 520.9 | 604.6445 |
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1178.03 | 786.0592 | 604.6445 | 634.8365 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 786.0592 | 561.6299 | 634.8365 | 637.9571 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 561.6299 | 421.2617 | 637.9571 | 626.2362 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 421.2617 | 327.6629 | 626.2362 | 606.0943 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 327.6629 | 0 | 606.0943 | 570.7133 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 570.7133 | 525.0562 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 525.0562 | 483.0517 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 483.0517 | 444.4076 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 444.4076 | 408.855 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 408.855 | 376.1466 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 376.1466 | 346.0548 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 346.0548 | 318.3705 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 318.3705 | 292.9008 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 292.9008 | 269.4688 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 269.4688 | 247.9113 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 247.9113 | 228.0784 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 228.0784 | 209.8321 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 209.8321 | 193.0455 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 193.0455 | 177.6019 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 177.6019 | 163.3937 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 163.3937 | 150.3222 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 150.3222 | 138.2965 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 138.2965 | 127.2327 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 127.2327 | 117.0541 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117.0541 | 107.6898 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 107.6898 | 99.0746 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.0746 | 91.14864 |
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91.14864 | 83.85674 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83.85674 | 77.14821 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77.14821 | 70.97635 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70.97635 | 65.29824 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.29824 | 60.07438 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.07438 | 55.26843 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.26843 | 50.84696 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50.84696 | 46.7792 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46.7792 | 43.03686 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.03686 | 39.59391 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.59391 | 36.4264 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.4264 | 33.51229 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.51229 | 30.83131 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.83131 | 28.3648 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.3648 | 26.09562 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.09562 | 24.00797 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.00797 | 22.08733 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.08733 | 20.32034 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.32034 | 18.69472 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.69472 | 17.19914 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.19914 | 15.82321 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.82321 | 14.55735 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.55735 | 13.39276 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.39276 | 12.32134 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.32134 | 11.33564 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.33564 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2048 considerando TR = 25

| SBUH 2048 25 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 280.8495 | 0 | 11.23398 |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 280.8495 | 375.4342 | 11.23398 | 36.58661 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 375.4342 | 535.9215 | 36.58661 | 70.11391 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 535.9215 | 798.9476 | 70.11391 | 117.8996 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 798.9476 | 1281.871 | 117.8996 | 191.7003 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1281.871 | 2333.609 | 191.7003 | 320.9835 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2333.609 | 1715.087 | 320.9835 | 457.2527 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1715.087 | 1032.296 | 457.2527 | 530.5678 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1032.296 | 688.8455 | 530.5678 | 556.968 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 688.8455 | 492.1845 | 556.968 | 559.6518 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 492.1845 | 369.179 | 559.6518 | 549.3342 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 369.179 | 287.1558 | 549.3342 | 531.6408 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 287.1558 | 0 | 531.6408 | 500.5958 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 500.5958 | 460.5481 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 460.5481 | 423.7043 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 423.7043 | 389.8079 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 389.8079 | 358.6233 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 358.6233 | 329.9334 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 329.9334 | 303.5388 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 303.5388 | 279.2557 |
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 279.2557 | 256.9152 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 256.9152 | 236.362 |
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 236.362 | 217.453 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 217.453 | 200.0568 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200.0568 | 184.0523 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 184.0523 | 169.3281 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 169.3281 | 155.7818 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 155.7818 | 143.3193 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 143.3193 | 131.8537 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 131.8537 | 121.3054 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 121.3054 | 111.601 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 111.601 | 102.6729 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 102.6729 | 94.45909 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94.45909 | 86.90236 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86.90236 | 79.95017 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 79.95017 | 73.55416 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73.55416 | 67.66983 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67.66983 | 62.25624 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 62.25624 | 57.27574 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57.27574 | 52.69368 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52.69368 | 48.47819 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48.47819 | 44.59993 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44.59993 | 41.03194 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41.03194 | 37.74938 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37.74938 | 34.72943 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.72943 | 31.95108 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31.95108 | 29.39499 |
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.39499 | 27.04339 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27.04339 | 24.87992 |
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.87992 | 22.88953 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.88953 | 21.05836 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.05836 | 19.3737 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.3737 | 17.8238 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.8238 | 16.3979 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.3979 | 15.08606 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.08606 | 13.87918 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.87918 | 12.76884 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.76884 | 11.74734 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.74734 | 10.80755 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.80755 | 9.942946 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.942946 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2048 considerando TR = 50

| SBUH 2048 50 120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 320.383 | 0 | 12.81532 | |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 320.383 | 431.8821 | 12.81532 | 41.8807 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 431.8821 | 616.6115 | 41.8807 | 80.46998 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 616.6115 | 917.456 | 80.46998 | 135.3951 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 917.456 | 1468.774 | 135.3951 | 220.0127 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1468.774 | 2668.724 | 220.0127 | 367.9116 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2668.724 | 1959.385 | 367.9116 | 523.603 |
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1959.385 | 1178.9 | 523.603 | 607.2462 |
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1178.9 | 786.545 | 607.2462 | 637.2843 |
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 786.545 | 561.9399 | 637.2843 | 640.241 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 561.9399 | 421.4767 | 640.241 | 628.3584 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 421.4767 | 327.8208 | 628.3584 | 608.0616 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 327.8208 | 0 | 608.0616 | 572.5295 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 572.5295 | 526.7271 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 526.7271 | 484.589 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 484.589 | 445.8218 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 445.8218 | 410.1561 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 410.1561 | 377.3436 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 377.3436 | 347.1561 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 347.1561 | 319.3836 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 319.3836 | 293.8329 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 293.8329 | 270.3263 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 270.3263 | 248.7002 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 248.7002 | 228.8042 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 228.8042 | 210.4998 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 210.4998 | 193.6599 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 193.6599 | 178.1671 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 178.1671 | 163.9137 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 163.9137 | 150.8006 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 150.8006 | 138.7366 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 138.7366 | 127.6376 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 127.6376 | 117.4266 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117.4266 | 108.0325 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 108.0325 | 99.38989 |
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.38989 | 91.4387 |
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91.4387 | 84.12361 |
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 84.12361 | 77.39372 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77.39372 | 71.20222 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71.20222 | 65.50604 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.50604 | 60.26556 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.26556 | 55.44432 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.44432 | 51.00877 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.00877 | 46.92807 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46.92807 | 43.17382 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.17382 | 39.71992 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.71992 | 36.54232 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.54232 | 33.61894 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.61894 | 30.92942 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.92942 | 28.45507 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.45507 | 26.17866 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.17866 | 24.08437 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.08437 | 22.15762 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.15762 | 20.38501 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.38501 | 18.75421 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.75421 | 17.25387 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.25387 | 15.87356 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.87356 | 14.60368 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.60368 | 13.43538 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.43538 | 12.36055 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.36055 | 11.37171 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|----------|--|
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 11.37171 | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|----------|--|

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2058 considerando TR = 25

SBUH 2058 25 120

| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
|-------|-------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | Acumulada | | | | | | | |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 286.1554 | 0 | 11.44621 |
| 10 | 24.02972 | 4.004953 | 4.004953 | 0 | 0 | 0 | 286.1554 | 381.4109 | 11.44621 | 37.23317 |
| 20 | 31.42903 | 5.238172 | 9.243125 | 0.726782 | 0.726782 | 4.360691 | 381.4109 | 541.238 | 37.23317 | 71.16047 |
| 30 | 42.86622 | 7.14437 | 16.38749 | 3.858167 | 3.131385 | 18.78831 | 541.238 | 803.6858 | 71.16047 | 119.2646 |
| 40 | 61.924 | 10.32067 | 26.70816 | 10.60231 | 6.744144 | 40.46486 | 803.6858 | 1286.119 | 119.2646 | 193.3156 |
| 50 | 97.26953 | 16.21159 | 42.91975 | 23.60762 | 13.00531 | 78.03188 | 1286.119 | 2337.434 | 193.3156 | 322.7925 |
| 60 | 174.6481 | 29.10802 | 72.02777 | 49.82849 | 26.22087 | 157.3252 | 2337.434 | 1716.626 | 322.7925 | 459.1315 |
| 70 | 127.5674 | 21.26124 | 93.28901 | 69.9278 | 20.09931 | 120.5958 | 1716.626 | 1032.969 | 459.1315 | 532.3848 |
| 80 | 76.62406 | 12.77068 | 106.0597 | 82.19065 | 12.26285 | 73.57711 | 1032.969 | 689.2225 | 532.3848 | 558.6816 |
| 90 | 51.08613 | 8.514355 | 114.574 | 90.42043 | 8.229779 | 49.37868 | 689.2225 | 492.4256 | 558.6816 | 561.253 |
| 100 | 36.48378 | 6.08063 | 120.6547 | 96.31909 | 5.898654 | 35.39193 | 492.4256 | 369.3465 | 561.253 | 550.8237 |
| 110 | 27.35752 | 4.559587 | 125.2143 | 100.7523 | 4.433207 | 26.59924 | 369.3465 | 287.2788 | 550.8237 | 533.0228 |
| 120 | 21.27484 | 3.545807 | 128.7601 | 104.2052 | 3.452921 | 20.71753 | 287.2788 | 0 | 533.0228 | 501.8721 |
| 130 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 501.8721 | 461.7223 |
| 140 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 461.7223 | 424.7846 |
| 150 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 424.7846 | 390.8018 |
| 160 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 390.8018 | 359.5377 |
| 170 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 359.5377 | 330.7746 |
| 180 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 330.7746 | 304.3127 |
| 190 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 304.3127 | 279.9677 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 200 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 279.9677 | 257.5702 |
| 210 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 257.5702 | 236.9646 |
| 220 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 236.9646 | 218.0075 |
| 230 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 218.0075 | 200.5669 |
| 240 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200.5669 | 184.5215 |
| 250 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 184.5215 | 169.7598 |
| 260 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 169.7598 | 156.179 |
| 270 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 156.179 | 143.6847 |
| 280 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 143.6847 | 132.1899 |
| 290 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 132.1899 | 121.6147 |
| 300 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 121.6147 | 111.8855 |
| 310 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 111.8855 | 102.9347 |
| 320 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 102.9347 | 94.69992 |
| 330 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94.69992 | 87.12393 |
| 340 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 87.12393 | 80.15401 |
| 350 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80.15401 | 73.74169 |
| 360 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73.74169 | 67.84236 |
| 370 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67.84236 | 62.41497 |
| 380 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 62.41497 | 57.42177 |
| 390 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57.42177 | 52.82803 |
| 400 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52.82803 | 48.60179 |
| 410 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48.60179 | 44.71364 |
| 420 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44.71364 | 41.13655 |
| 430 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41.13655 | 37.84563 |
| 440 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37.84563 | 34.81798 |
| 450 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34.81798 | 32.03254 |
| 460 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32.03254 | 29.46994 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 470 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.46994 | 27.11234 |
| 480 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27.11234 | 24.94335 |
| 490 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.94335 | 22.94789 |
| 500 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.94789 | 21.11205 |
| 510 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.11205 | 19.42309 |
| 520 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.42309 | 17.86924 |
| 530 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.86924 | 16.4397 |
| 540 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16.4397 | 15.12453 |
| 550 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.12453 | 13.91457 |
| 560 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.91457 | 12.8014 |
| 570 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.8014 | 11.77729 |
| 580 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.77729 | 10.83511 |
| 590 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.83511 | 9.968297 |
| 600 | | 0 | 128.7601 | 104.2052 | 0 | 0 | 0 | | 9.968297 | |

Memorial de cálculo do hidrograma pelo SBUH para 2058 considerando TR = 50

| SBUH 2058 50_120 | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo | Intensidade | Precipitação | Precipitação Acumulada | Pef | Pef(t) | ie | I1 | I2 | Q1 | Q2 |
| min | mm/h | mm | mm | [mm] | [mm] | [mm/h] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 326.4356 | 0 | 13.05743 |
| 10 | 27.41223 | 4.568705 | 4.568705 | 0 | 0 | 0 | 326.4356 | 438.2724 | 13.05743 | 42.60115 |
| 20 | 35.8531 | 5.975517 | 10.54422 | 1.151953 | 1.151953 | 6.91172 | 438.2724 | 622.0524 | 42.60115 | 81.60605 |
| 30 | 48.90023 | 8.150038 | 18.69426 | 5.195081 | 4.043127 | 24.25876 | 622.0524 | 922.143 | 81.60605 | 136.8454 |
| 40 | 70.64065 | 11.77344 | 30.4677 | 13.4307 | 8.235623 | 49.41374 | 922.143 | 1472.852 | 136.8454 | 221.6976 |
| 50 | 110.9616 | 18.49359 | 48.96129 | 28.84619 | 15.41549 | 92.49294 | 1472.852 | 2672.3 | 221.6976 | 369.7678 |
| 60 | 199.2322 | 33.20537 | 82.16667 | 59.35231 | 30.50612 | 183.0367 | 2672.3 | 1960.8 | 369.7678 | 525.5104 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 70 | 145.5243 | 24.25405 | 106.4207 | 82.53883 | 23.18652 | 139.1191 | 1960.8 | 1179.514 | 525.5104 | 609.0821 |
| 80 | 87.40995 | 14.56833 | 120.989 | 96.64391 | 14.10508 | 84.63047 | 1179.514 | 786.8877 | 609.0821 | 639.0116 |
| 90 | 58.2772 | 9.712867 | 130.7019 | 106.0981 | 9.454147 | 56.72488 | 786.8877 | 562.1586 | 639.0116 | 641.8525 |
| 100 | 41.61938 | 6.936563 | 137.6385 | 112.8695 | 6.771449 | 40.62869 | 562.1586 | 421.6284 | 641.8525 | 629.8558 |
| 110 | 31.20847 | 5.201412 | 142.8399 | 117.9564 | 5.086893 | 30.52136 | 421.6284 | 327.9322 | 629.8558 | 609.4497 |
| 120 | 24.26956 | 4.044927 | 146.8848 | 121.9172 | 3.960838 | 23.76503 | 327.9322 | 0 | 609.4497 | 573.8111 |
| 130 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 573.8111 | 527.9062 |
| 140 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 527.9062 | 485.6737 |
| 150 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 485.6737 | 446.8198 |
| 160 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 446.8198 | 411.0742 |
| 170 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 411.0742 | 378.1883 |
| 180 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 378.1883 | 347.9332 |
| 190 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 347.9332 | 320.0985 |
| 200 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 320.0985 | 294.4907 |
| 210 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 294.4907 | 270.9314 |
| 220 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 270.9314 | 249.2569 |
| 230 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 249.2569 | 229.3163 |
| 240 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 229.3163 | 210.971 |
| 250 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 210.971 | 194.0934 |
| 260 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 194.0934 | 178.5659 |
| 270 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 178.5659 | 164.2806 |
| 280 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 164.2806 | 151.1382 |
| 290 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 151.1382 | 139.0471 |
| 300 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 139.0471 | 127.9233 |
| 310 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 127.9233 | 117.6895 |
| 320 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117.6895 | 108.2743 |
| 330 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 108.2743 | 99.61237 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|----------|----------|---|---|---|---|----------|----------|
| 340 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.61237 | 91.64338 |
| 350 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91.64338 | 84.31191 |
| 360 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 84.31191 | 77.56696 |
| 370 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77.56696 | 71.3616 |
| 380 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71.3616 | 65.65267 |
| 390 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.65267 | 60.40046 |
| 400 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60.40046 | 55.56842 |
| 410 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55.56842 | 51.12295 |
| 420 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51.12295 | 47.03311 |
| 430 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47.03311 | 43.27046 |
| 440 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43.27046 | 39.80883 |
| 450 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39.80883 | 36.62412 |
| 460 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36.62412 | 33.69419 |
| 470 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33.69419 | 30.99866 |
| 480 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30.99866 | 28.51876 |
| 490 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28.51876 | 26.23726 |
| 500 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26.23726 | 24.13828 |
| 510 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24.13828 | 22.20722 |
| 520 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22.20722 | 20.43064 |
| 530 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20.43064 | 18.79619 |
| 540 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18.79619 | 17.2925 |
| 550 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17.2925 | 15.9091 |
| 560 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.9091 | 14.63637 |
| 570 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.63637 | 13.46546 |
| 580 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.46546 | 12.38822 |
| 590 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.38822 | 11.39716 |
| 600 | | 0 | 146.8848 | 121.9172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.39716 | |

