



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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 251, PPGE				
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(às) 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](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 - Markov 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	
Figura 17 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2008. 60	
Figura 18 - Figura do mapa de uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2018. 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	
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 talwegues. ....	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 talwegues.....	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
$t_c$	- 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
$I_m$	- 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
$P_{ef}$	- Precipitação efetiva
$I_a$	- Perdas por abstração inicial
$I$	- Ordenada do hidrograma instantâneo em m <sup>3</sup> /s
i	- Intensidade de precipitação em milímetros
d	- Parcela de área impermeável
$i_e$	- Precipitação excedente da área permeável em milímetros por hora
$A_d$	- Área total de drenagem em km <sup>2</sup>
Q(t)	- Quantidade de vazão efluente
( $\Delta t$ )	- 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

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	15
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
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
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
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>	<i>54</i>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
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 NEURAIAS .....	71
4.3 CÁLCULO DO HIDROGRAMA DE PROJETO.....	81
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE A – MAPAS .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE B – TABELAS E QUADROS .....</b>	<b>137</b>

## 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 inundação. 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 inundação. 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 inundação (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.

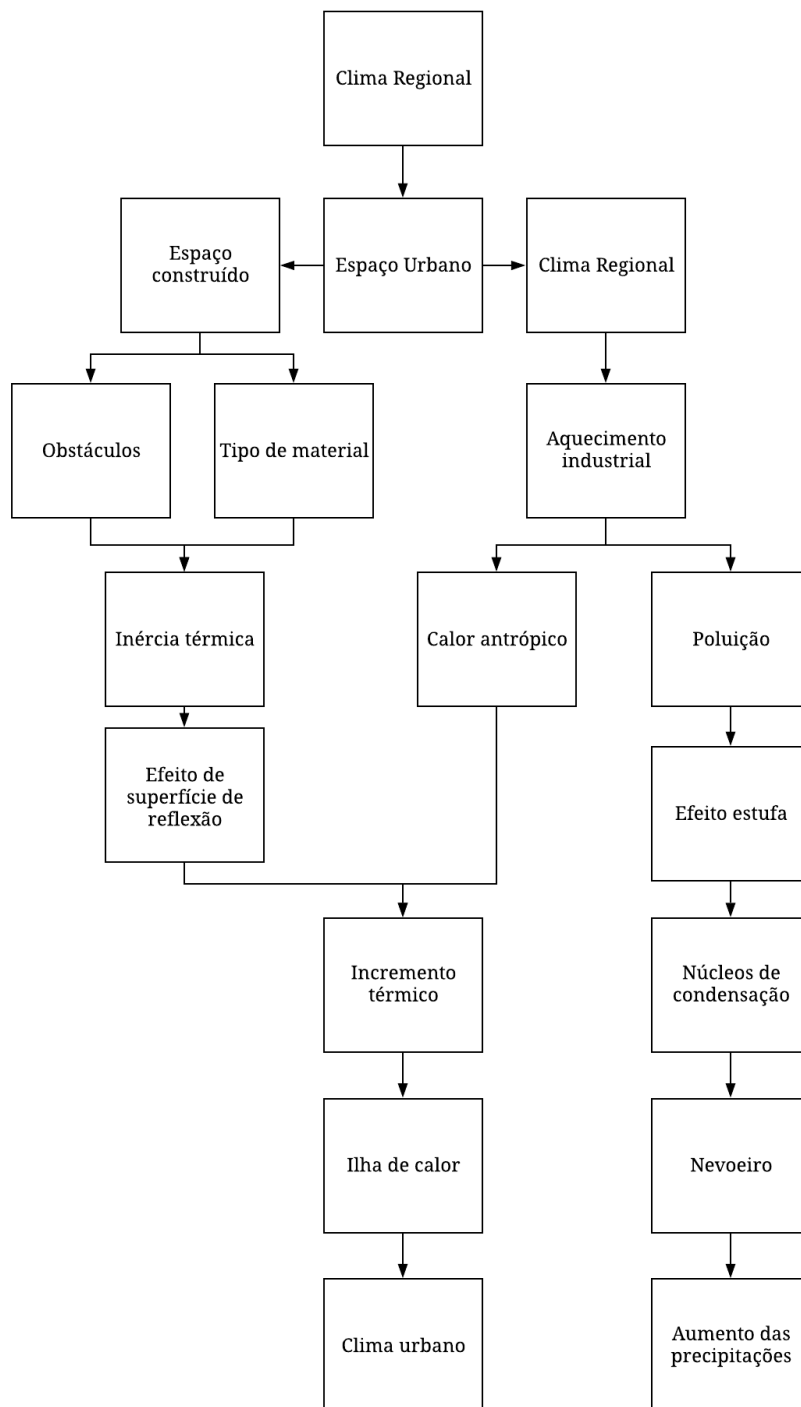
## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **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.

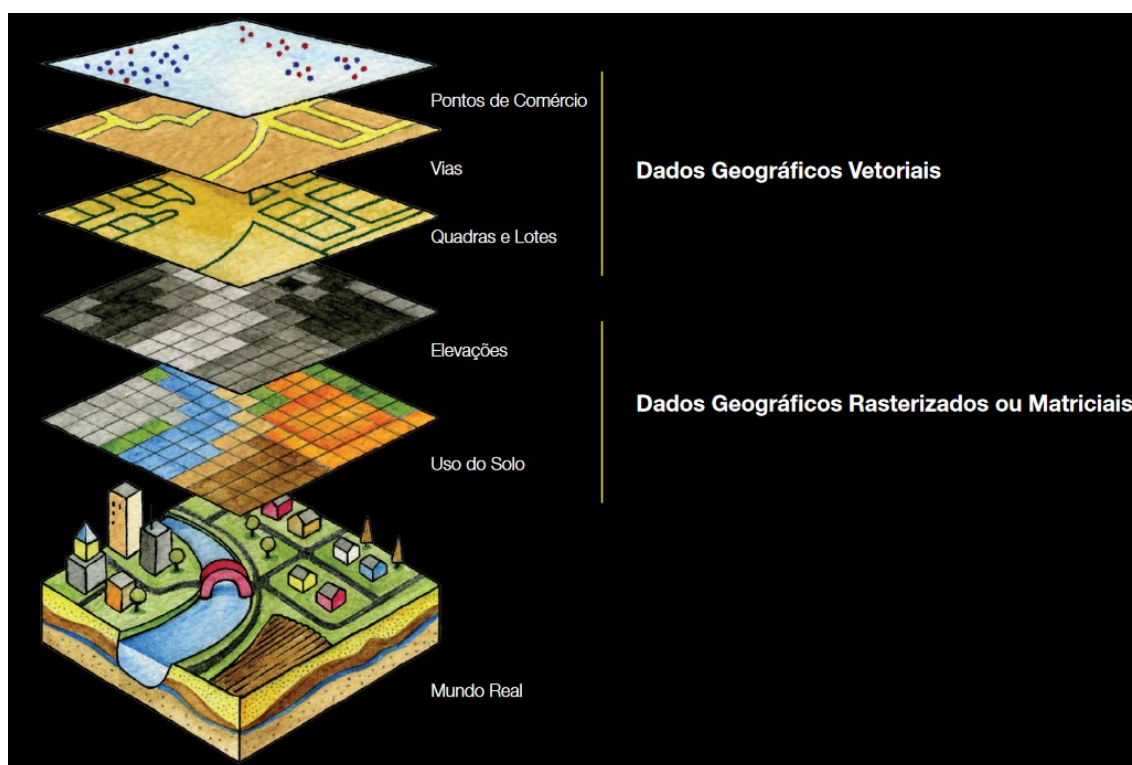
## 2.2 A VISUALIZAÇÃO DE FENÔMENOS URBANOS ATRAVÉS DOS SIG – SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

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 Markov (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 depende 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  $X^{(0)}, X^{(2)}, \dots, X^{(n-1)}$ , 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):

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

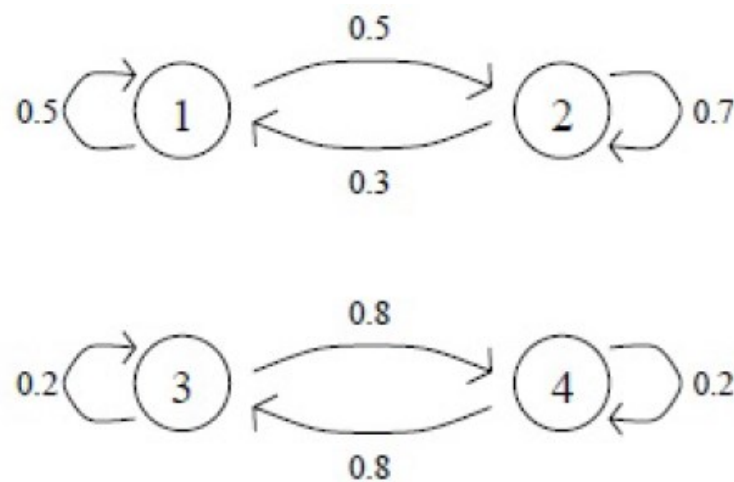
Esta probabilidade também é denominada como probabilidade de transição e é desenvolvida através de uma matriz de probabilidade de transição logo havendo estes estados,  $i, e j$  é possível montar uma matriz  $P_{ij}$  denominada como matriz de probabilidade (Equação 4) de transição de um estado para 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 Hanoi 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 e 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 Luckynow, 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 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 ( $t_c$ )*

Para a obtenção do tempo de concentração, Mamédio, Castro e Corseiul (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 km<sup>2</sup> até 50 km<sup>2</sup>, 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  $A$  (km<sup>2</sup>), 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)	$tc = \frac{0,0559 \cdot (4 \cdot A^5 + 1,5 \cdot L)}{L^{0,5} \cdot S^{0,5}}$
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. Porém 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 inundação. 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.

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

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	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	Em más condições	68	79	86	89
	Em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios (em boas condições)	Com relva mais de 75% de área	39	61	74	80
	Com relva 50 a 75% de área	49	69	79	84
Zonas comerciais, escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					

Tamanho do lote (m <sup>2</sup> )	% média impermeável				
Até 500 m <sup>2</sup>	65%	77	85	90	92
500 a 1000 m <sup>2</sup>	38%	61	75	83	87
1000 a 1300 m <sup>2</sup>	30%	57	72	81	86
1300 a 2000 m <sup>2</sup>	25%	54	70	80	85
2000 a 4000 m <sup>2</sup>	20%	51	68	79	84
<hr/>					
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.

<b>Material do Solo</b>	<b>Valores de “n” recomendado</b>	<b>Faixa de valores de “n”</b>
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
Gramma	0,45	0,39 a 0,63
Gramma curta	0,15	0,10 a 0,20
Gramma densa	0,24	0,17 a 0,30
Gramma 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 análise 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 prognóstico seja elaborado, são utilizados modelos hidrológicos de chuva-vazão dos quais que basicamente necessitam do uso de estatísticas estacionárias para dados de precipitação de projeto, características físicas da bacia, e as condições de urbanização. O método Santa Bárbara é um destes métodos existentes, destas variáveis tal como as ditas anteriormente, e o propósito 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 Bárbara, 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.

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

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

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

Onde  $S$ ,  $Ia$ , e  $P_{ef}$  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 construíam 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  $(\Delta t)$  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

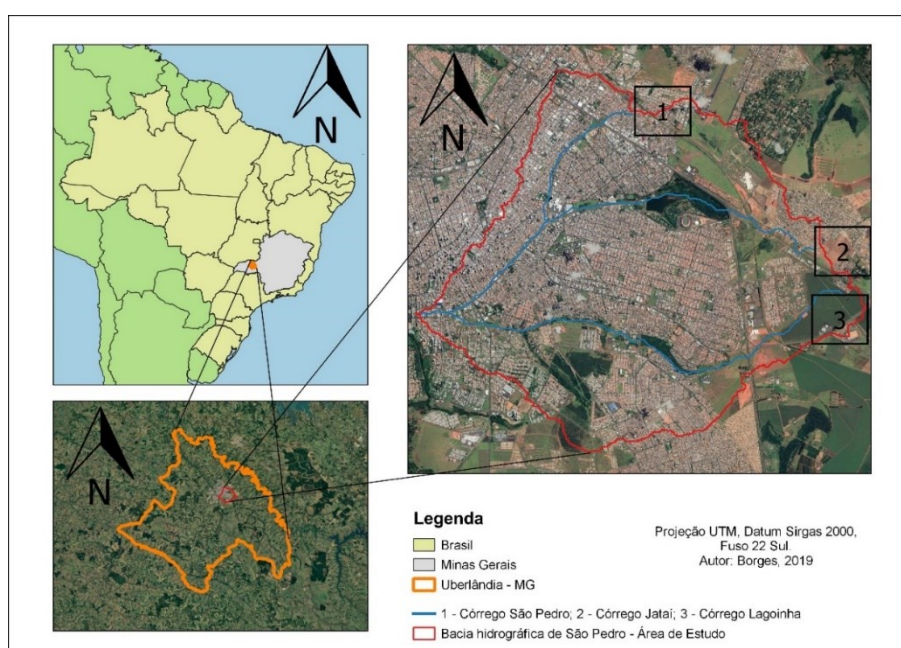
Segundo IBGE (2018), o município de Uberlândia – MG (Figura 5), está localizado na Mesorregião do triângulo mineiro, no estado de Minas Gerais. Suas coordenadas geográficas são dadas pela latitude  $18^\circ 56' 38''$  Sul e longitude  $48^\circ 18' 39''$  Oeste, com altitude de 863 metros.

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 km<sup>2</sup> com densidade demográfica de 146,78 hab/km<sup>2</sup>. A área urbana compreende 219 km<sup>2</sup> e a área rural possui 3.896,09 km<sup>2</sup>.

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 inundação 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 km<sup>2</sup> 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 quão 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 uberlandense 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.

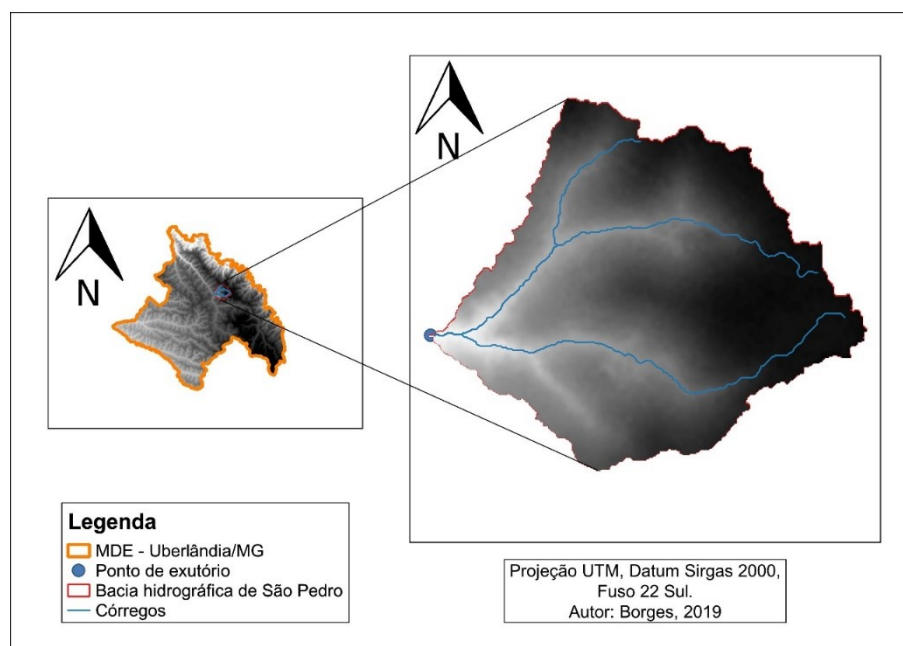
Tabela 4 - Características dos dados de sensoriamento remoto

Imagem	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*.

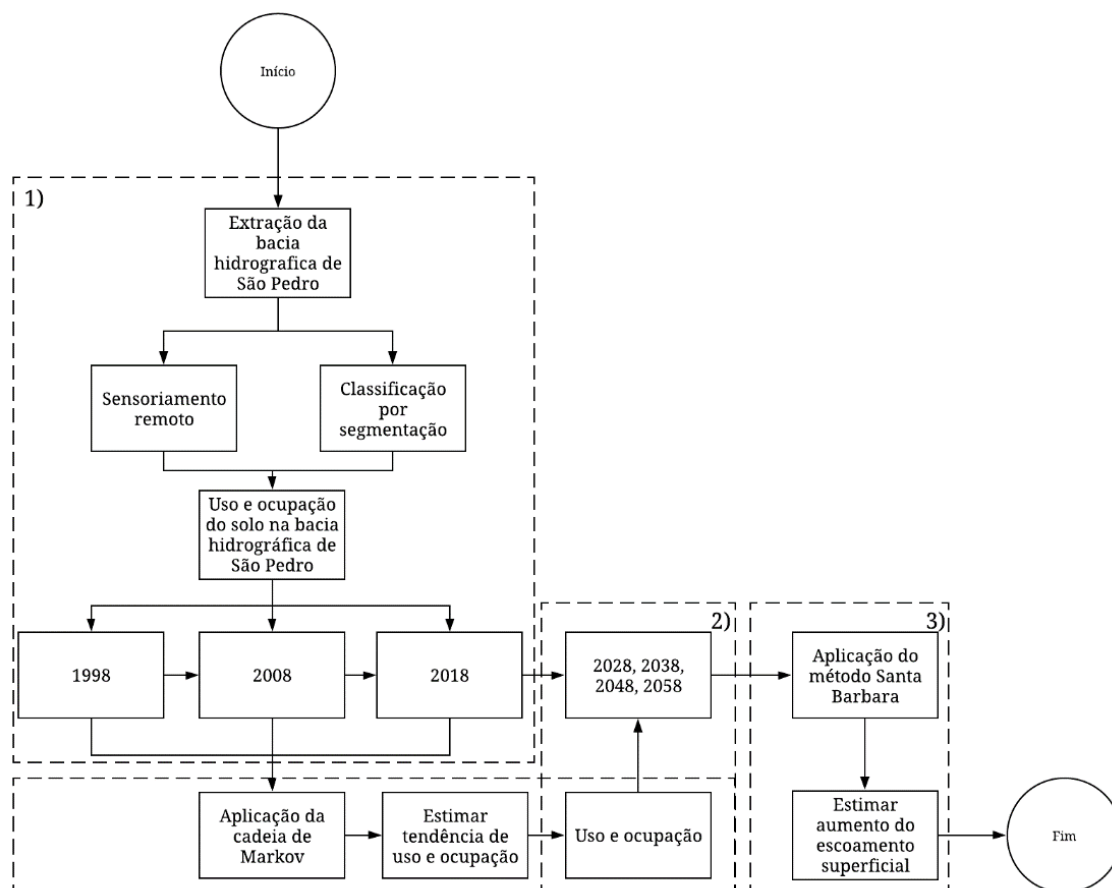
Foi também utilizado o Terrset que é um software que incorpora outras ferramentas de processamento para diferentes aplicações no contexto de uso e ocupação do solo, e os modelos preditivos. No Terrset foi utilizada a ferramenta de modelagem de mudanças espaciais, (*Land Change Modeler* - LCM), que analisa 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.

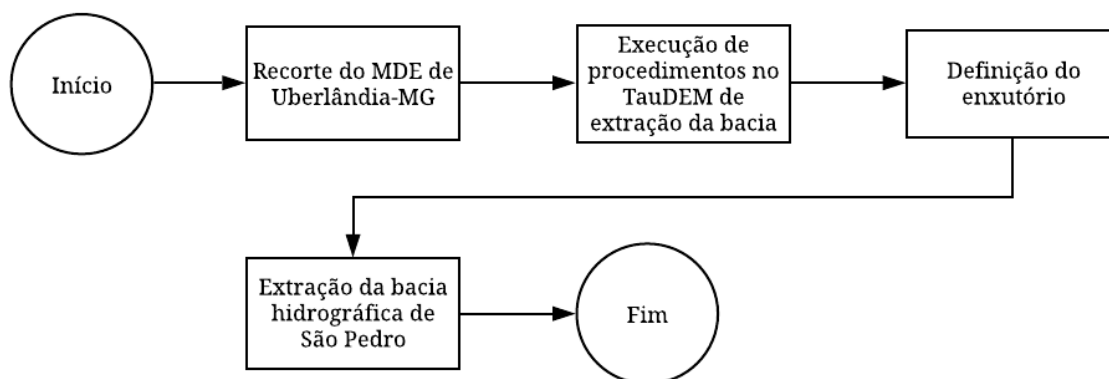
A figura 7 acima apresenta de modo geral as três etapas, que resultaram na análise da tendência da expansão urbana pela Cadeia de Markov e a utilização do método Santa Barbara para o cálculo da vazão no exutório da bacia hidrográfica de São Pedro no município de Uberlândia. Este estudo inicialmente depende 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.

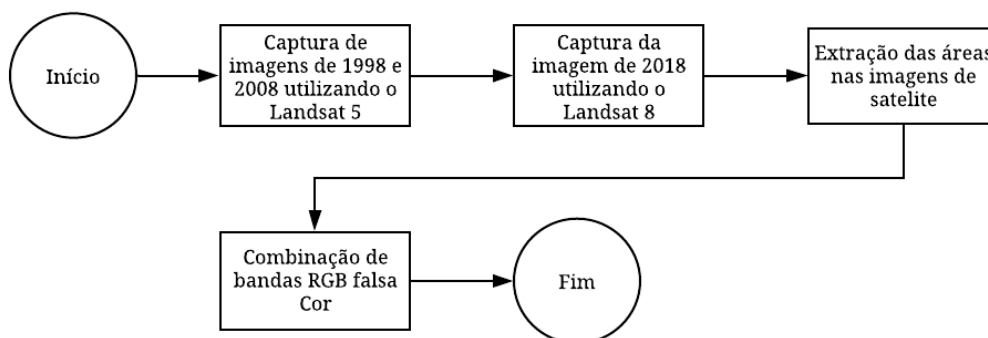
Essa série de procedimentos (Figura 8) resultou na delimitação da área de estudo. Este arquivo vetorial será o recorte das imagens obtidas pelo sensoriamento remoto, e posteriormente a classificação por segmentação e as demais análises espaciais.

### 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.

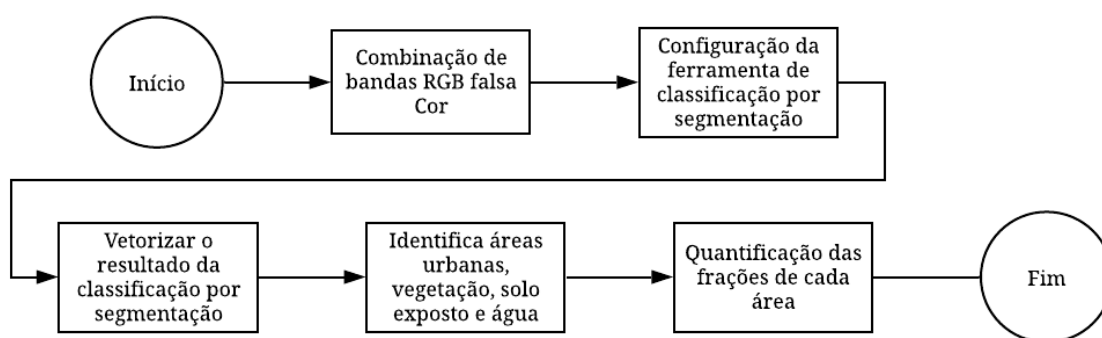
A figura 9 define como foi sensoriamento aplicado nas imagens e conforme dito anteriormente, o motivo dessa escolha se deu pelo fato de que é possível identificar separadamente as áreas, urbanas, a vegetação, o solo exposto, e a água. Este processo foi realizado no software QGIS 3.10 e os mapas exportados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

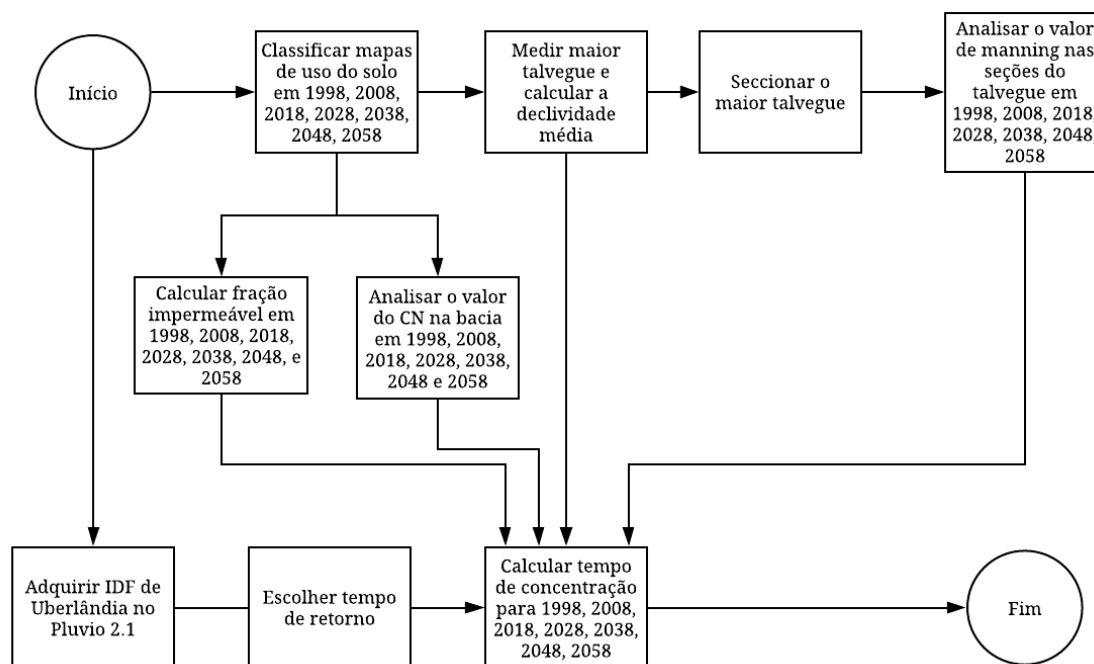
A calculadora *raster* do QGIS 3.10 calcula a área de cada uma das classes de uso do solo, água, vegetação, solo exposto, e área urbana, em forma de dados tabulados. Destes dados a fração de área impermeável, da qual foi considerada a área urbana, é necessária para o cálculo do tempo de concentração. 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 Sartoni, 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  $t_c$ , que foi calculado anteriormente. A figura 11 apresenta os passos para cálculo do  $t_c$  (Tempo de Concentração).

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

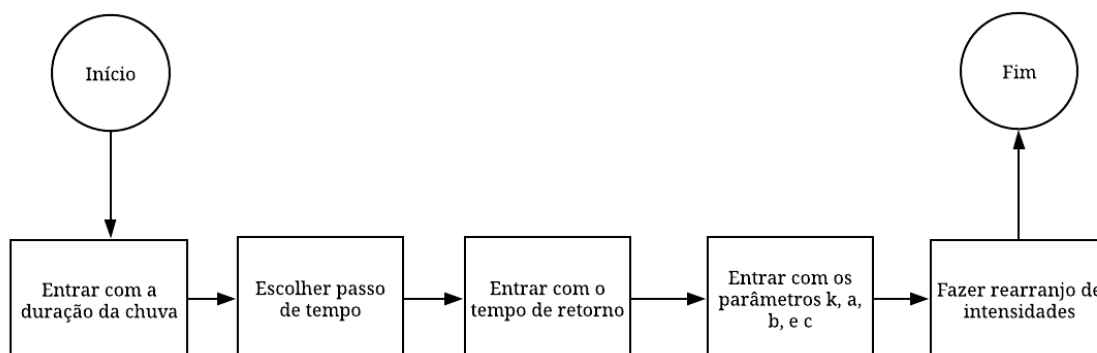


Fonte: O autor.

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.

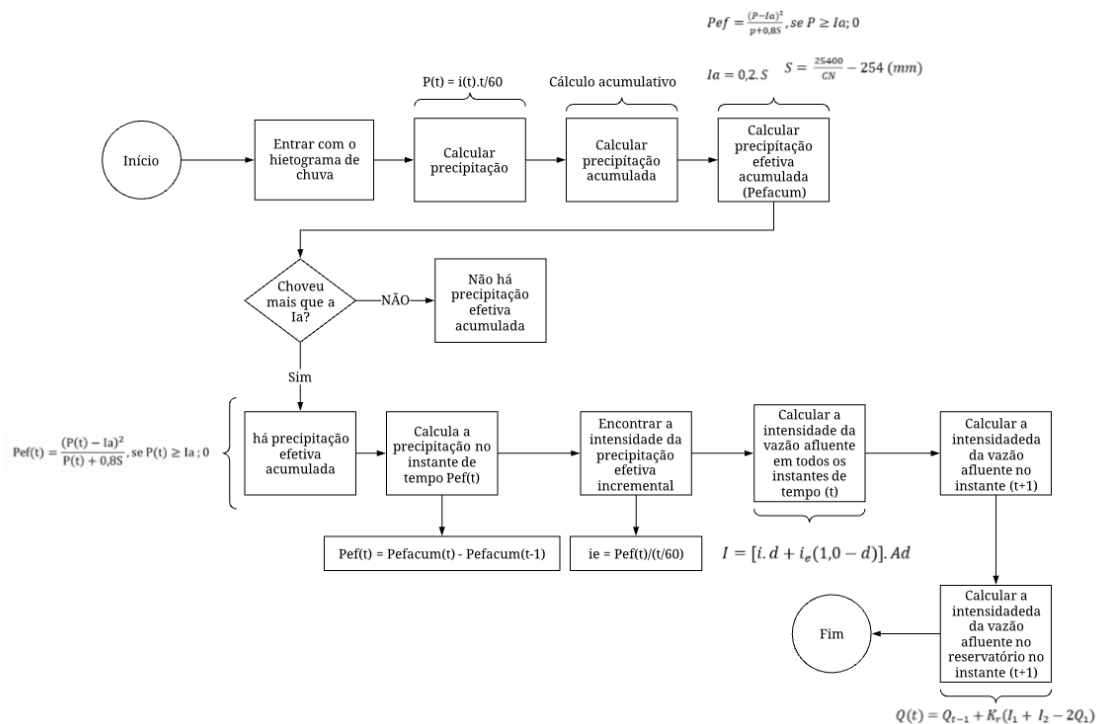


Fonte: O autor.

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.

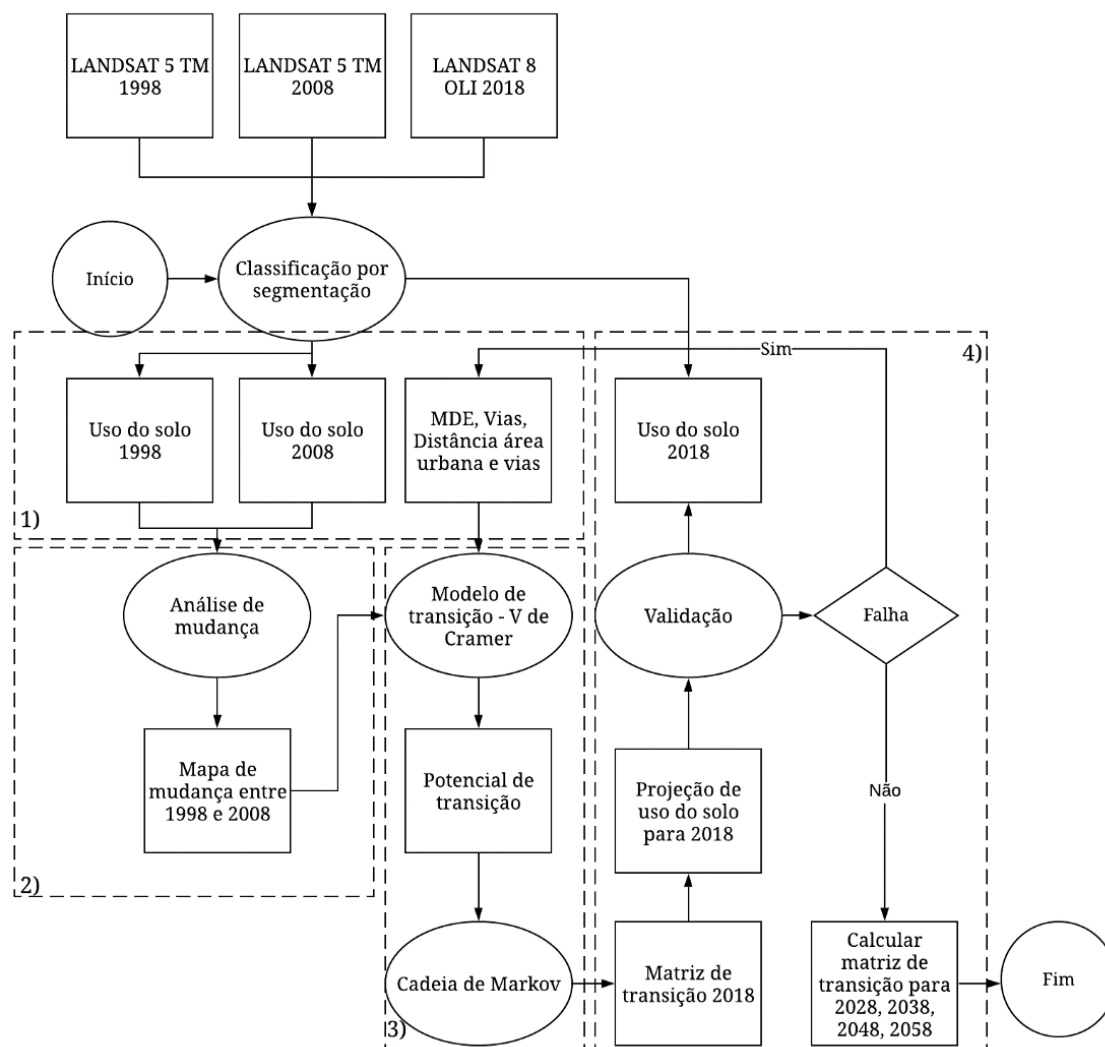
Os mapas de uso e ocupação do solo possuem como classes a área urbana, vegetação, solo exposto e água. Logo estes mapas são caracterizados como o conjunto de dados que foram submetidos aos procedimentos preliminares de modelagem, além de comporem a matriz de transição da Cadeia de Markov para a tabulação 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 3ª e 4ª 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 mostram 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 de 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:  $\chi^2$  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.

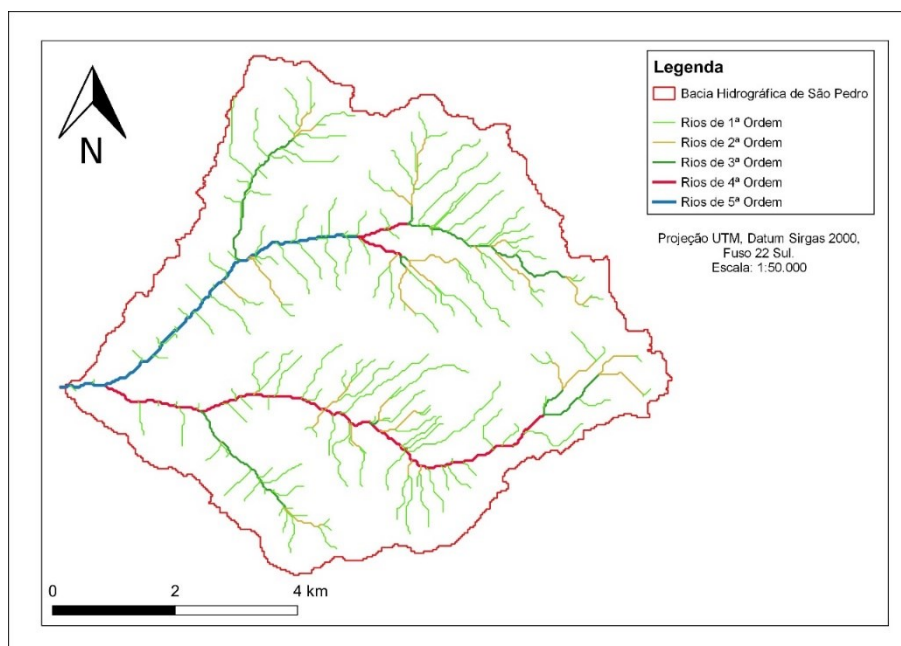
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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.

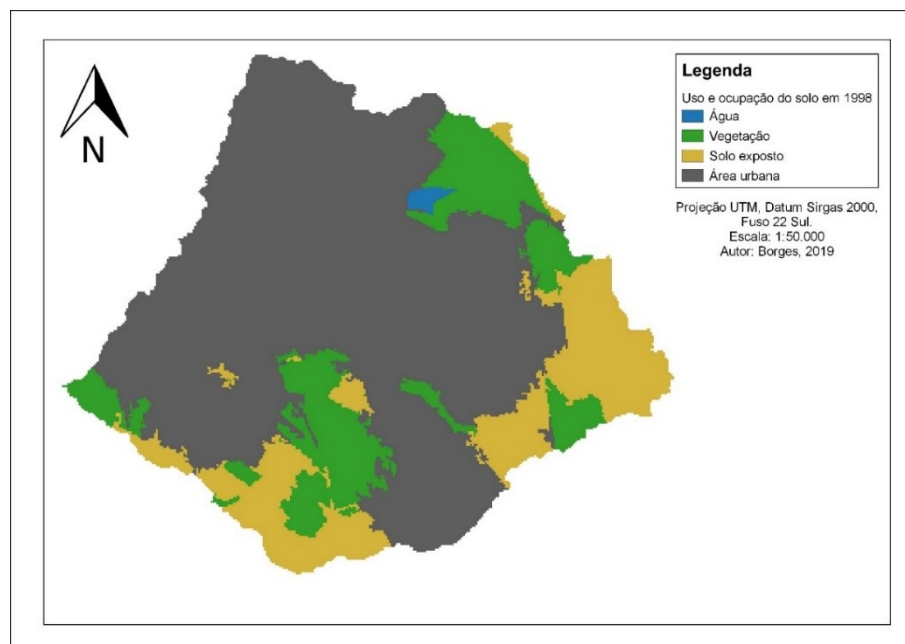


Fonte: O autor.

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.

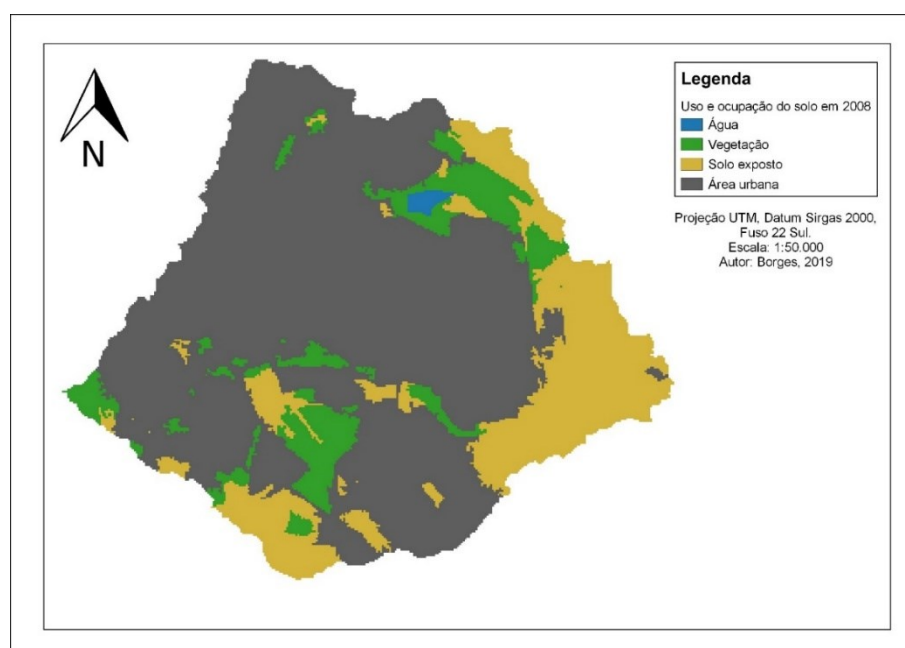
Com a obtenção da área de estudo a classificação por segmentação foi aplicada nos recortes das imagens que do sensoriamento remoto, para os anos de 1998, 2008, e 2018, resultando nas figuras 16, 17, e 18.

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



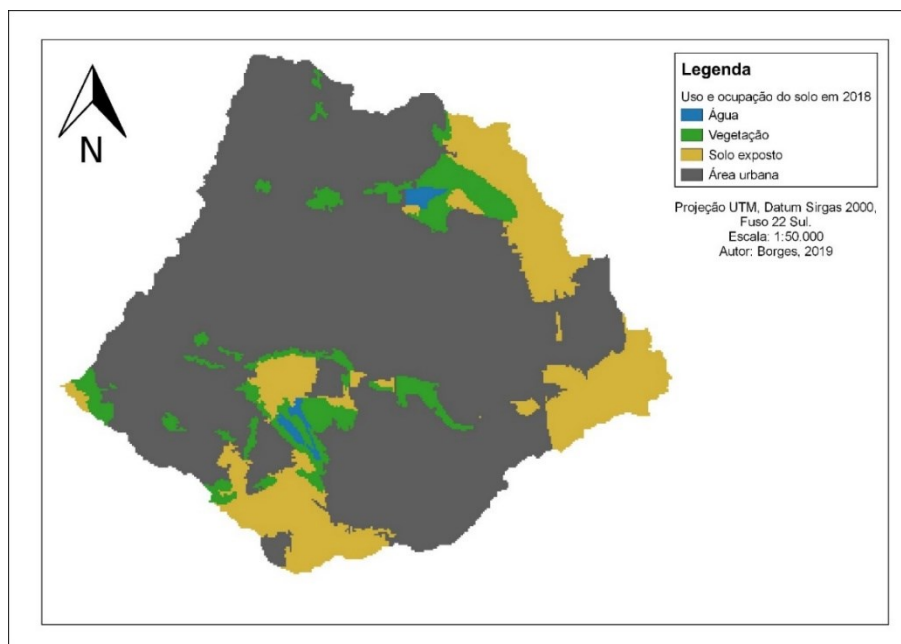
Fonte: O autor.

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.

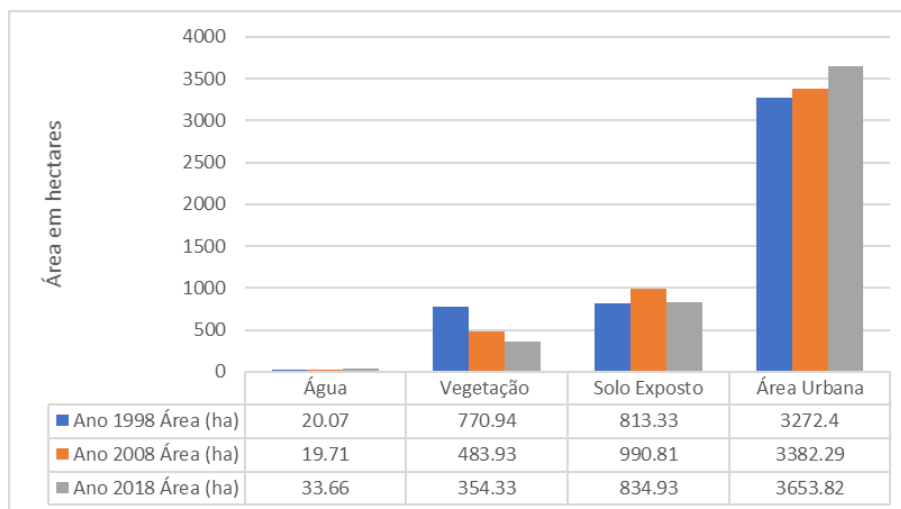


Fonte: O autor.

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.



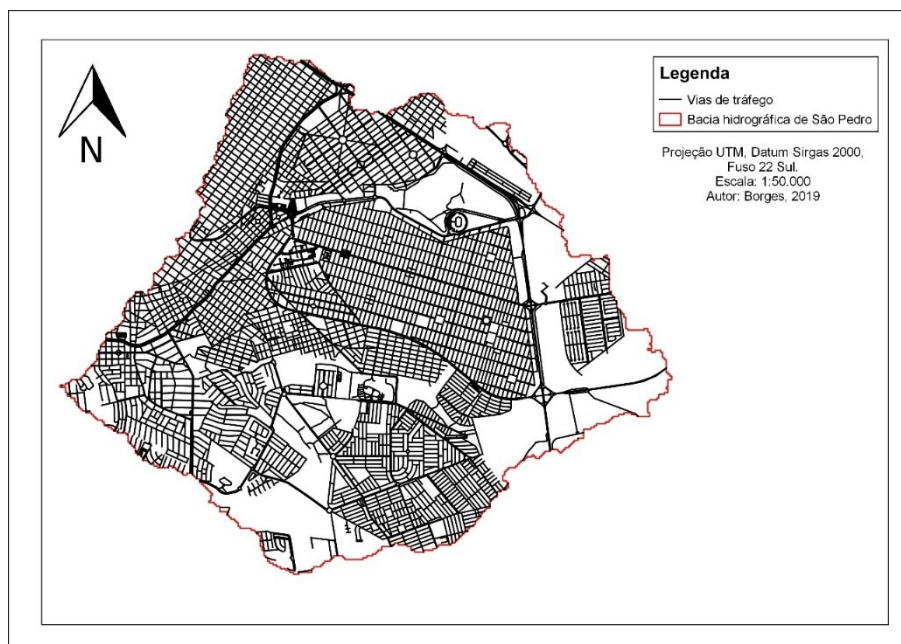
Fonte: O autor.

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.

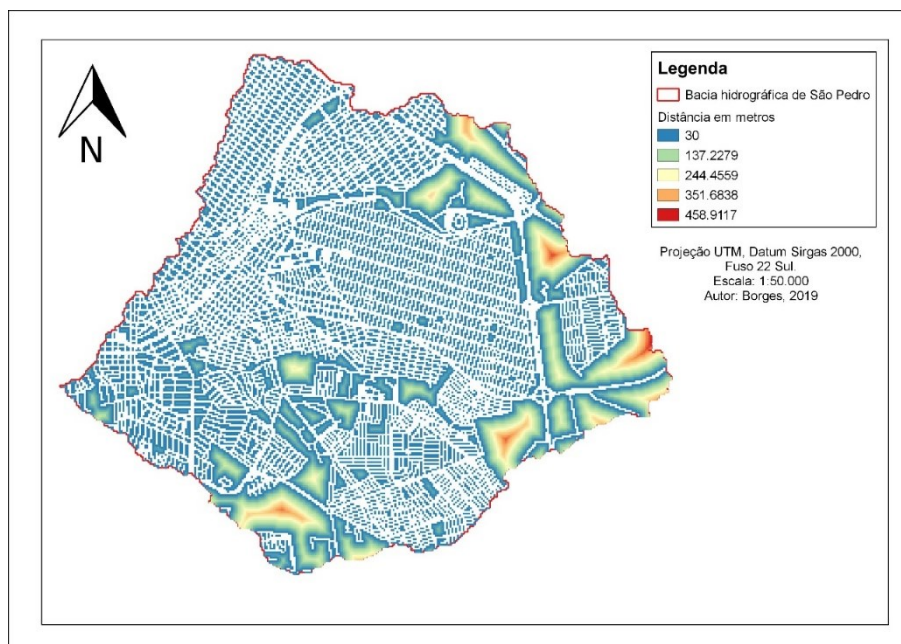
Figura 19 – Figura do mapa de vias da bacia do Córrego do São Pedro



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.

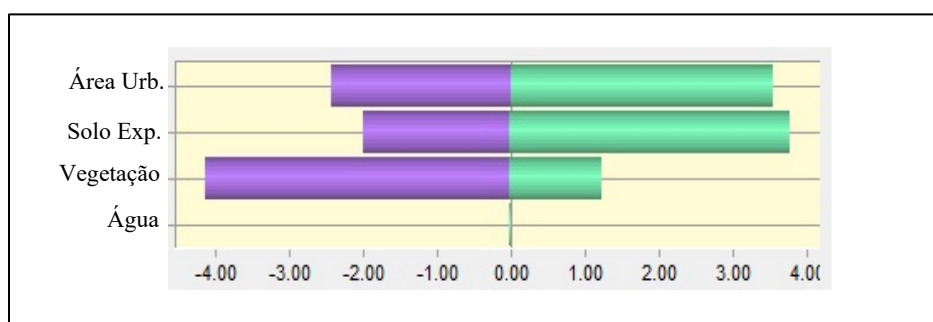
A aplicação da distância euclidiana nos mapas de vias (Figura 20) e de mancha urbana, entraram como variáveis na modelagem da mudança do uso do solo, além disso é possível se apoiar no resultado encontrado nestes para analisar o fenômeno da urbanização pela distância entre área de interesse. Avaliar 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 predição 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<sup>2</sup> de uso do solo entre estes anos conforme gráfico 2:

Gráfico 2 - Ganhos e perdas de áreas entre 1998 e 2008 em km<sup>2</sup>



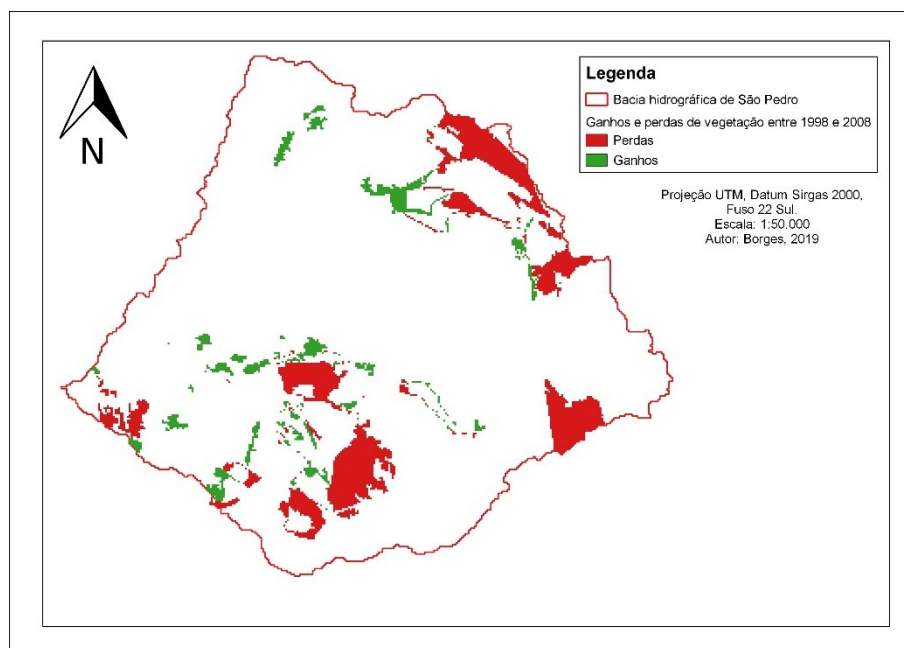
Fonte: O autor.

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<sup>2</sup> 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 água 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

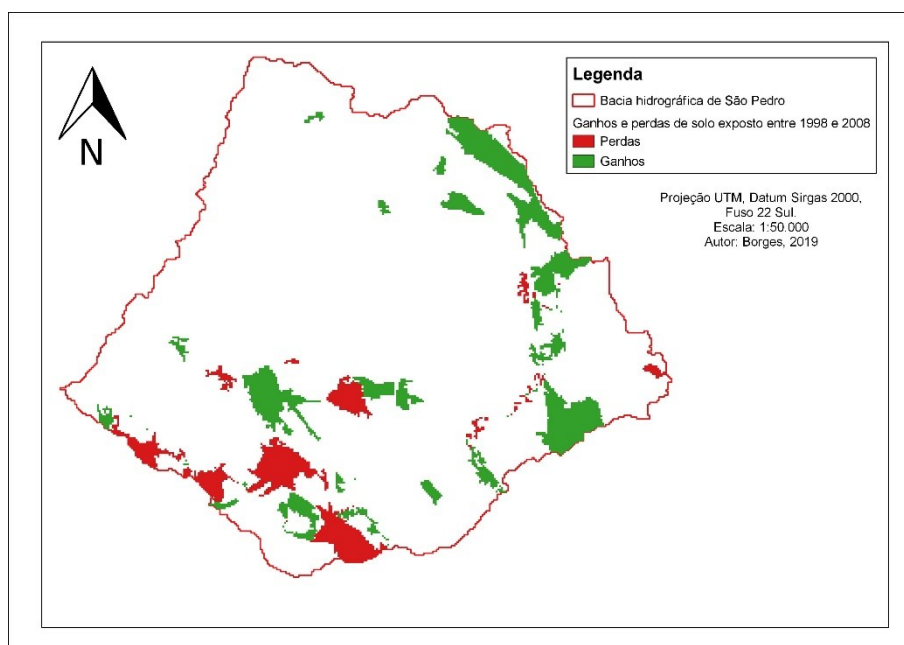
a necessidade de observar qual a tendência espacial de mudança destes tipos de uso do solo.

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.



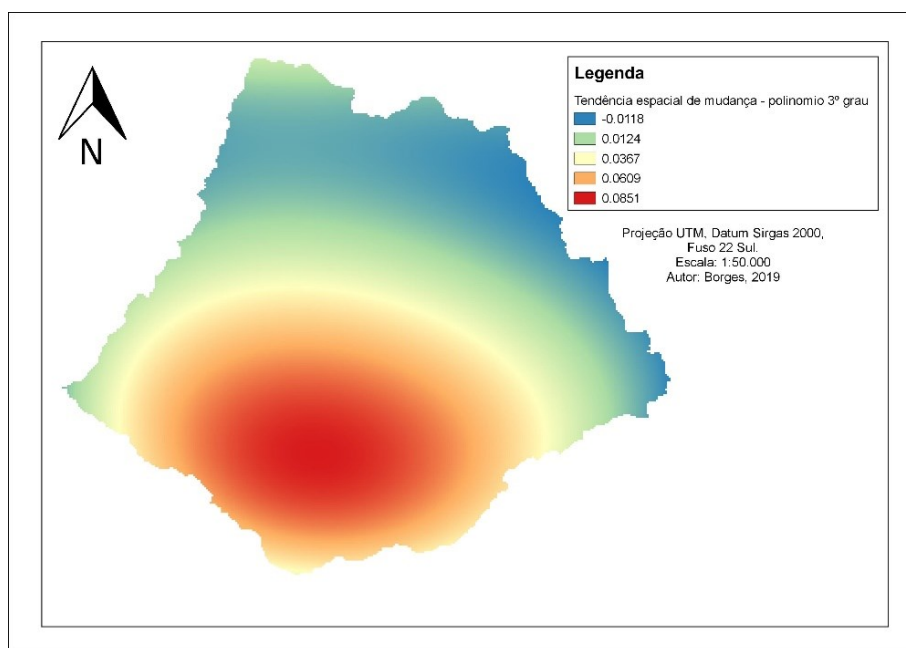
Fonte: O autor.



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.

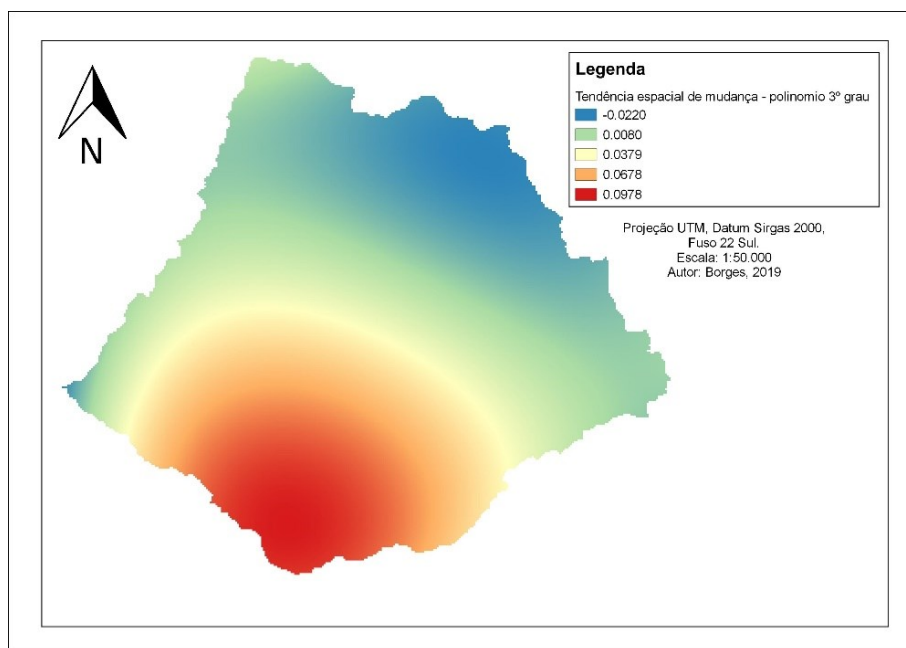
Primeiramente foi observado a tendência mapeada considerando o polinômio de 3º grau (Figuras 23, 24, 25), e observando a probabilidade de todas as classes de uso e ocupação se tornarem área urbana, e o mesmo foi observado considerando as áreas de solo exposto e a vegetação se tornarem área urbana. O 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.



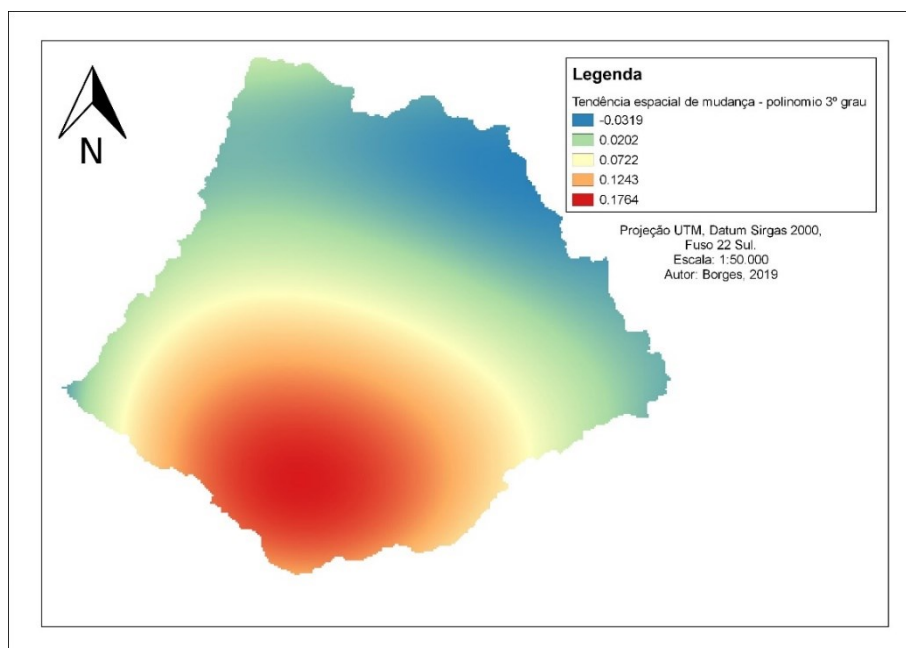
Fonte: O autor.

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



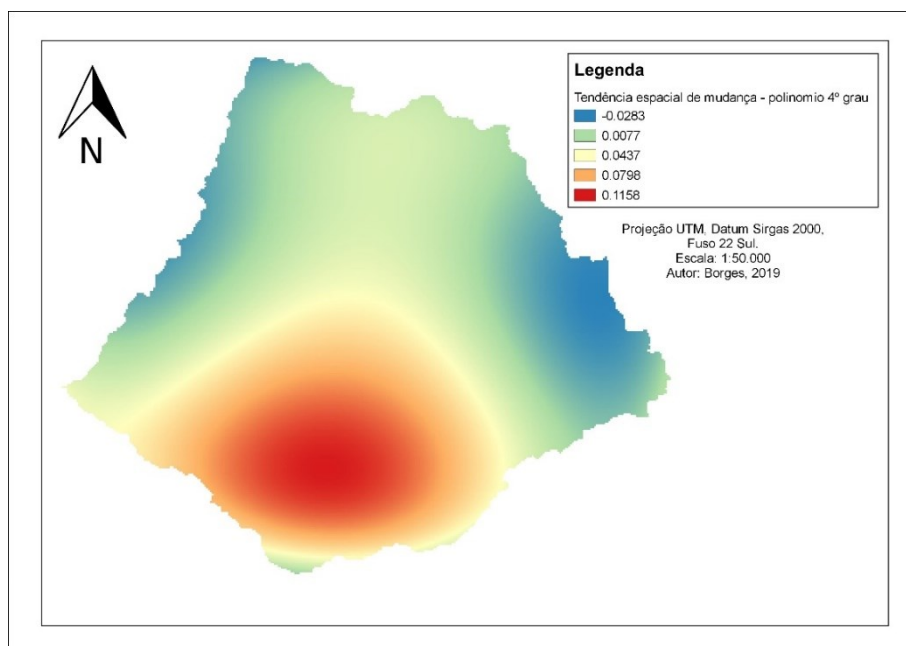
Fonte: O autor.

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



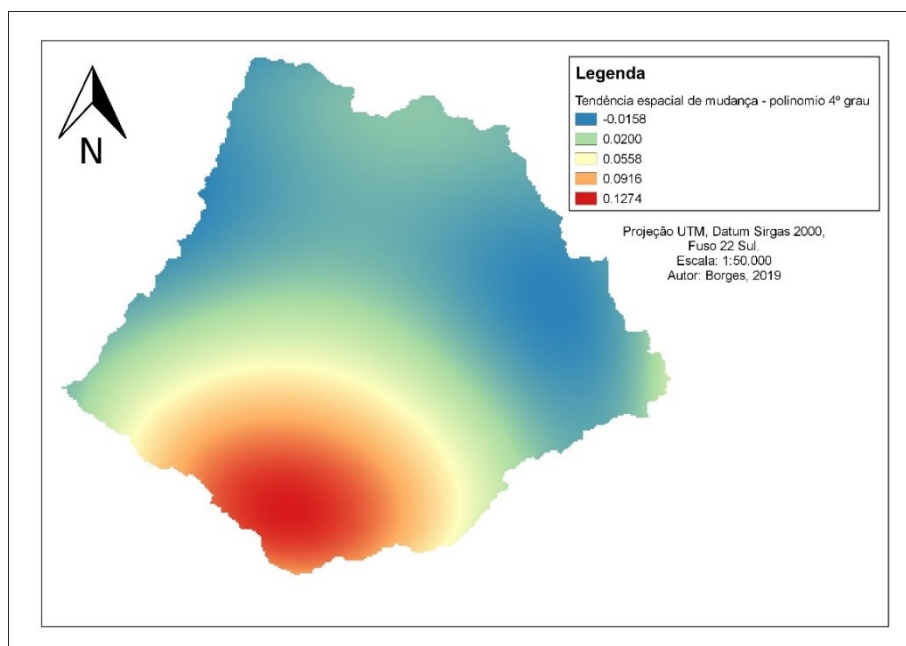
Fonte: O autor.

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



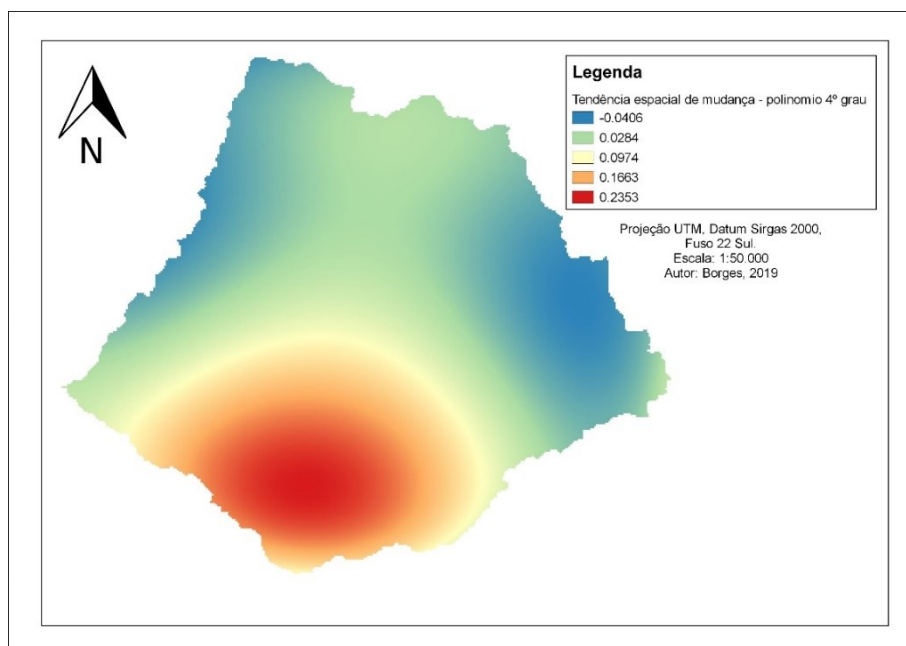
Fonte: O autor.

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 NEURAIAS

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 distancias 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 (*Multi-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

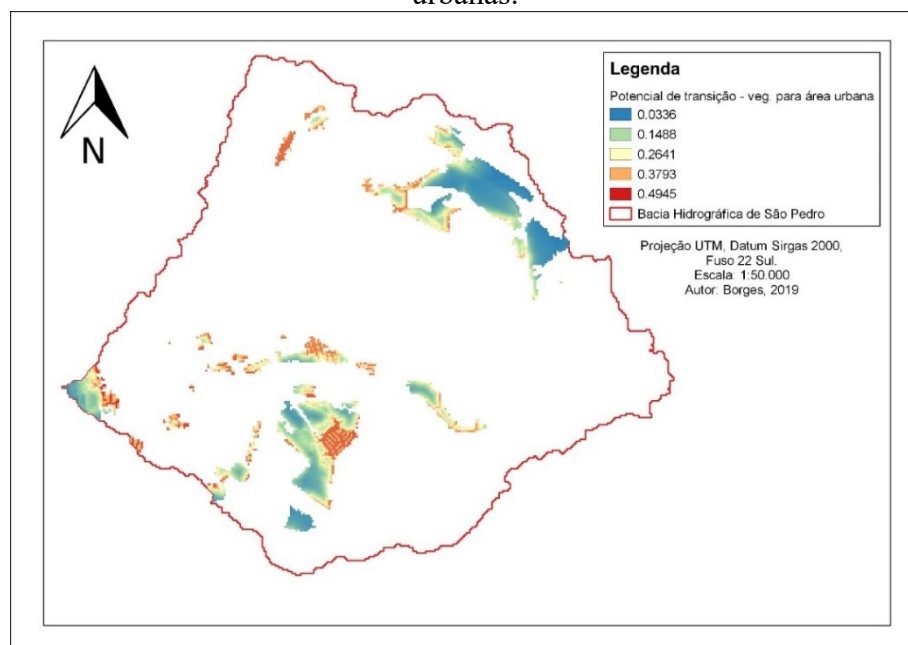
Fonte: O autor.

Observando as estatísticas da execução na tabela 6 nota-se primeiramente a taxa de precisão de 41,75%. Considerando-se o que foi comentando 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.

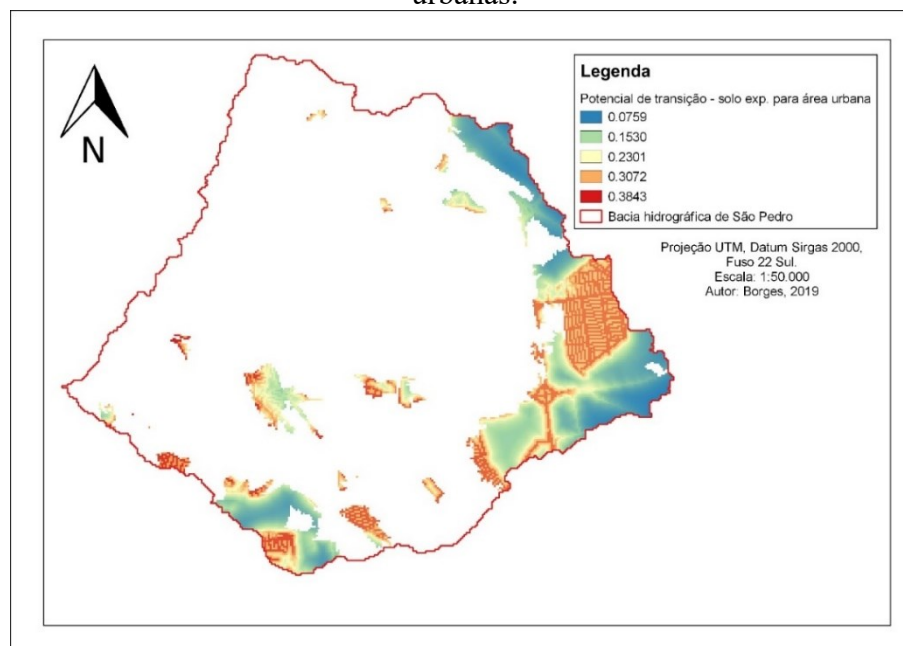
Como resultado, uma superfície de potencial de transição é gerada. Esta superfície permite a verificação das áreas com a maior probabilidade de mudança de vegetação para área urbana, e solo exposto para área urbana nas regiões com as cores em vermelho, conforme pode ser analisado nos mapas das figuras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

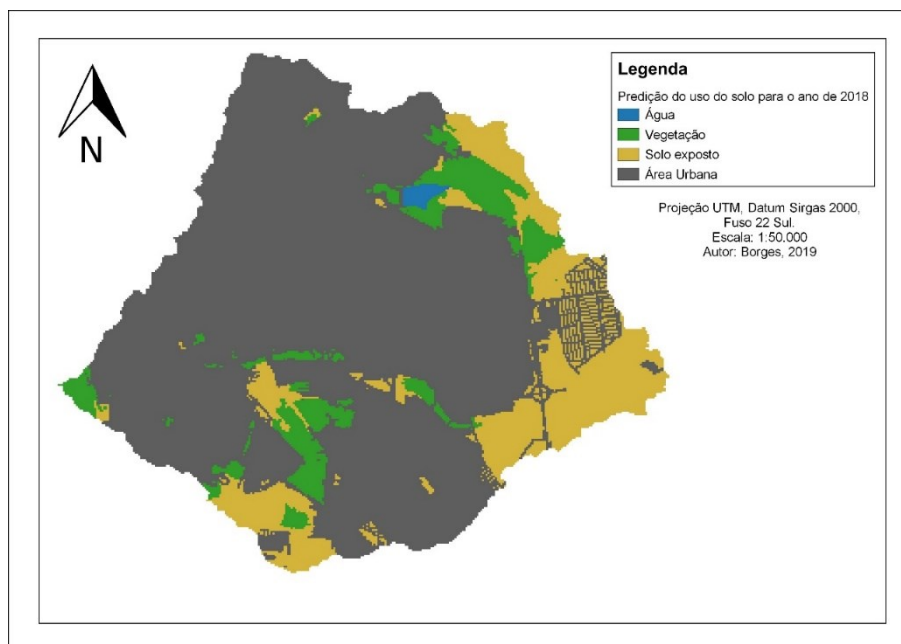
Observando as matrizes de transição da cadeia de Markov (Apêndice B), e analisando isoladamente, água, vegetação, solo exposto, e área urbana foi possível elaborar a tabela x acima de probabilidades. Sendo assim verifica-se que todas as classes têm o aumento de sua probabilidade de transição para urbana 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.

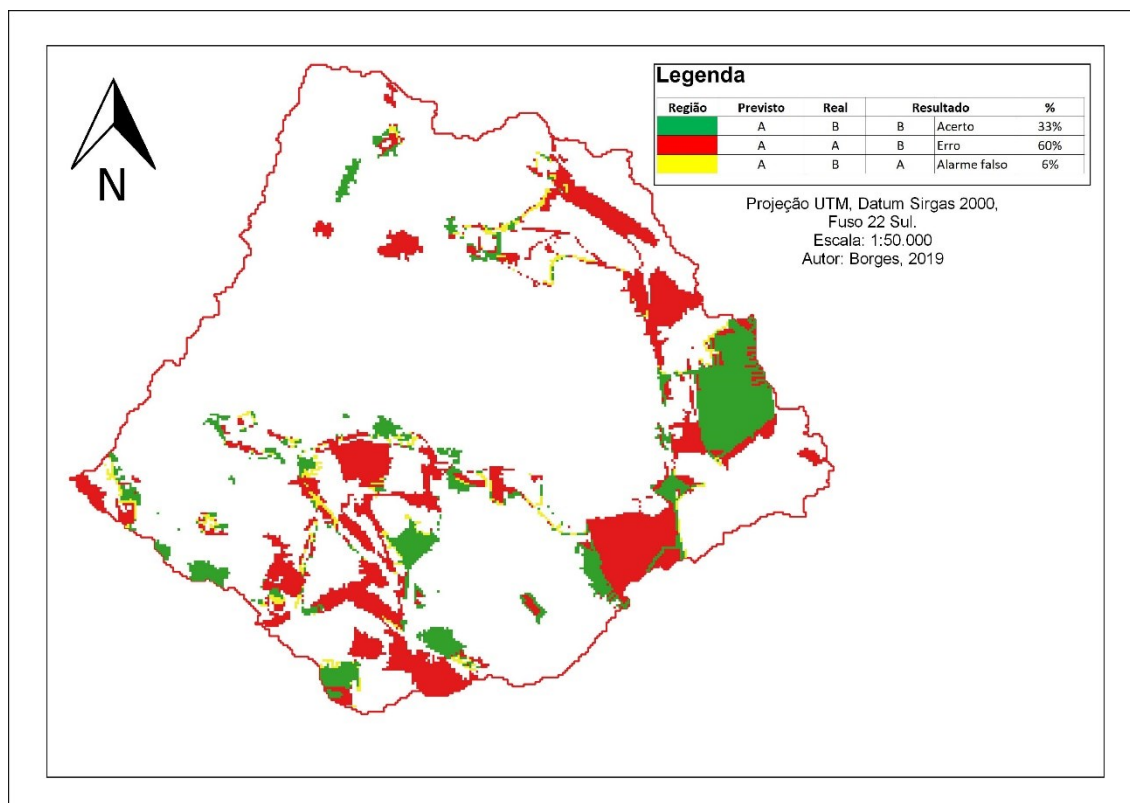


Fonte: O autor.

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 o 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.

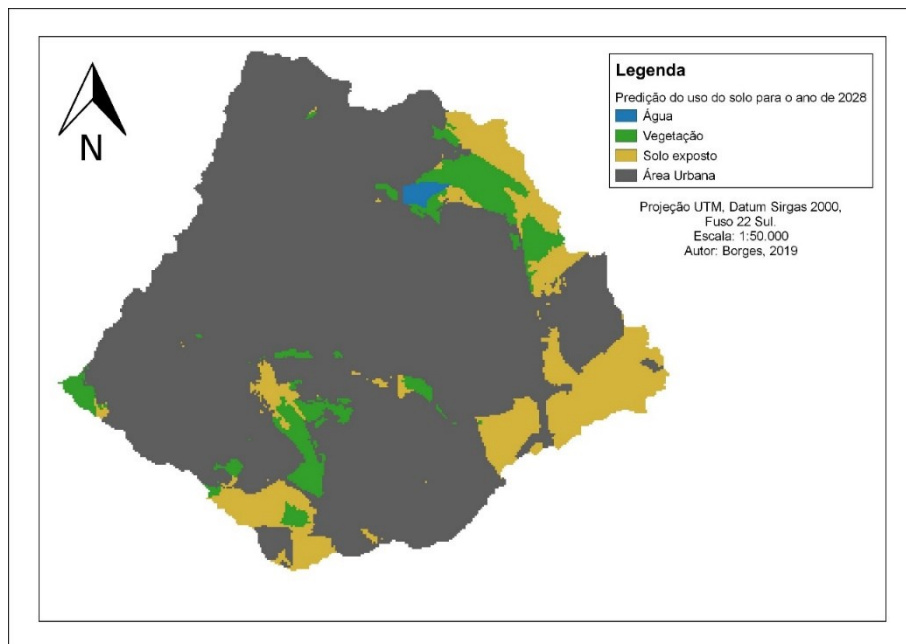
Ao analisar as áreas verdes da figura 32 verifica-se que o modelo acertou as regiões que mudaram de vegetação para solo exposto com base no mapa real de 2018 e solo exposto para área urbana vice-versa. A performance do modelo na validação espacial atingiu os respectivos valores, no quadro 4 acima. A 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 predição 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 predição e o real. A partir desta validação global foi possível dar procedimento aos passos seguintes do estudo.

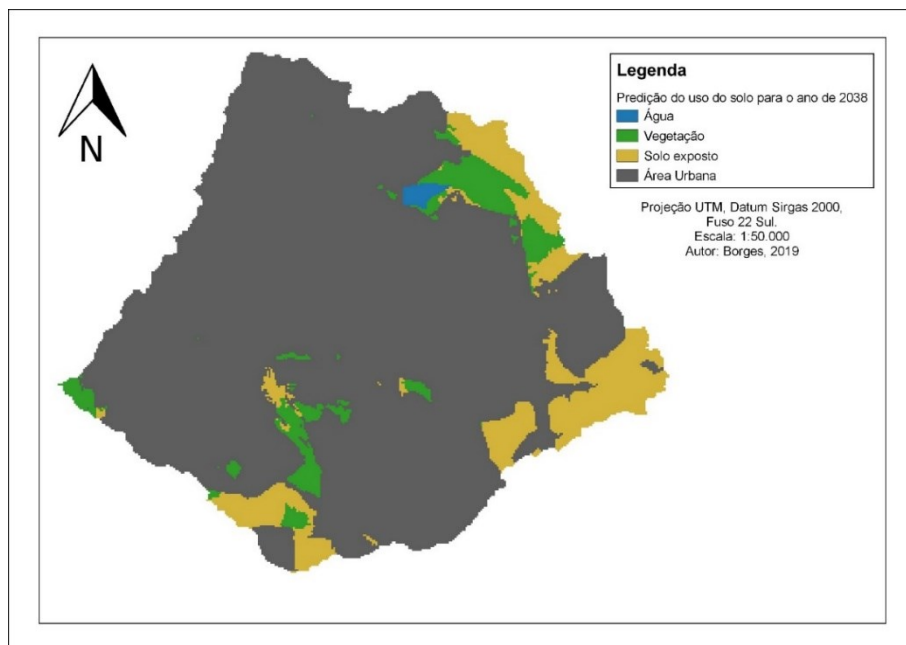
Desta forma, os mapas para os anos de 2028 (Figura 33), 2038 (Figura 34), 2048 (Figura 35) e 2058 (Figura 36) foram gerados e foi possível observar o comportamento da expansão do uso do solo na bacia hidrográfica de São Pedro e para que essa estimativa de uso do solo seja considerada em análises de alterações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

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



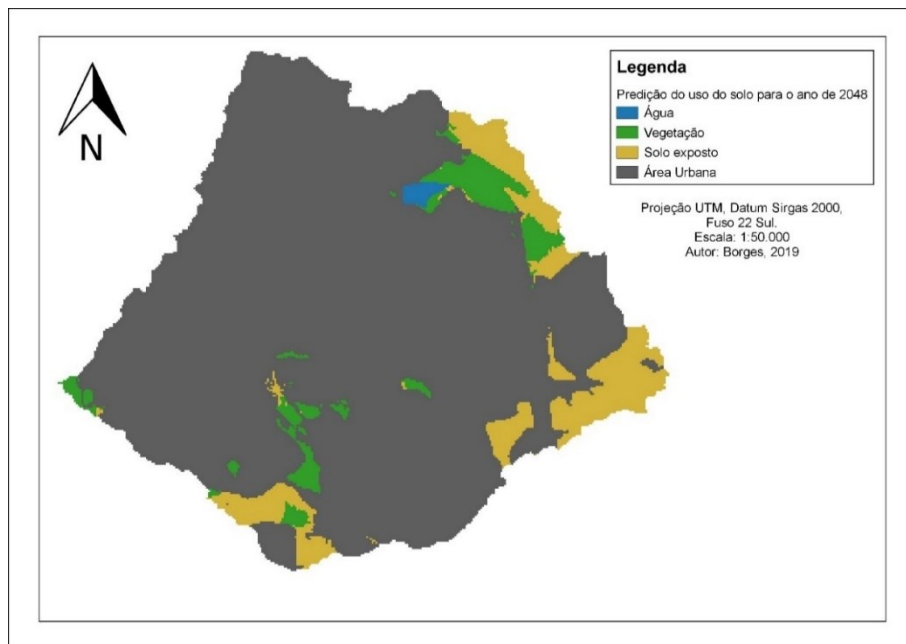
Fonte: O autor.

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



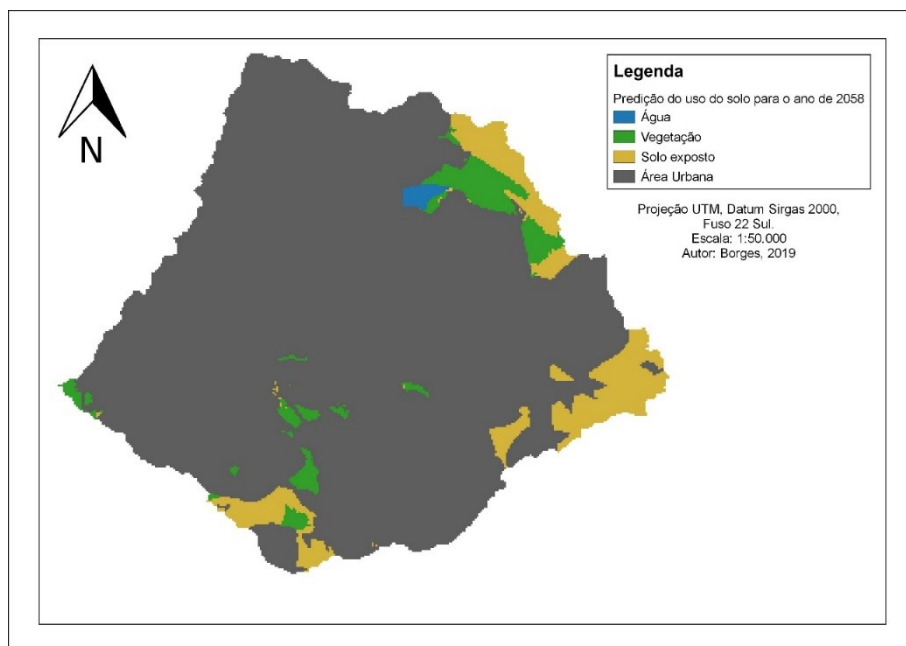
Fonte: O autor.

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

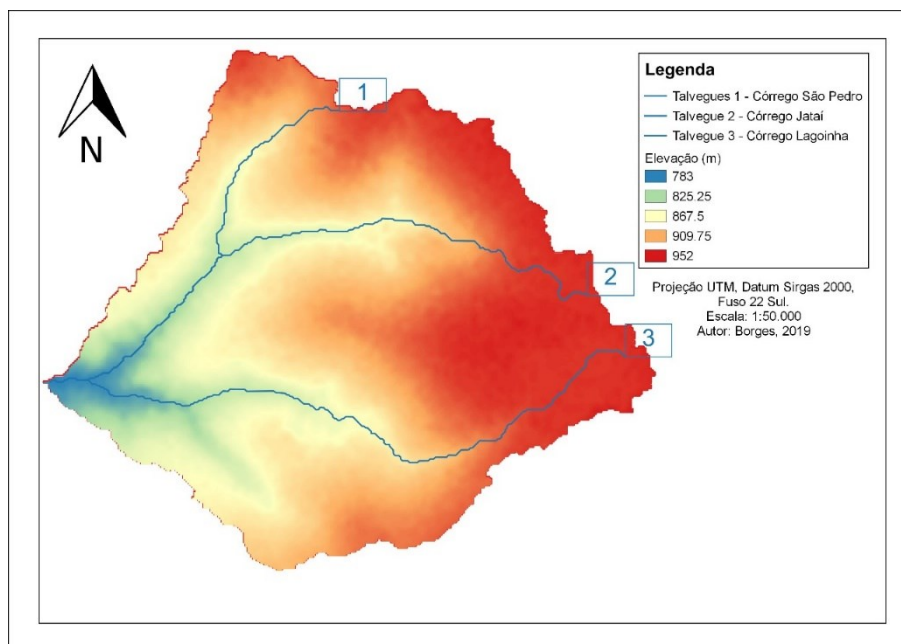
as regiões de crescimento os mapas levaram em conta as regiões com potencial de transição nos mapas das figuras 29 e 30. Observa-se a tendência de crescimento se concentra nas áreas a leste, sudeste, sul e centro da bacia hidrográfica de São Pedro. Vale ressaltar que o modelo não considerou como restrição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

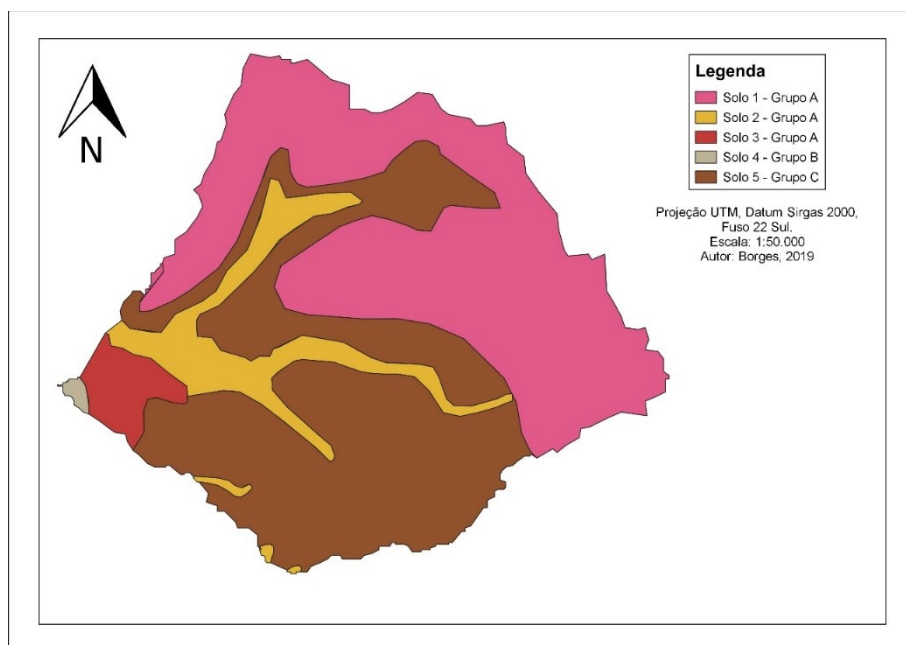
A declividade neste talvegue 3 foi calculada subtraindo o valor da elevação a montante pela jusante do talvegue sobre a distância total do trecho. O objetivo de quantificar essas informações é para serem consideradas no cálculo do tempo de concentração. Para o cálculo do tempo de concentração da bacia 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<sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> )	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

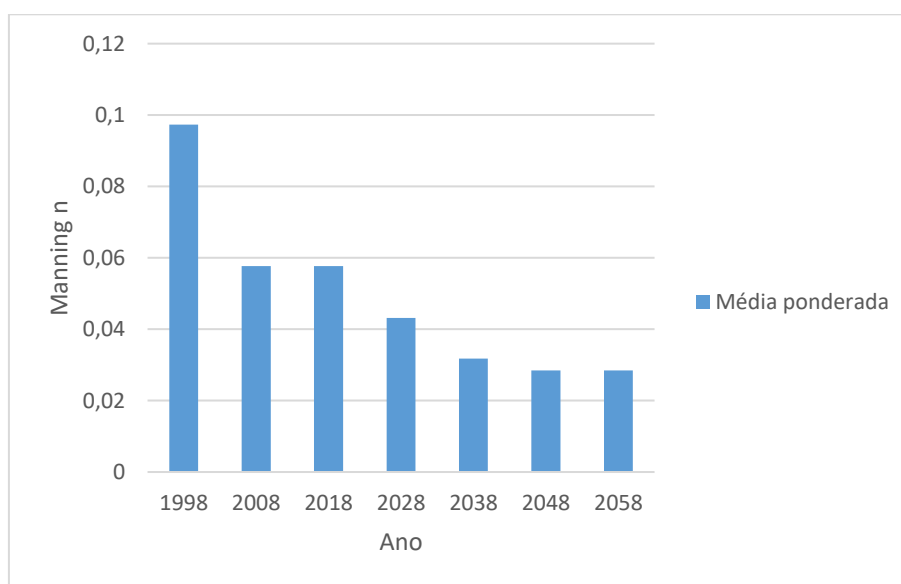
Ano	Média ponderada
1998	0,097311594
2008	0,057667844
2018	0,057667844
2028	0,043174023

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.



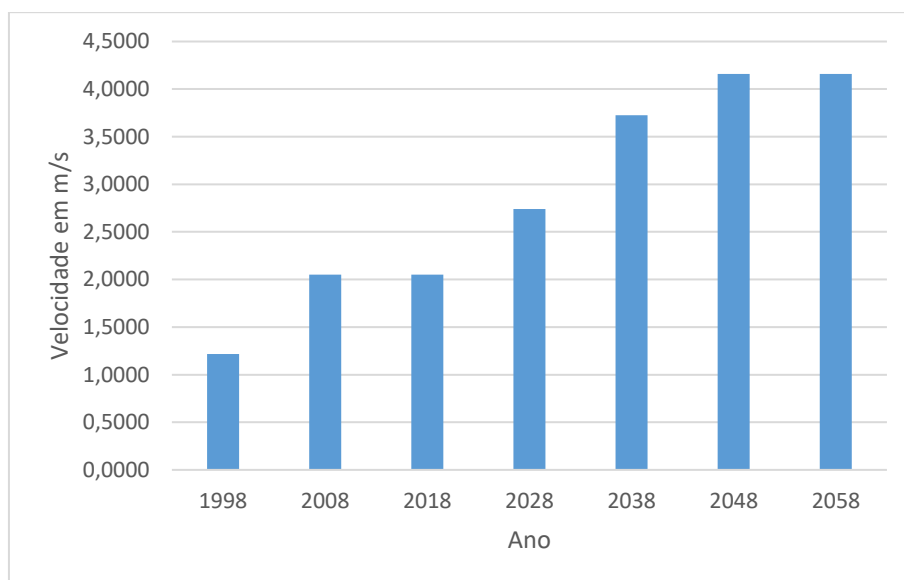
Fonte: O autor.

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:

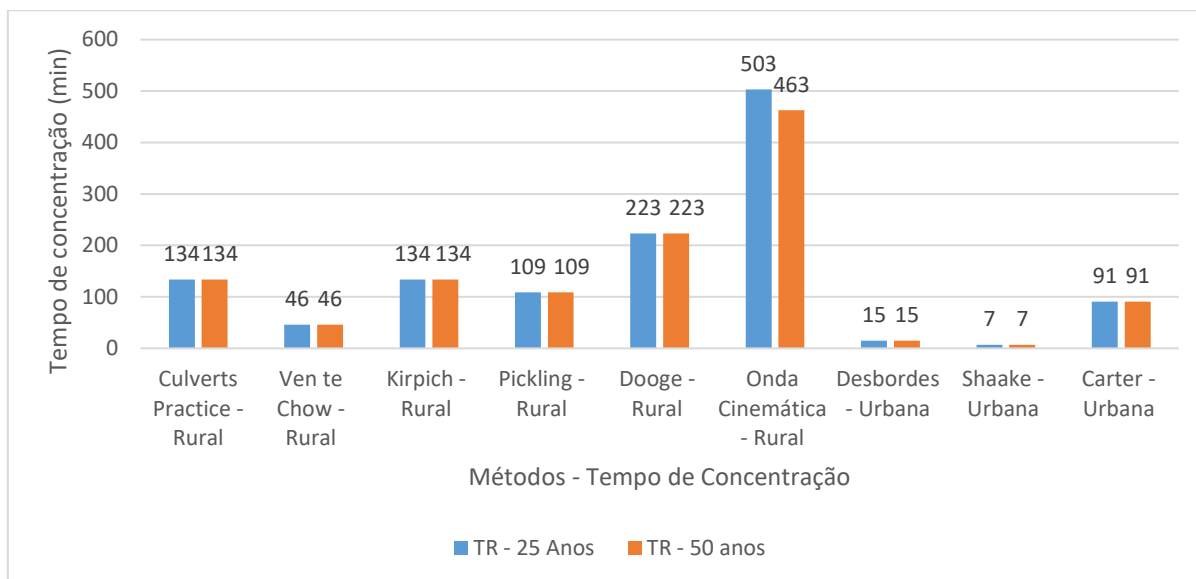
Quadro 5 - Tipos e portes de bacias hidrográficas para cálculo de  $t_c$ .

Autor	Área (km <sup>2</sup> )	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).

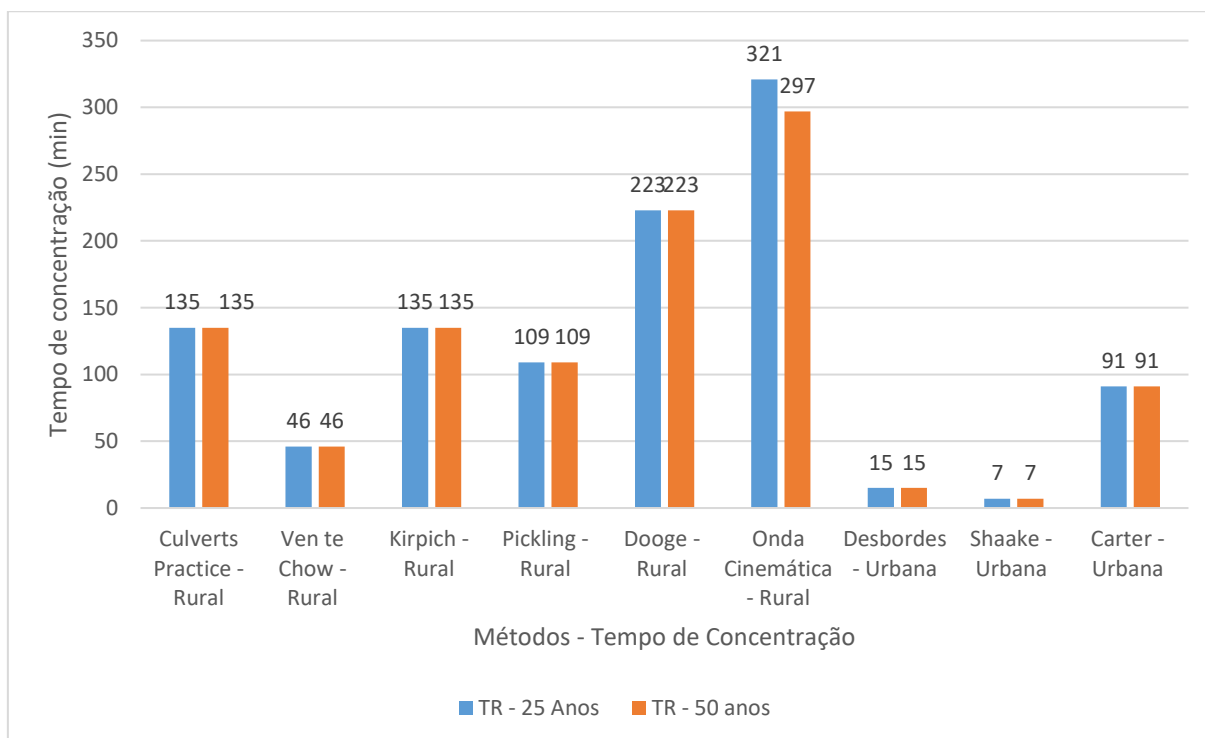
O quadro 5 foi desenvolvido conforme as informações apresentadas no trabalho de Silveira (2005), e o mesmo afirma que tais métodos ainda estão ausentes de informações importantes sobre as características das bacias além da dificuldade de acesso as publicações originais. Enfim observando os valores de 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 km<sup>2</sup>.

Gráfico 4 - Tempo de concentração para o ano de 1998



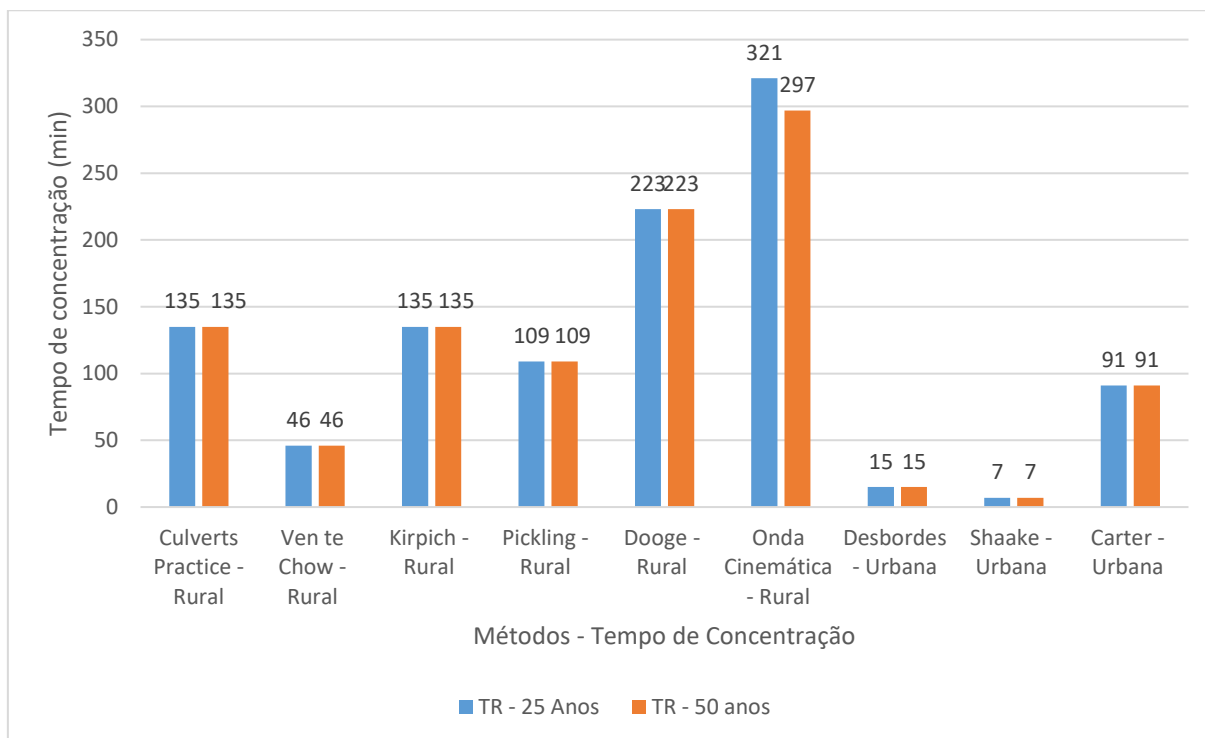
Fonte: O autor.

Gráfico 5 - Tempo de concentração para o ano de 2008



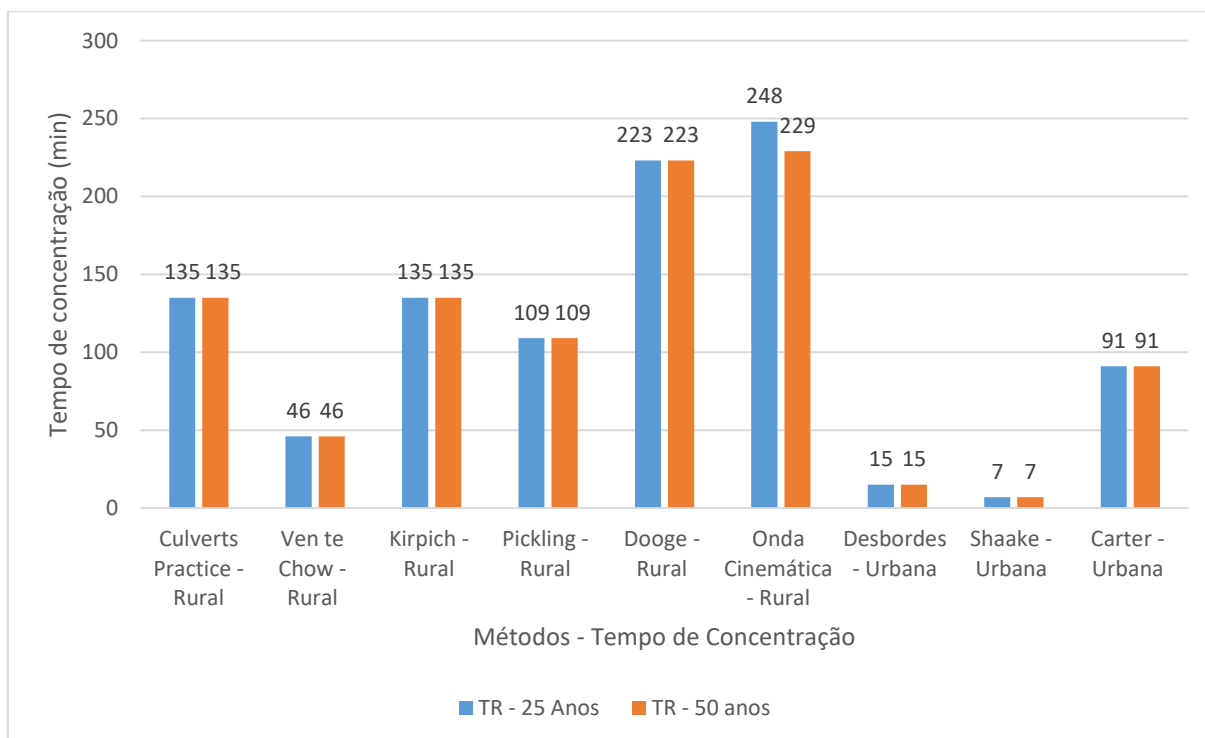
Fonte: O autor.

Gráfico 6 - Tempo de concentração para o ano de 2028



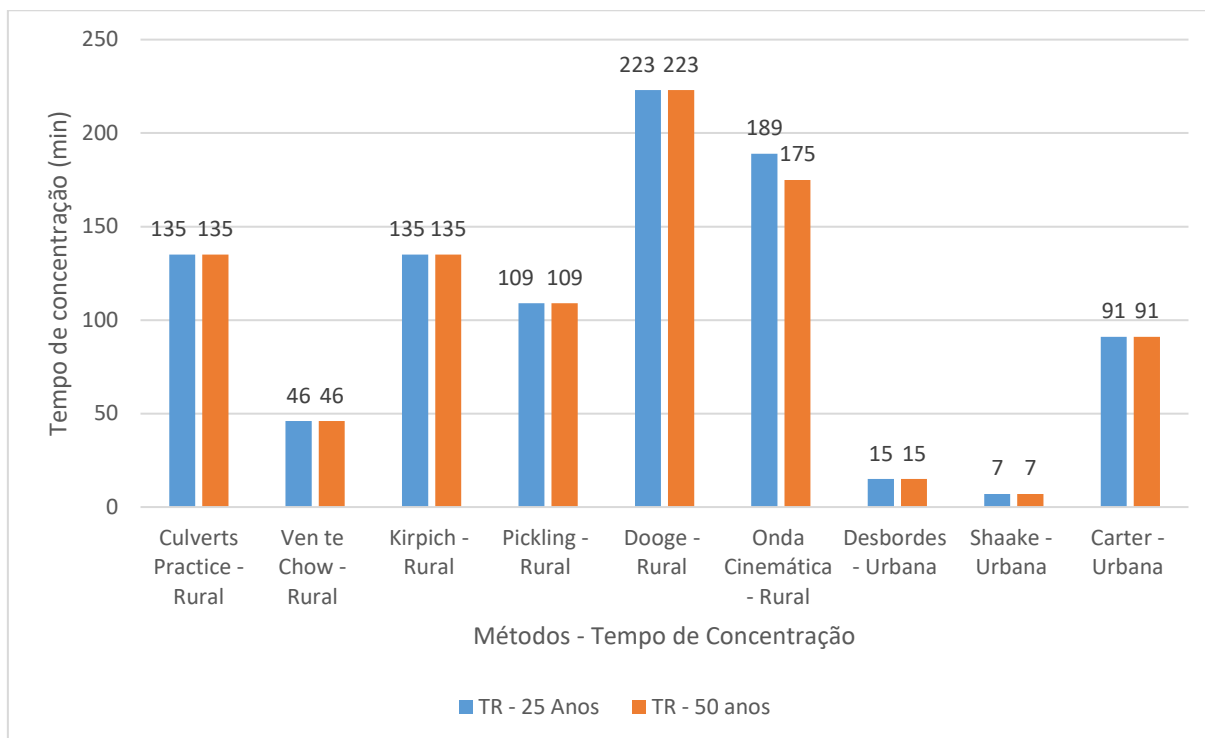
Fonte: O autor.

Gráfico 7 -Tempo de concentração para o ano de 2038



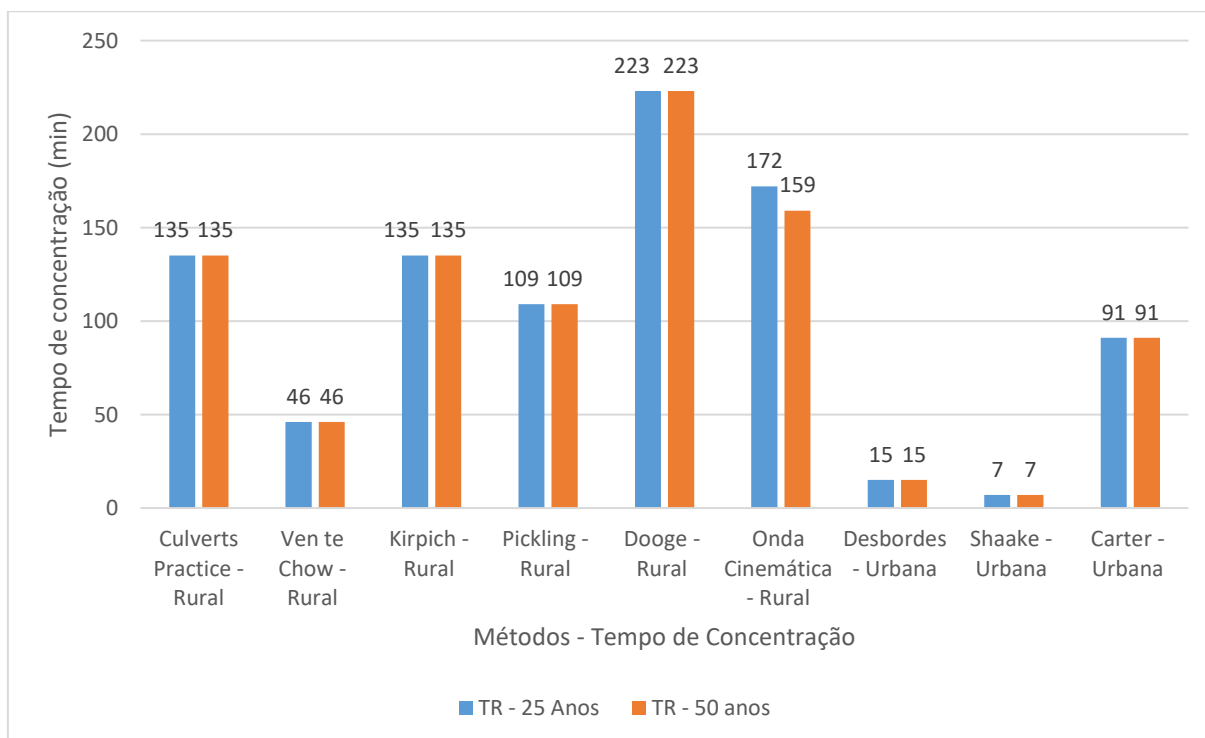
Fonte: O autor.

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):

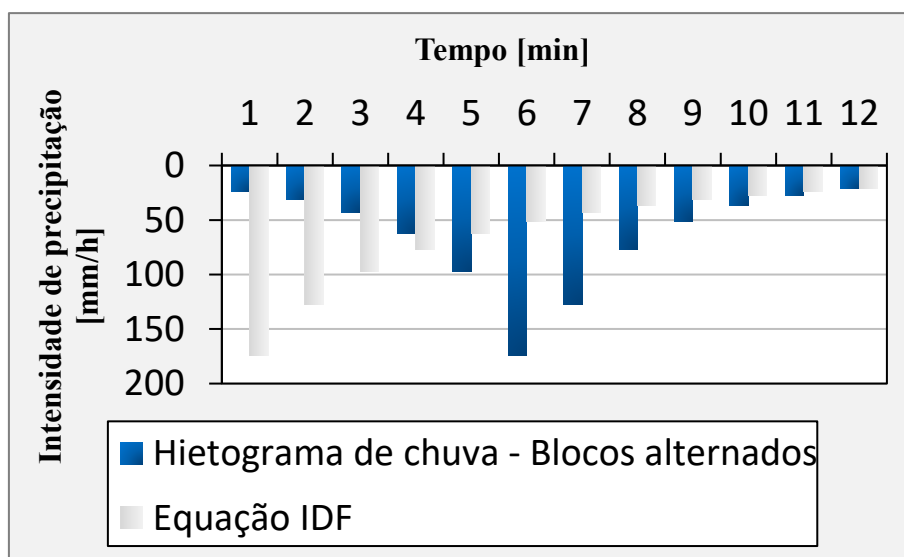
Tabela 11 - Memorial de cálculo para a determinação do hietograma por blocos alternados TR = 25.

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



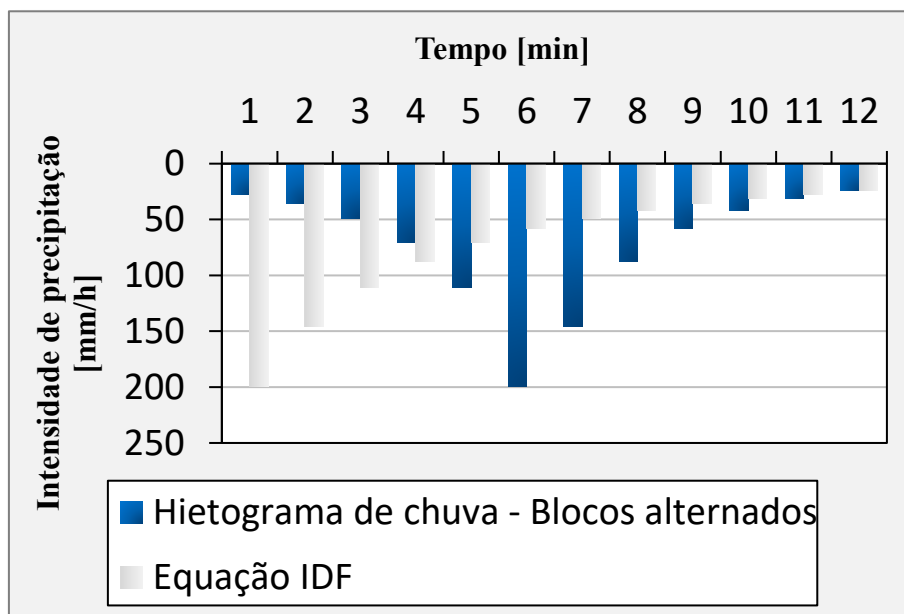
Fonte: O autor.

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

Passo	Alternado	td [min]	i [mm/h]	P = i.td [mm]	$\Delta P$ [mm]	$\Delta P / t$ [mm/h]	t [min]	i [mm/h]
1	11	10	199,2	33,2	33,2	199,2	10	27,4
2	9	20	172,4	57,5	24,3	145,5	20	35,9
3	7	30	151,9	76,0	18,5	111,0	30	48,9
4	5	40	135,8	90,5	14,6	87,4	40	70,6
5	3	50	122,8	102,3	11,8	70,6	50	111,0
6	1	60	112,0	112,0	9,7	58,3	60	199,2
7	2	70	103,0	120,2	8,2	48,9	70	145,5
8	4	80	95,3	127,1	6,9	41,6	80	87,4
9	6	90	88,7	133,1	6,0	35,9	90	58,3
10	8	100	83,0	138,3	5,2	31,2	100	41,6
11	10	110	77,9	142,8	4,6	27,4	110	31,2
12	12	120	73,4	146,9	4,0	24,3	120	24,3

Fonte: O autor.

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



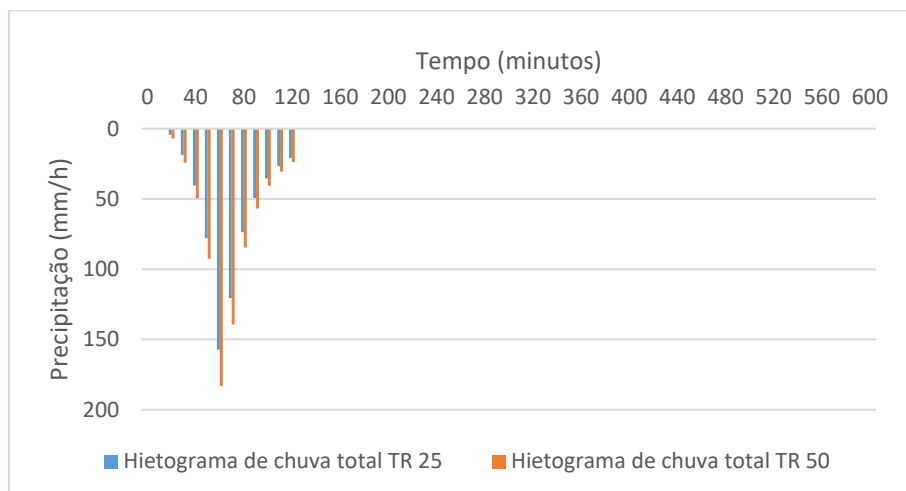
Fonte: O autor.

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.

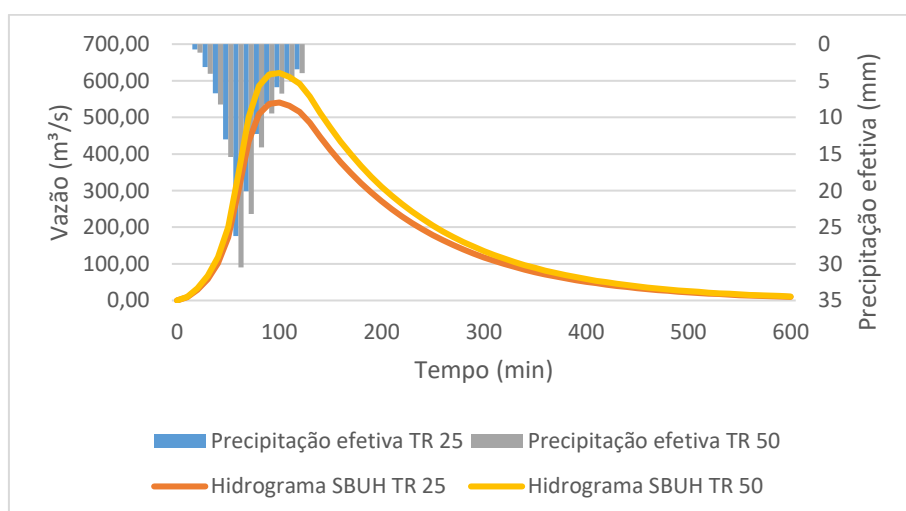
Sendo assim estes hietogramas (Gráfico 11 e 12) são os dados de entrada tanto para a elaboração do hietograma de chuva total (Gráfico 12) para cada um dos anos bem como para o hidrograma de projeto pelo método Santa Bárbara (Gráficos 13, 14, 15, 16, 17, 18, e 19) que estima a vazão no exutório da bacia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

Gráfico 11 - Hietograma de chuva total de projeto.



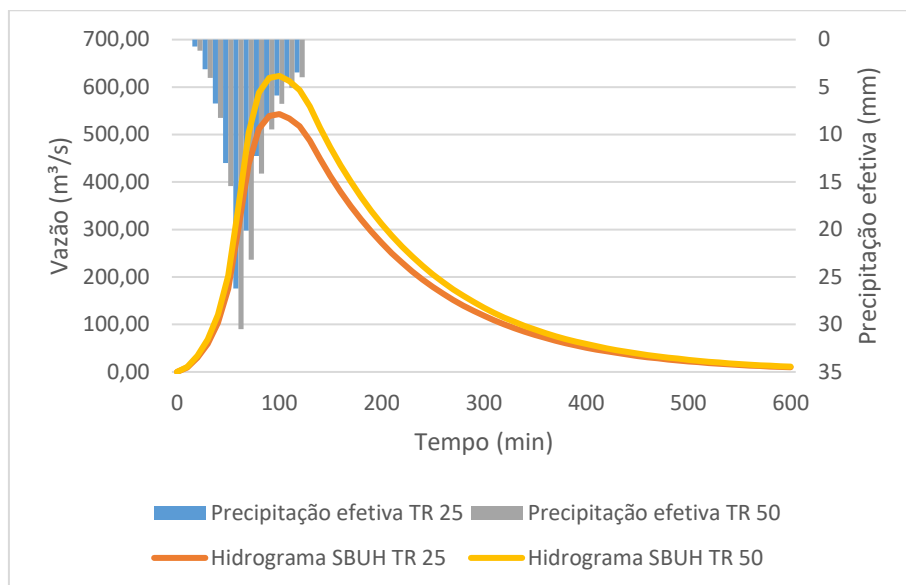
Fonte: O autor.

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



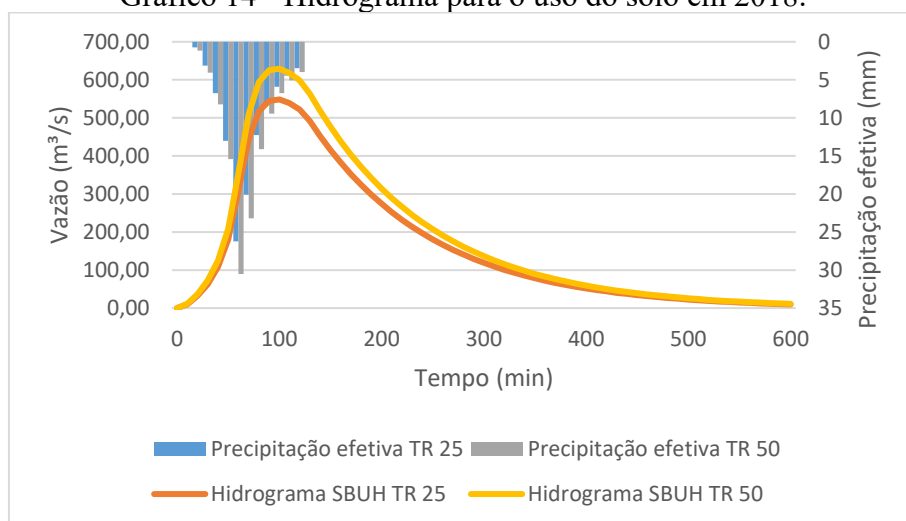
Fonte: O autor.

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



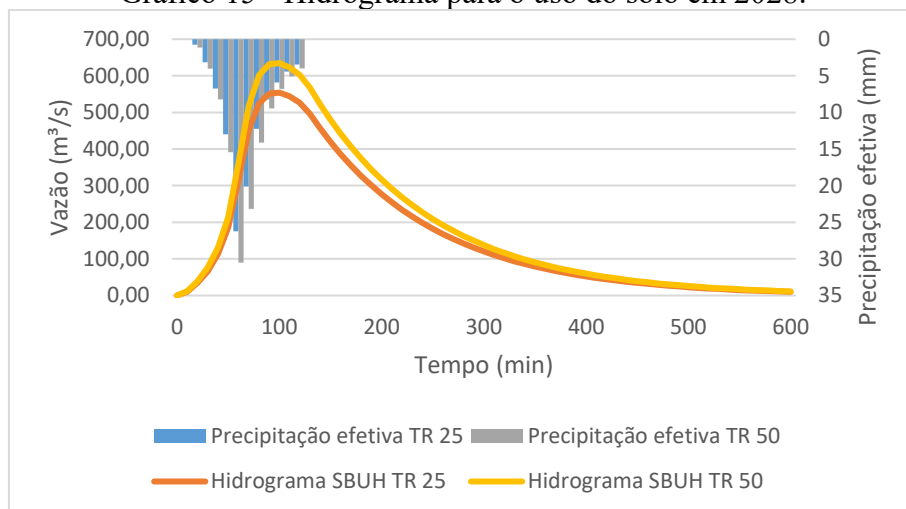
Fonte: O autor.

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



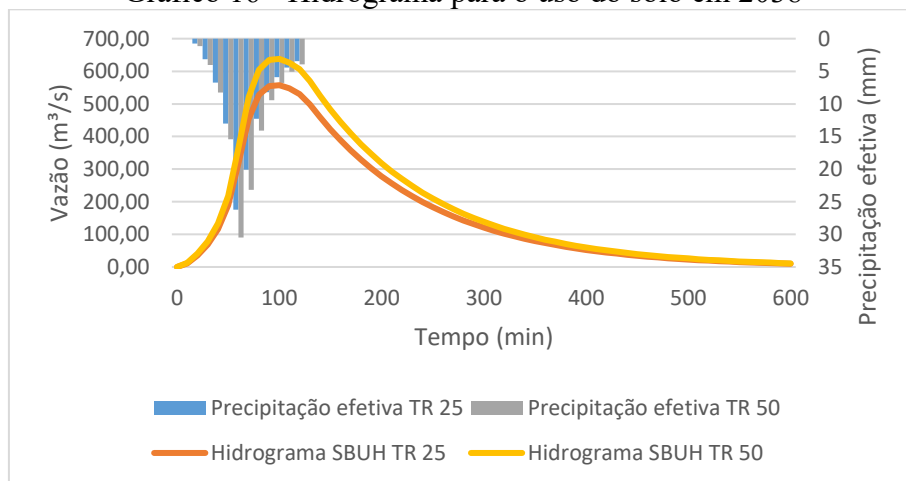
Fonte: O autor.

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



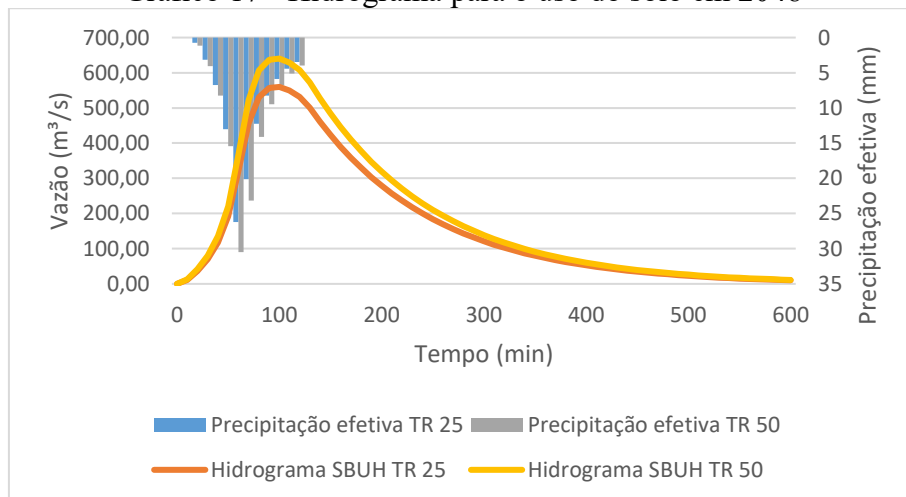
Fonte: O autor.

Gráfico 16 - Hidrograma para o uso do solo em 2038



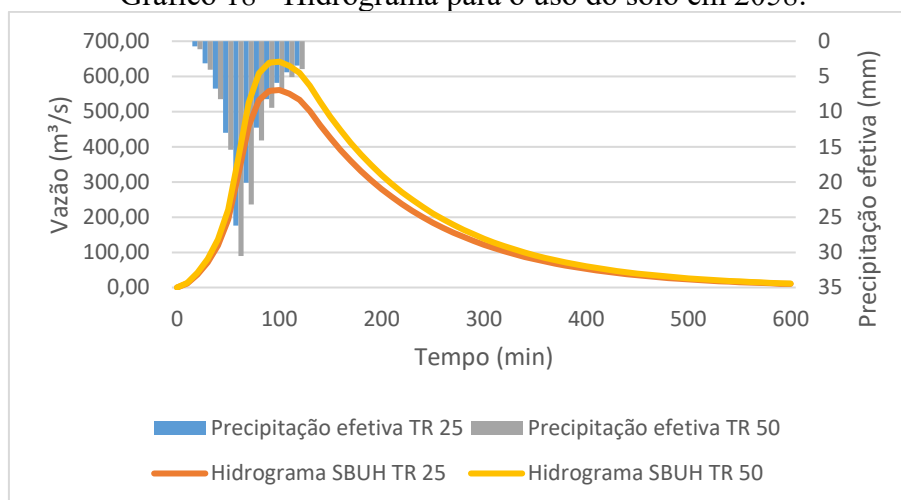
Fonte: O autor.

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 a 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 (m³/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.

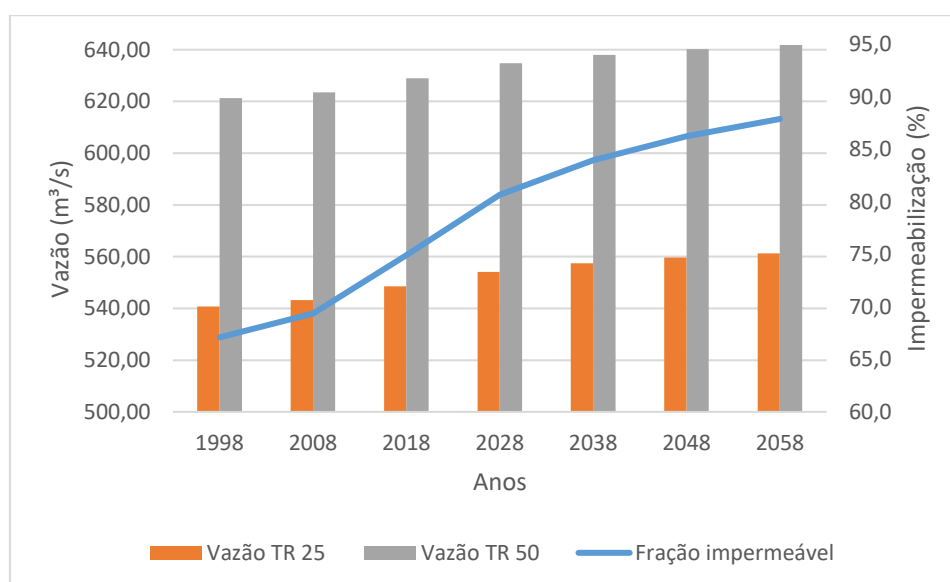
Desta forma com o passar dos anos a predição obtida pela Cadeia de Markov determinou a áreas de expansão da área urbana na bacia de São Pedro, e o aumento da vazão decorrente deste processo. É importante atentar sobre o seguinte fato, a escolha de um cenário urbano para 2058 mostra que a vazão de pico 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 <sup>3</sup> /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 pôde 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<sup>2</sup> 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<sup>3</sup>/s considerando um tempo de retorno de 25 anos, e 621,28 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/s para o tempo de retorno de 25 anos, e 2,23 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/s, e 5,50 m<sup>2</sup>/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 m<sup>3</sup>/s para um tempo de retorno de 25 anos e 641,85 m<sup>3</sup>/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](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](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 emergy 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 CLASSES 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](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, 5ª 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 Triângulo 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. **Previendo 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.ijlsbe.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. et 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/reg.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, Maracá 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 Geomorfológica da Bacia Hidrográfica 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>

SIDDIQUI, A. et al. 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** 1ª 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.

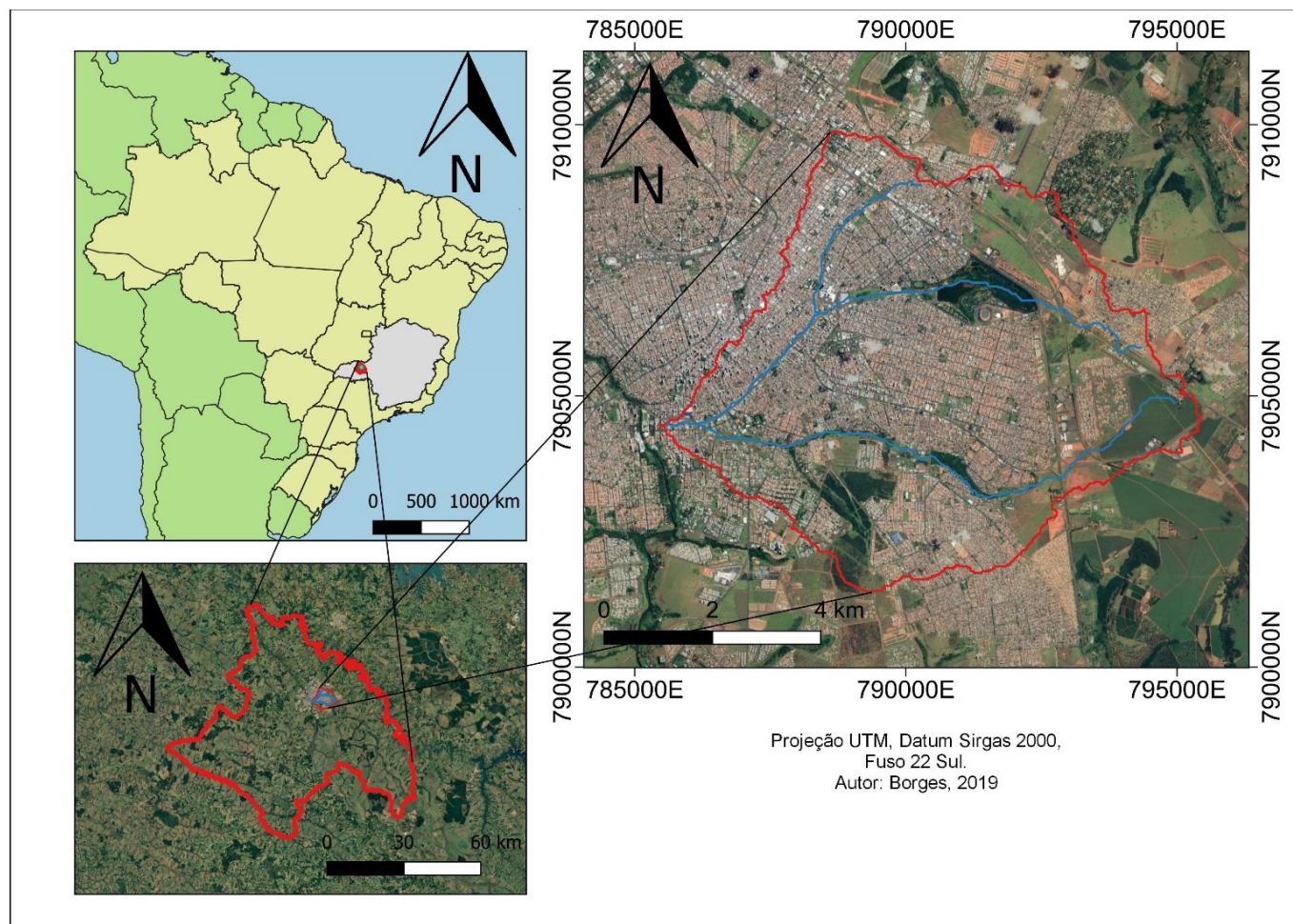
<https://doi.org/10.1007/s002670010258>

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>

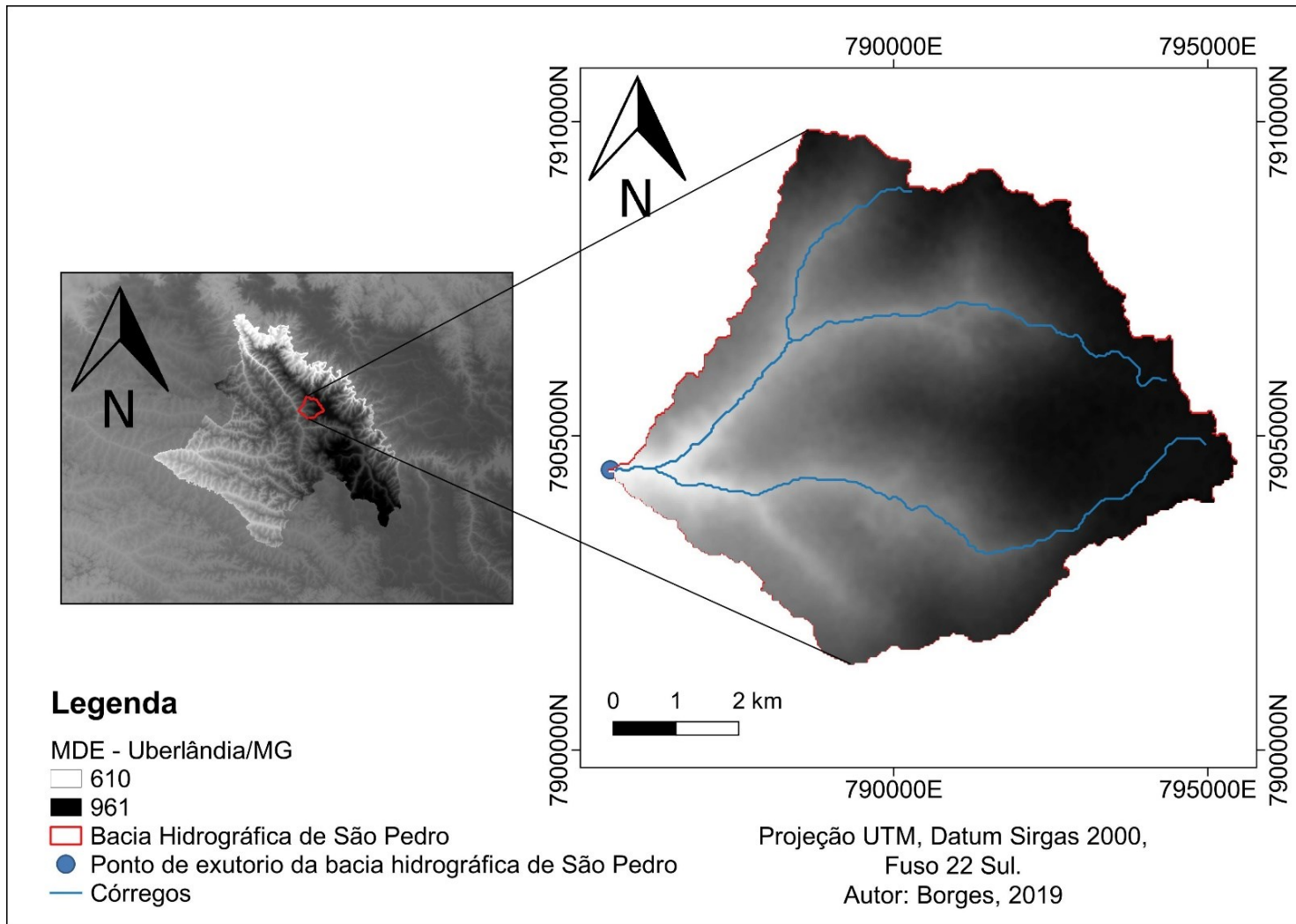
## APÊNDICE A – MAPAS

Mapa da localização da área de estudo em Uberlândia - MG

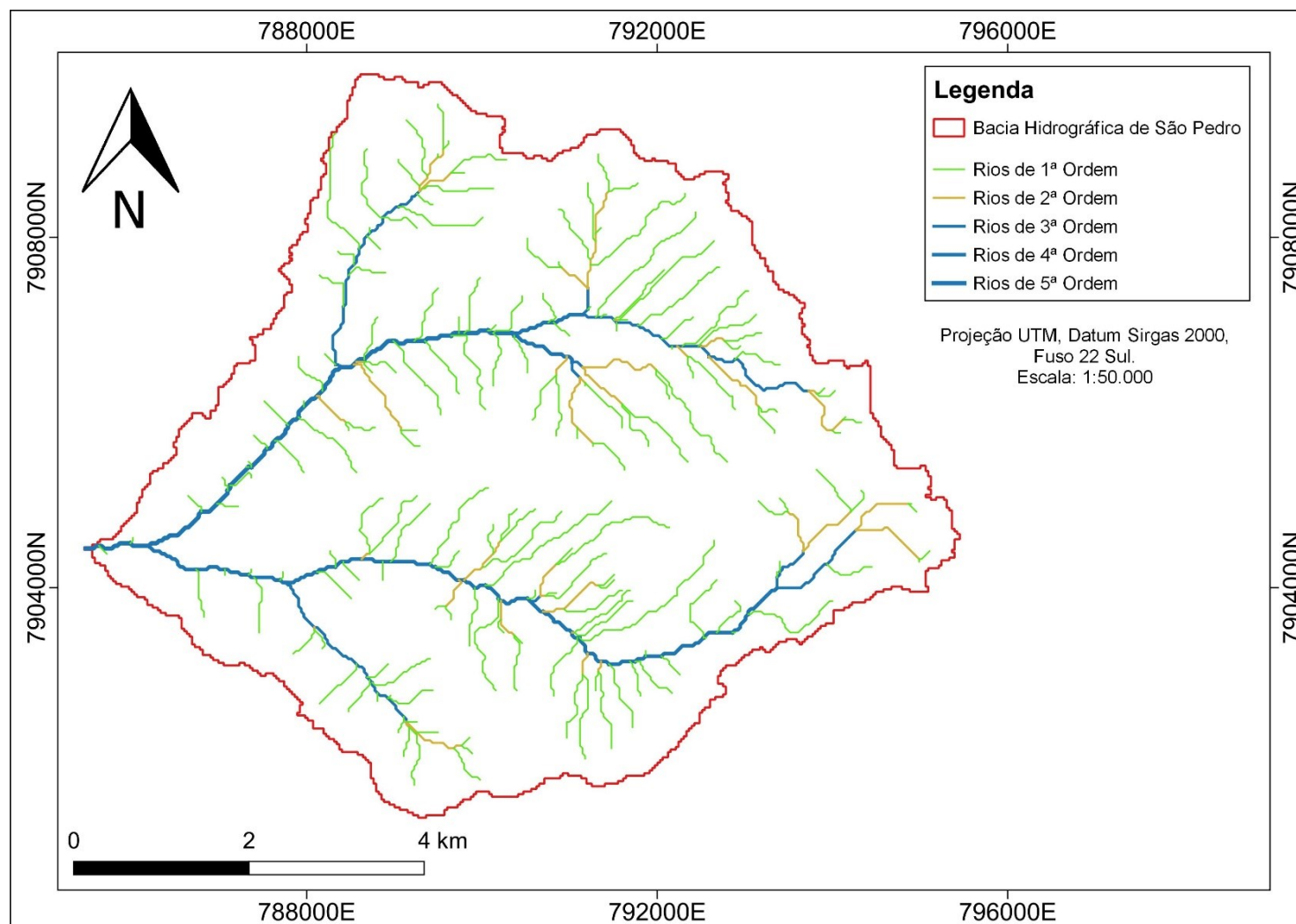




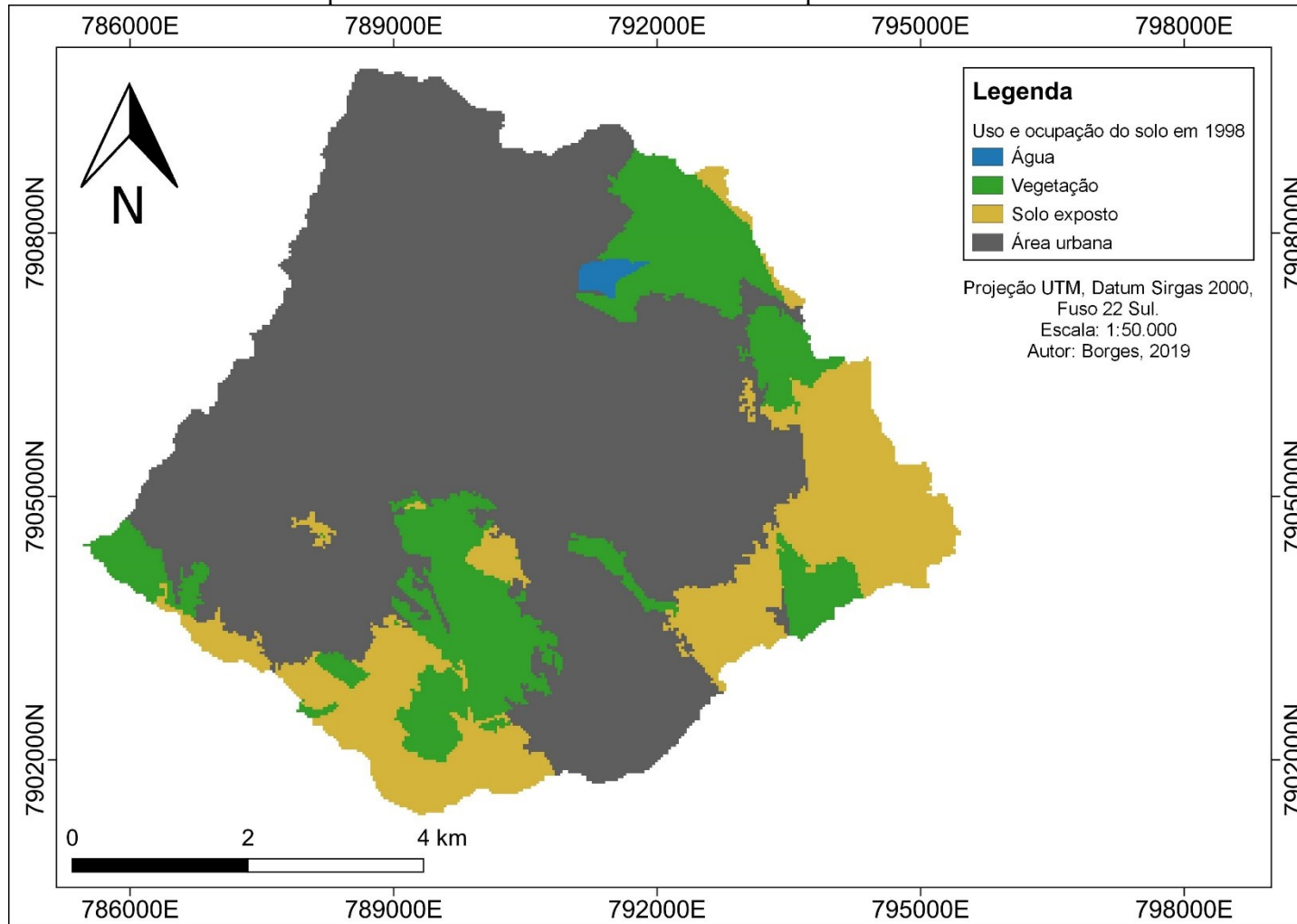
Mapa de altimetria da bacia de São Pedro por imagem TOPODATA – DRS – INPE



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

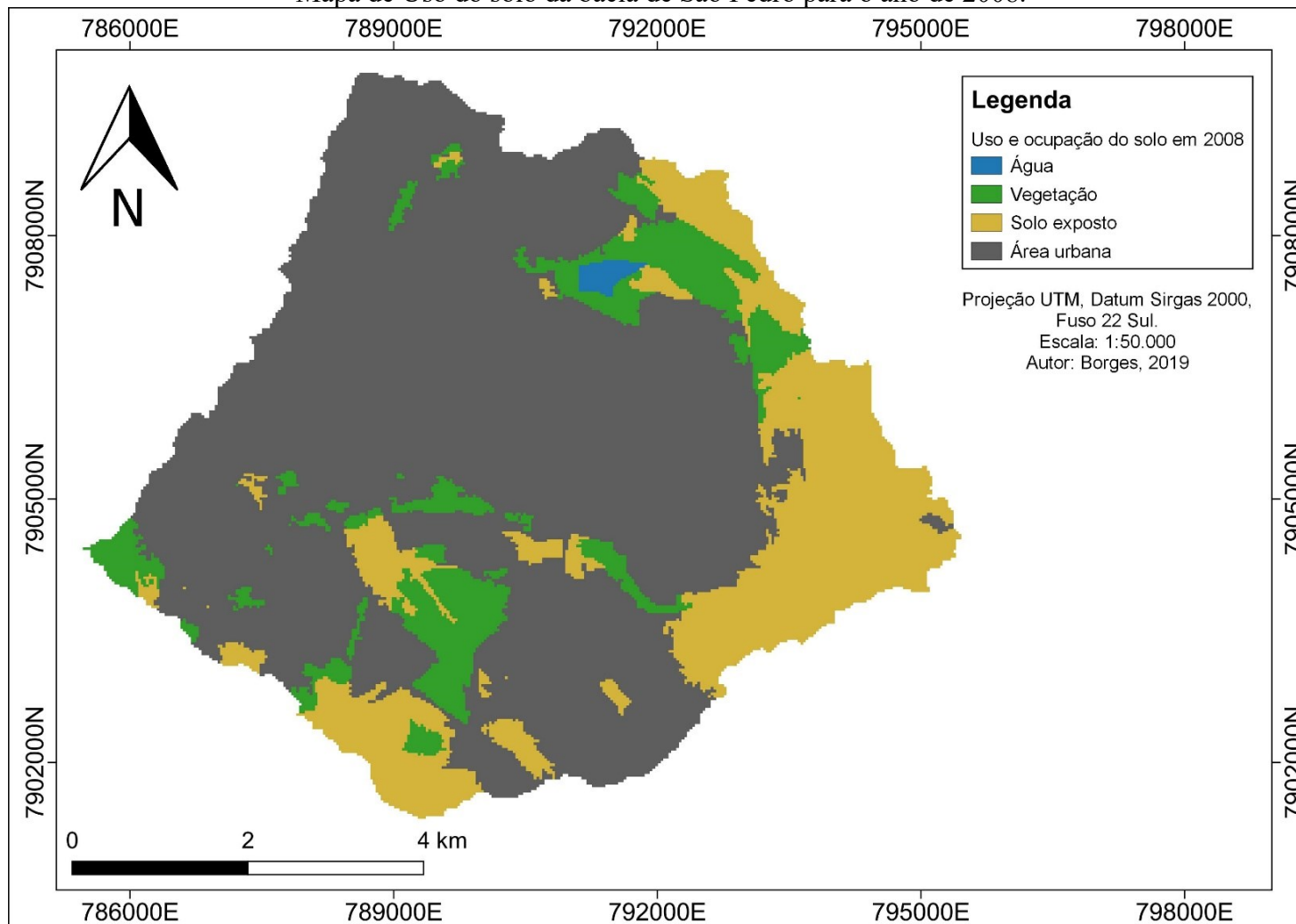


Mapa de Uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 1998.

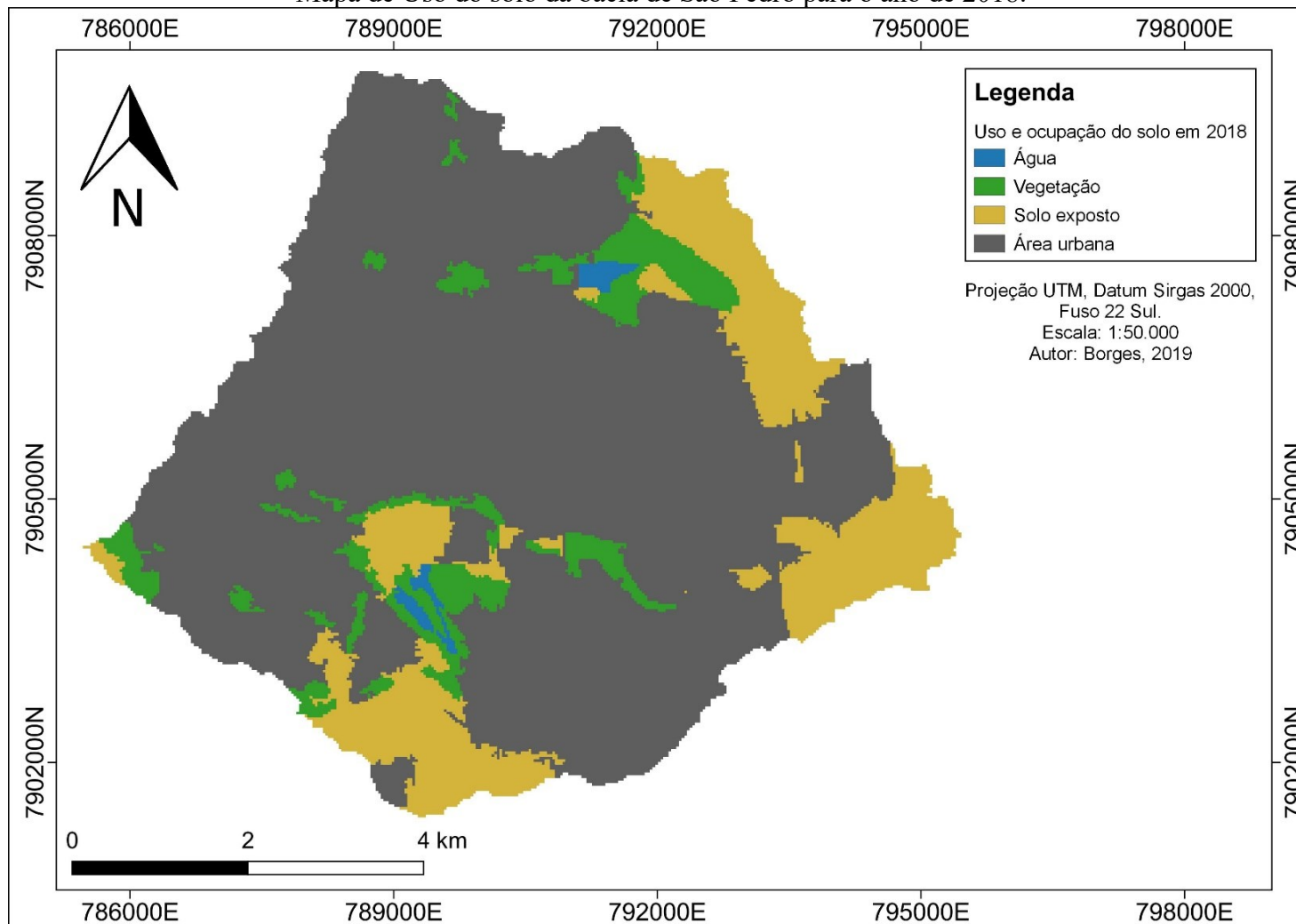


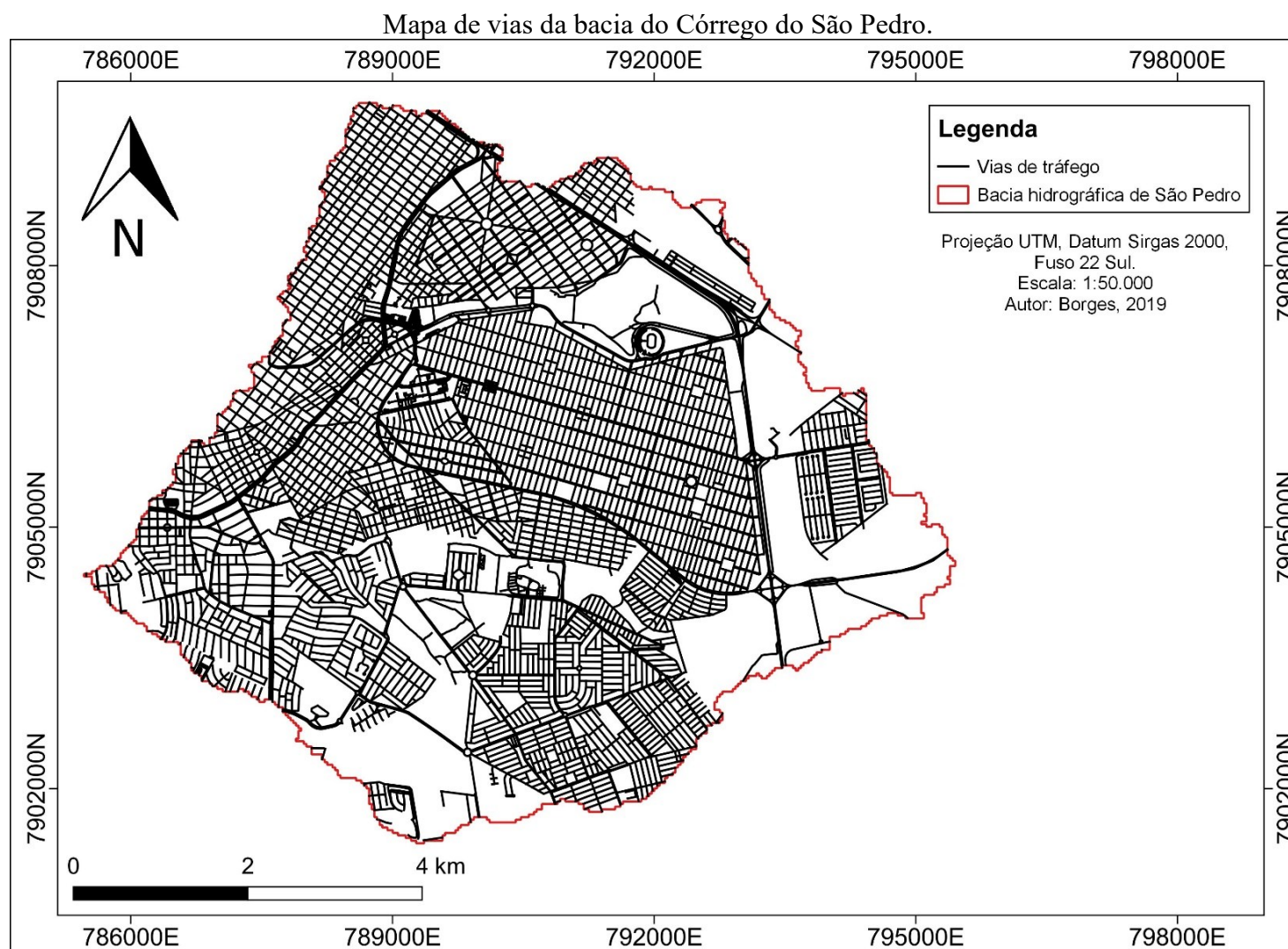


Mapa de Uso do solo da bacia de São Pedro para o ano de 2008.



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





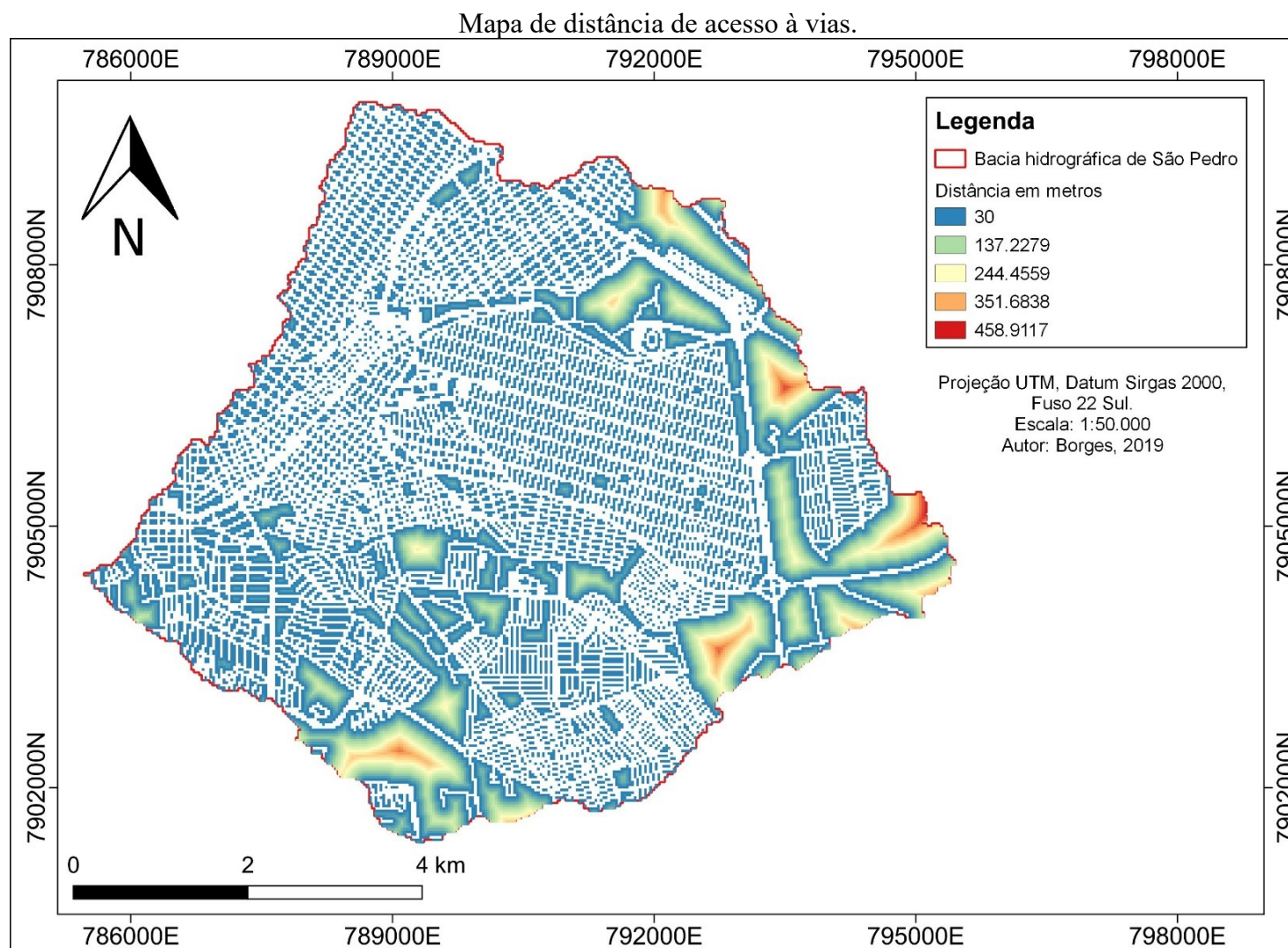
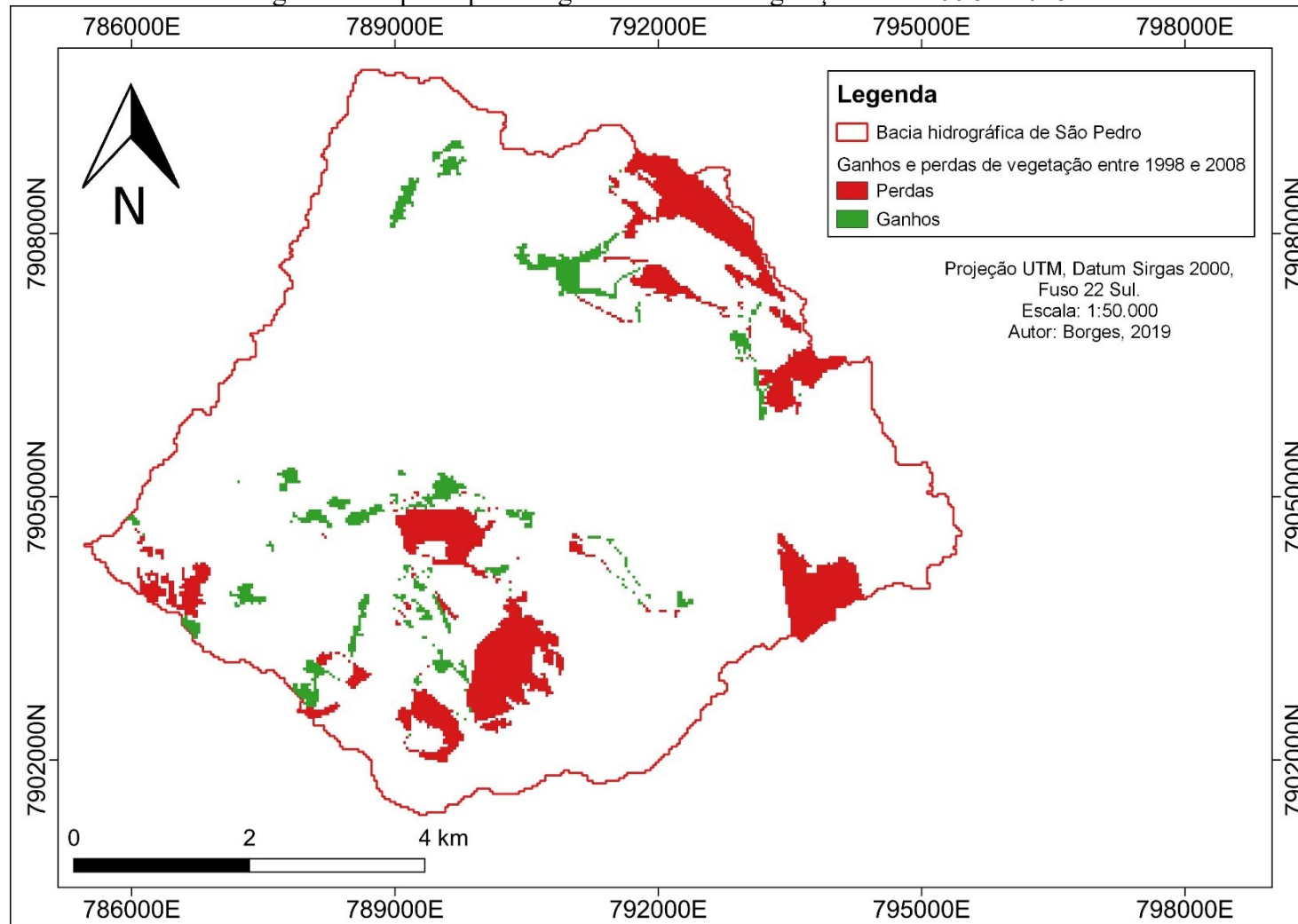
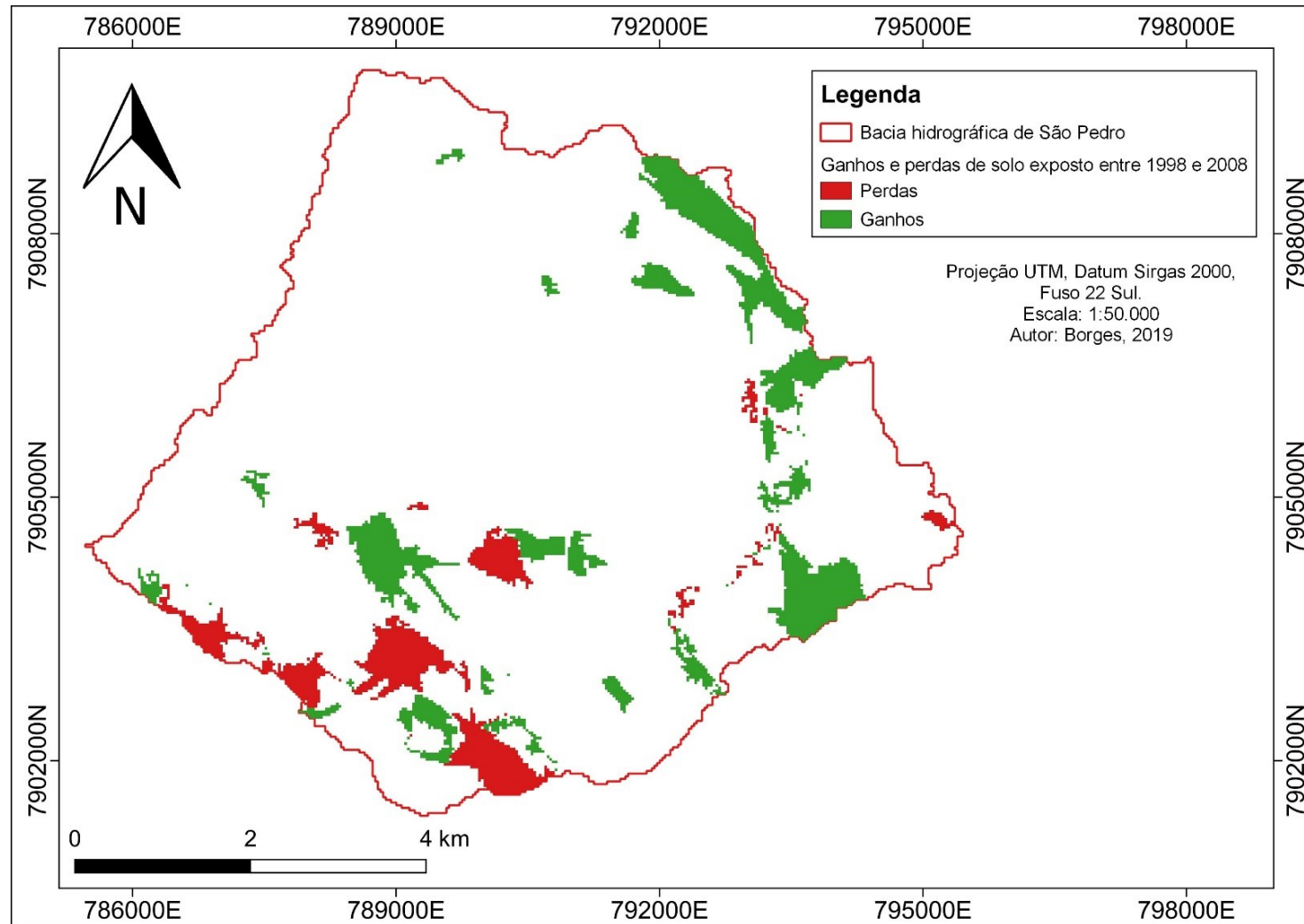


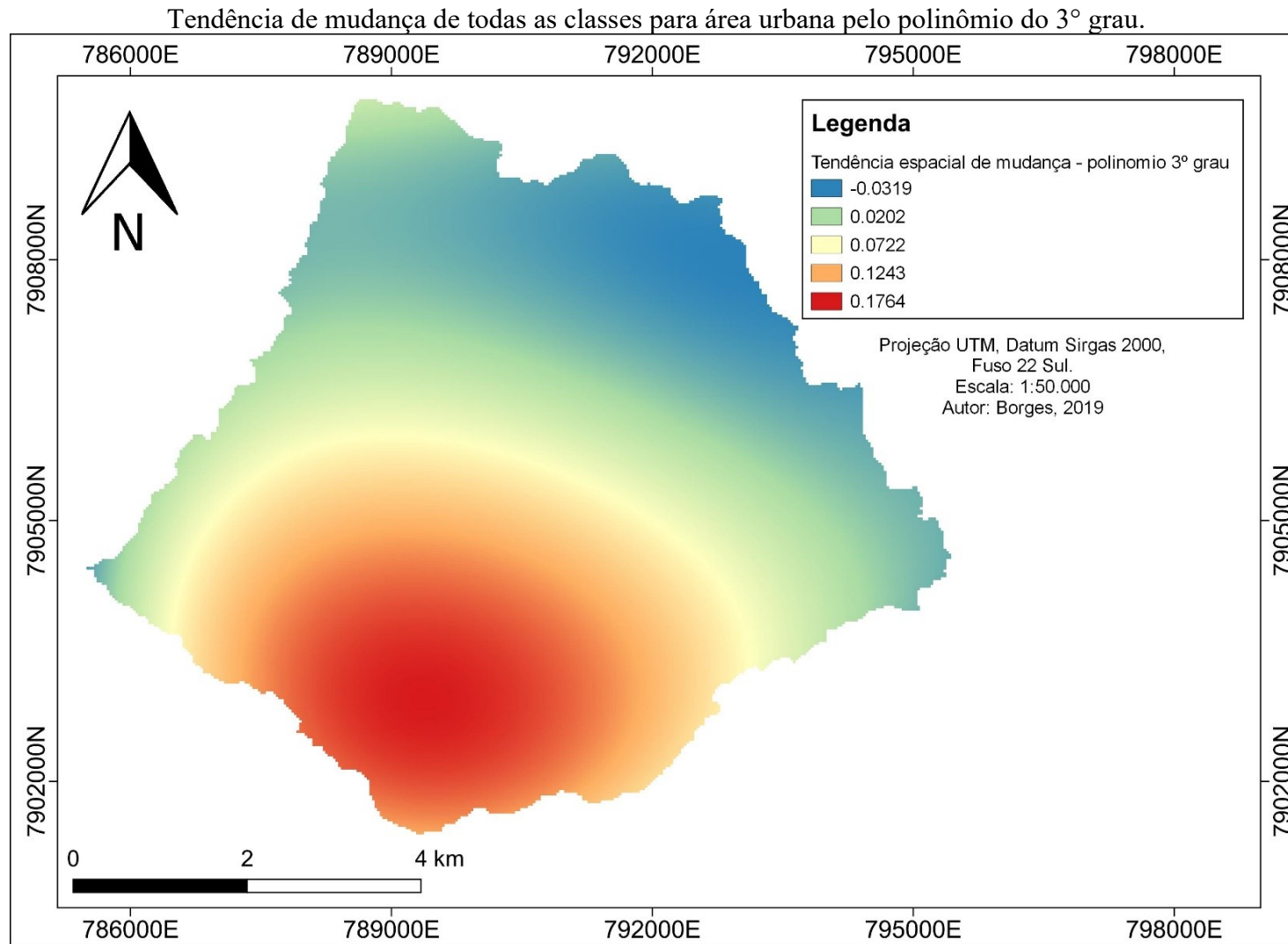
Figura do mapa de perda e ganho da classe vegetação entre 1998 e 2018.

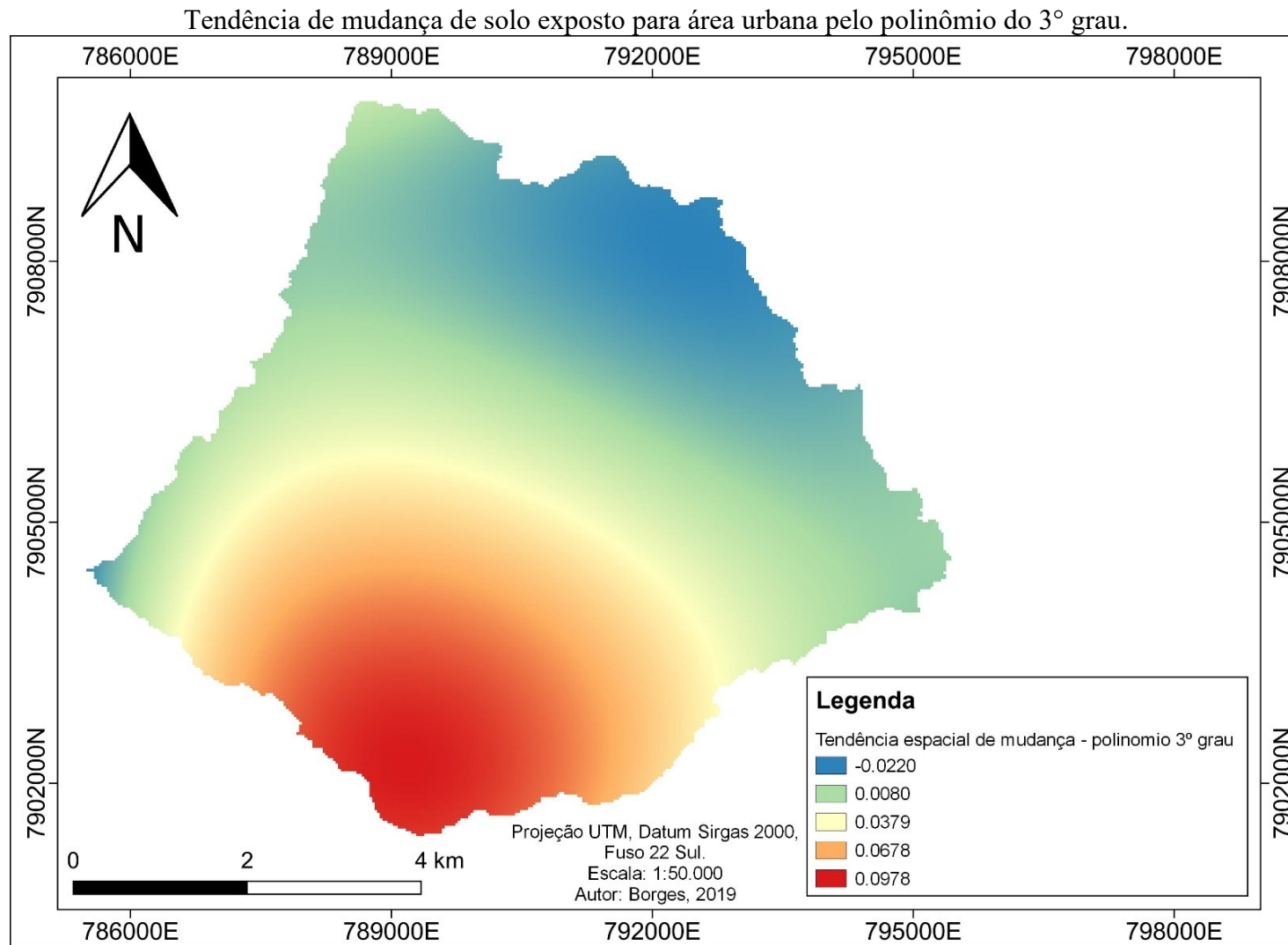




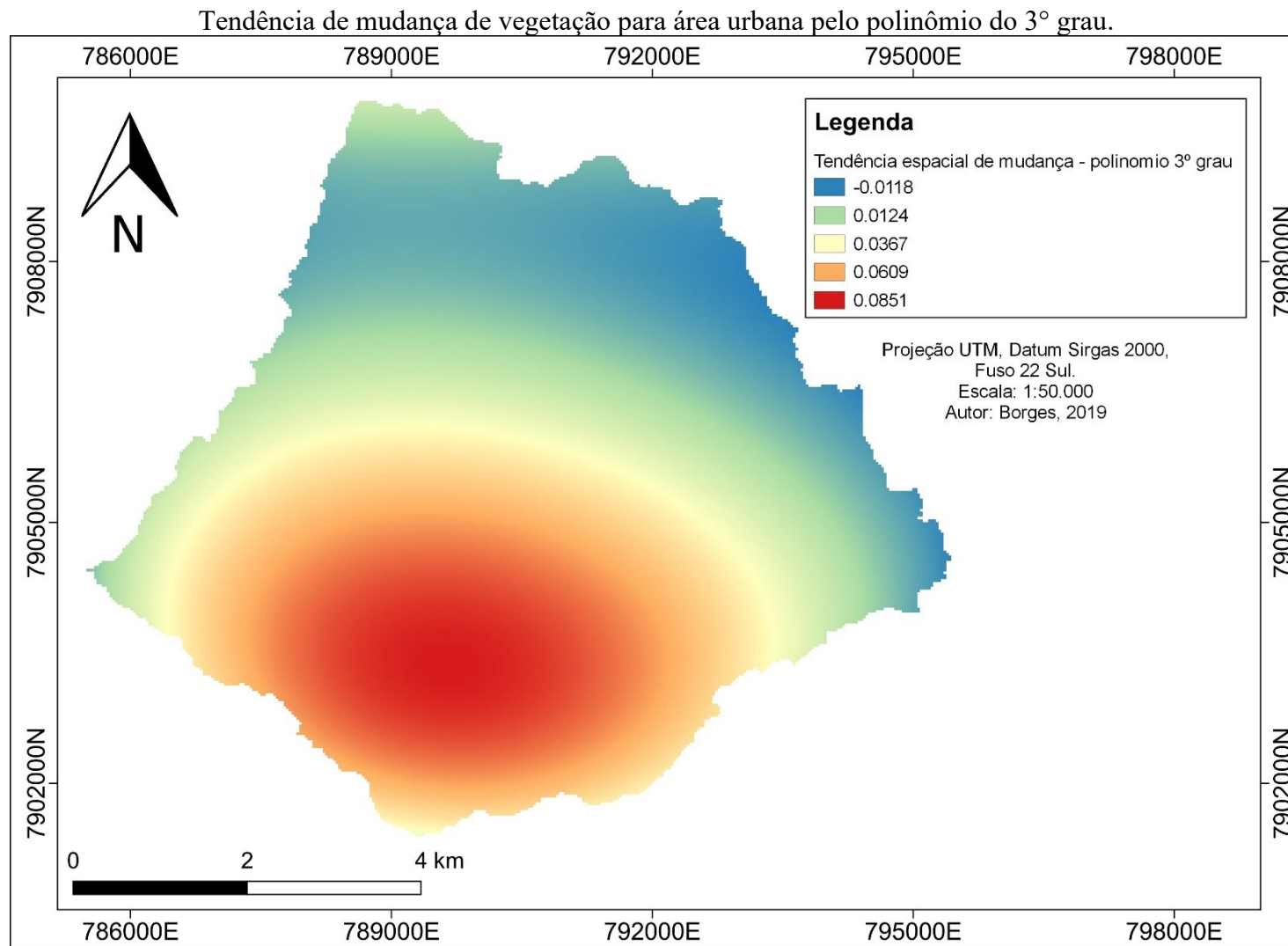
Mapa de perda e ganhos da classe solo exposto entre 1998 e 2018.

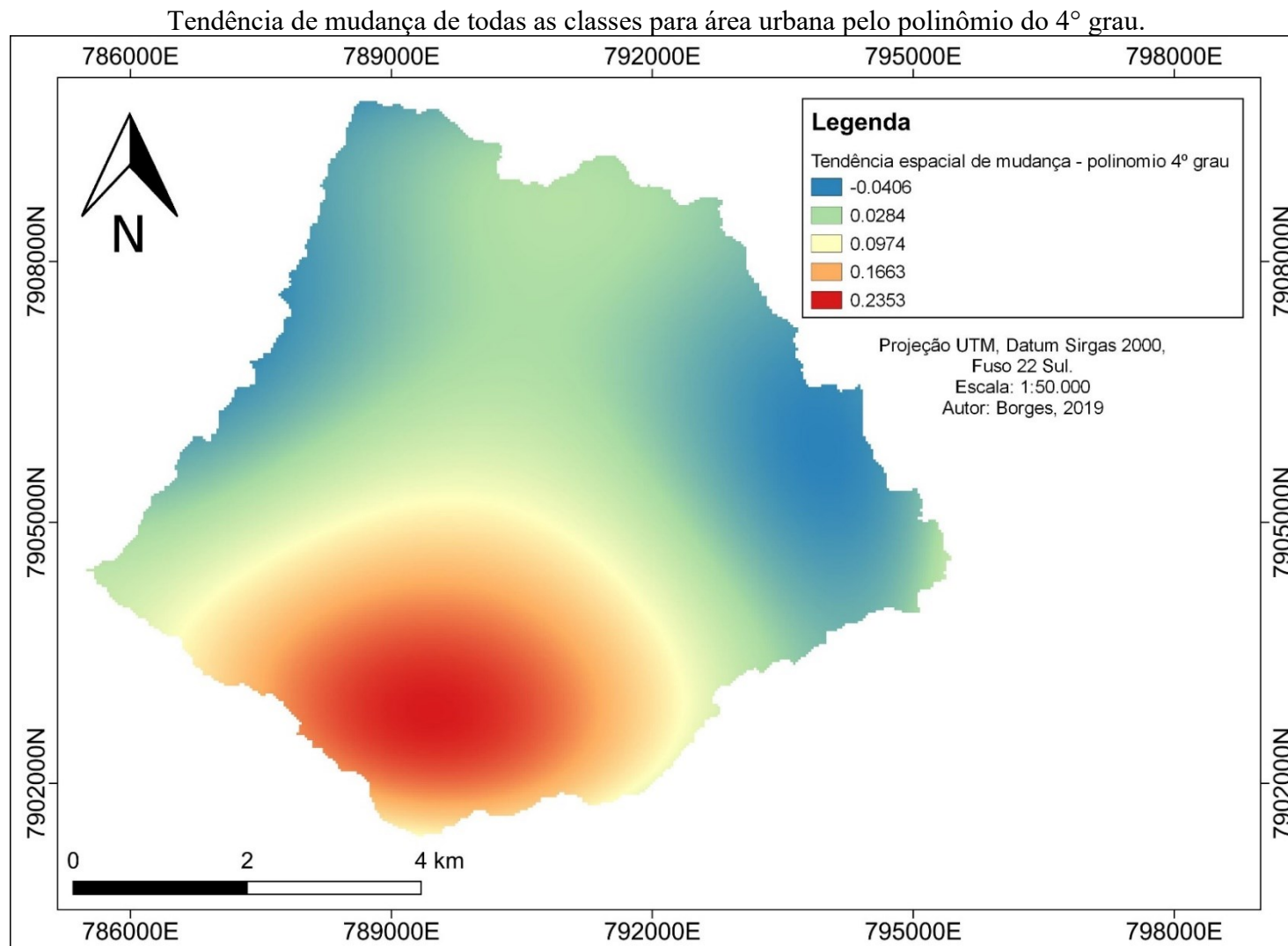


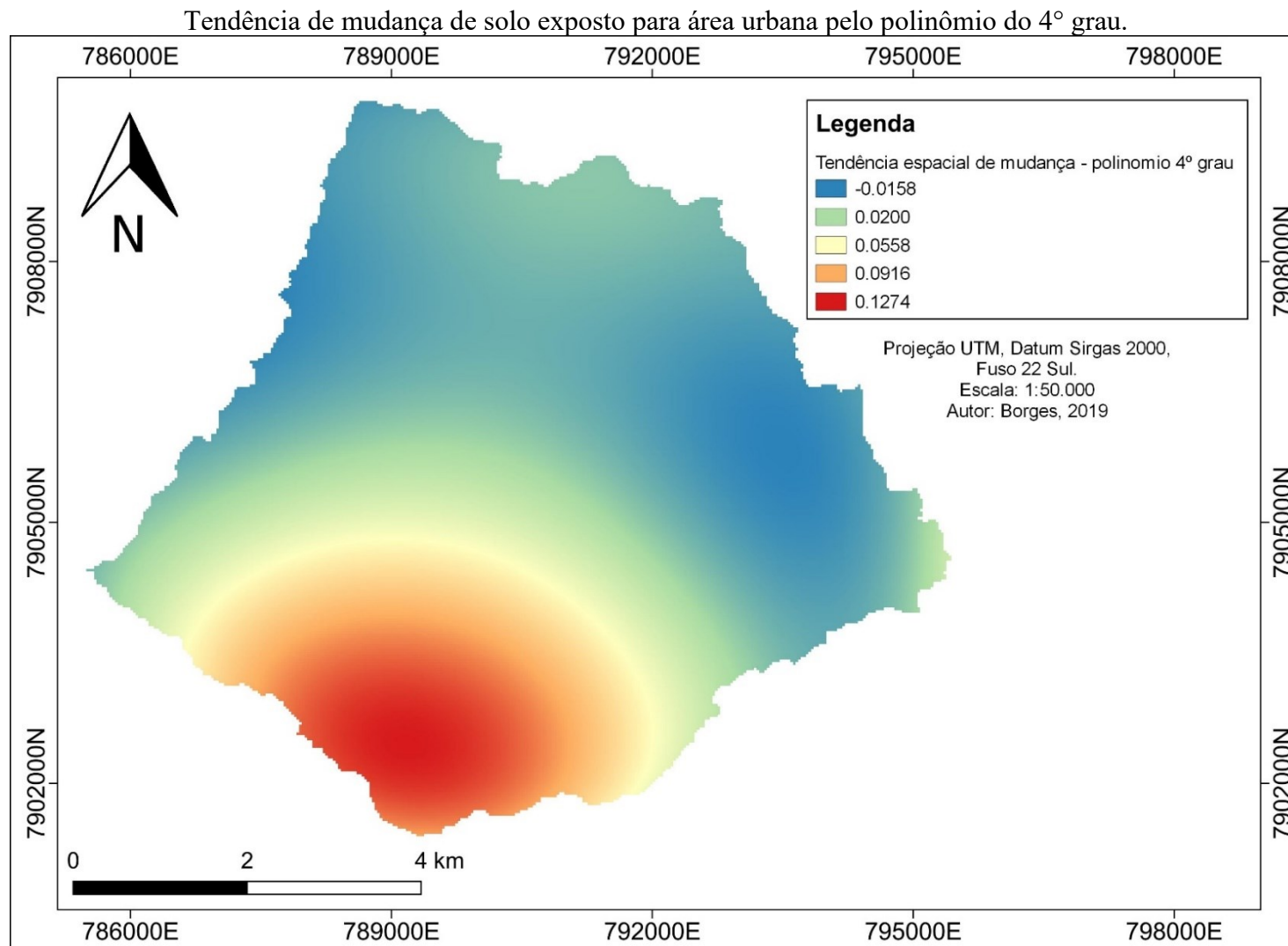


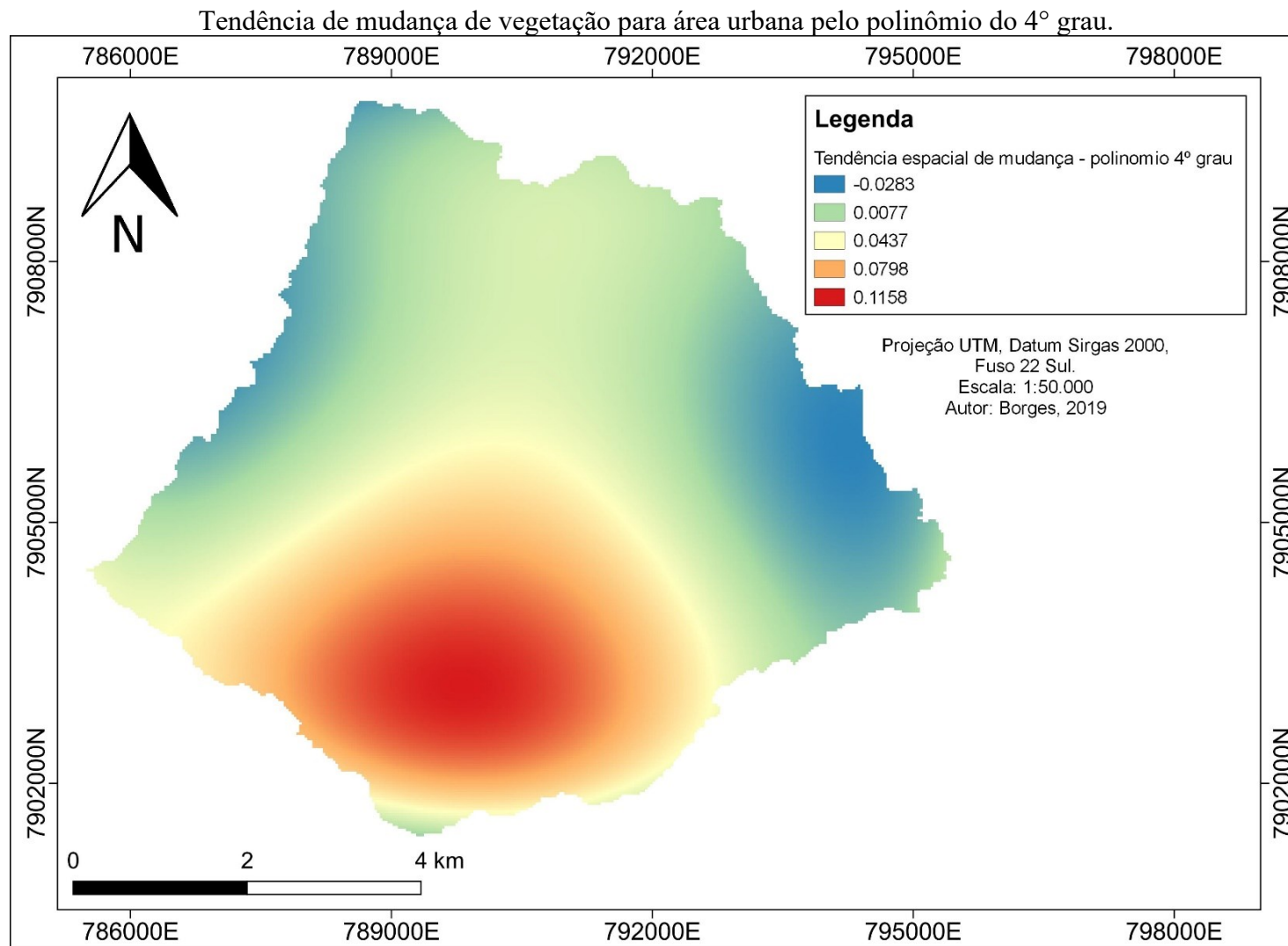




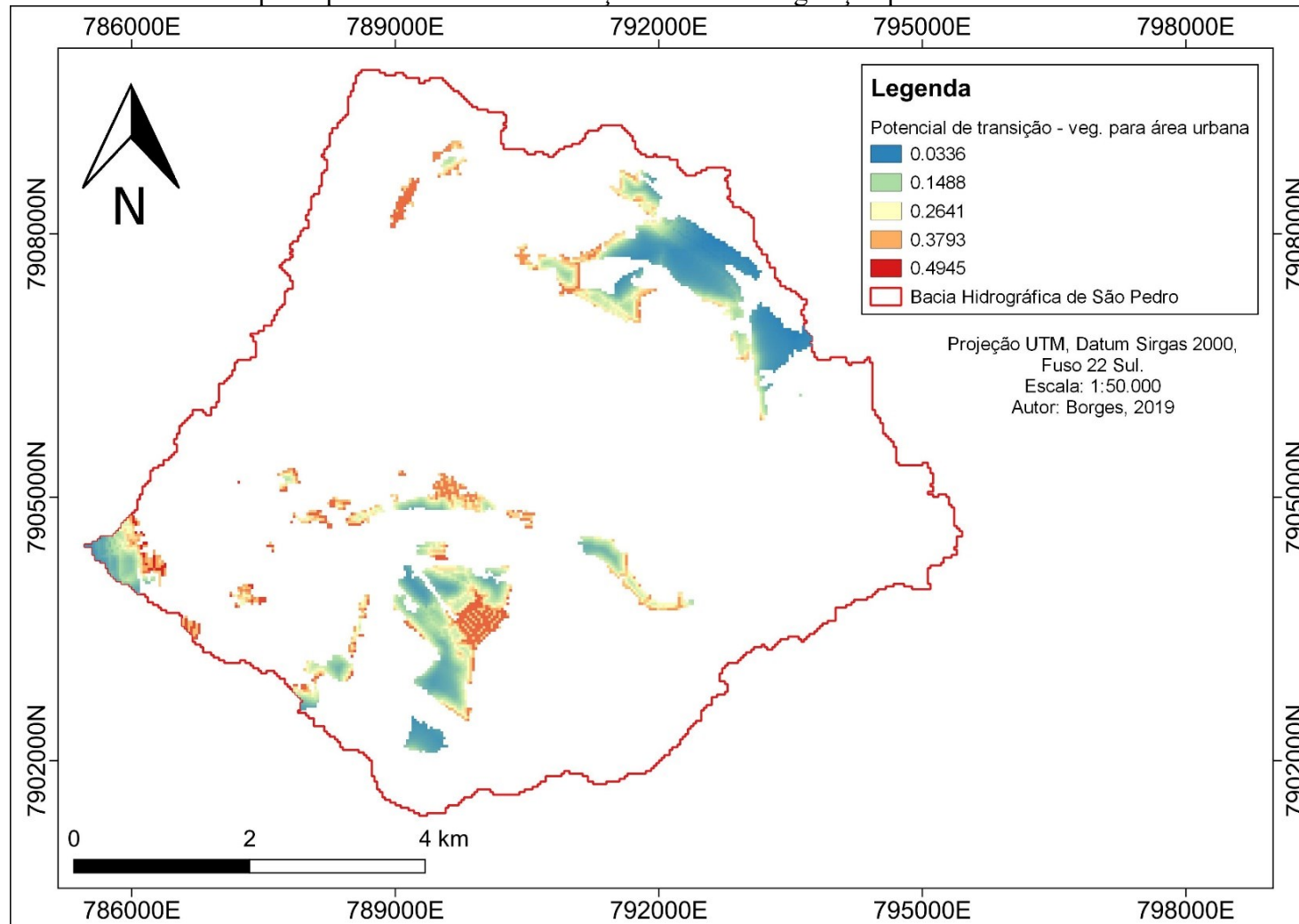




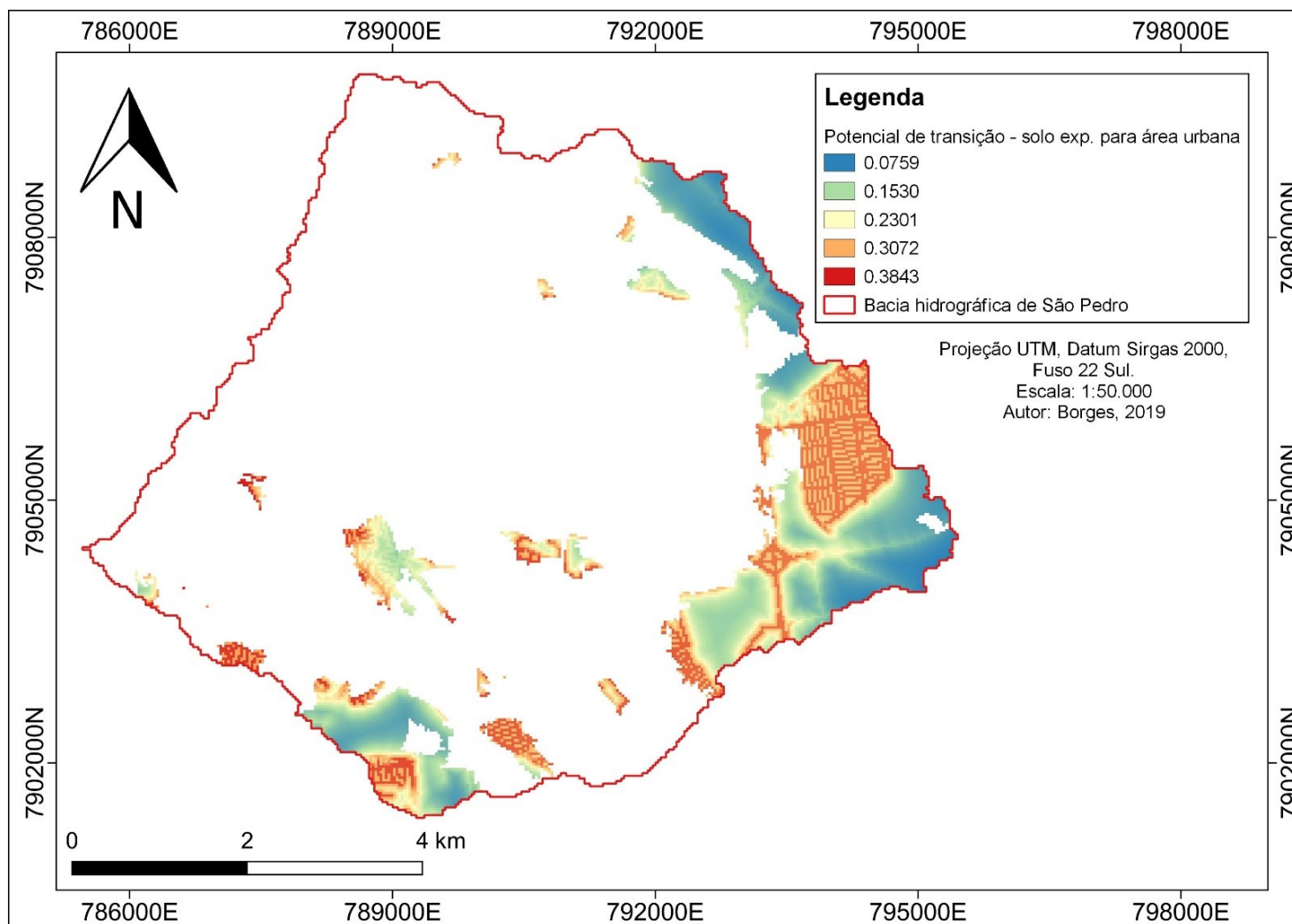


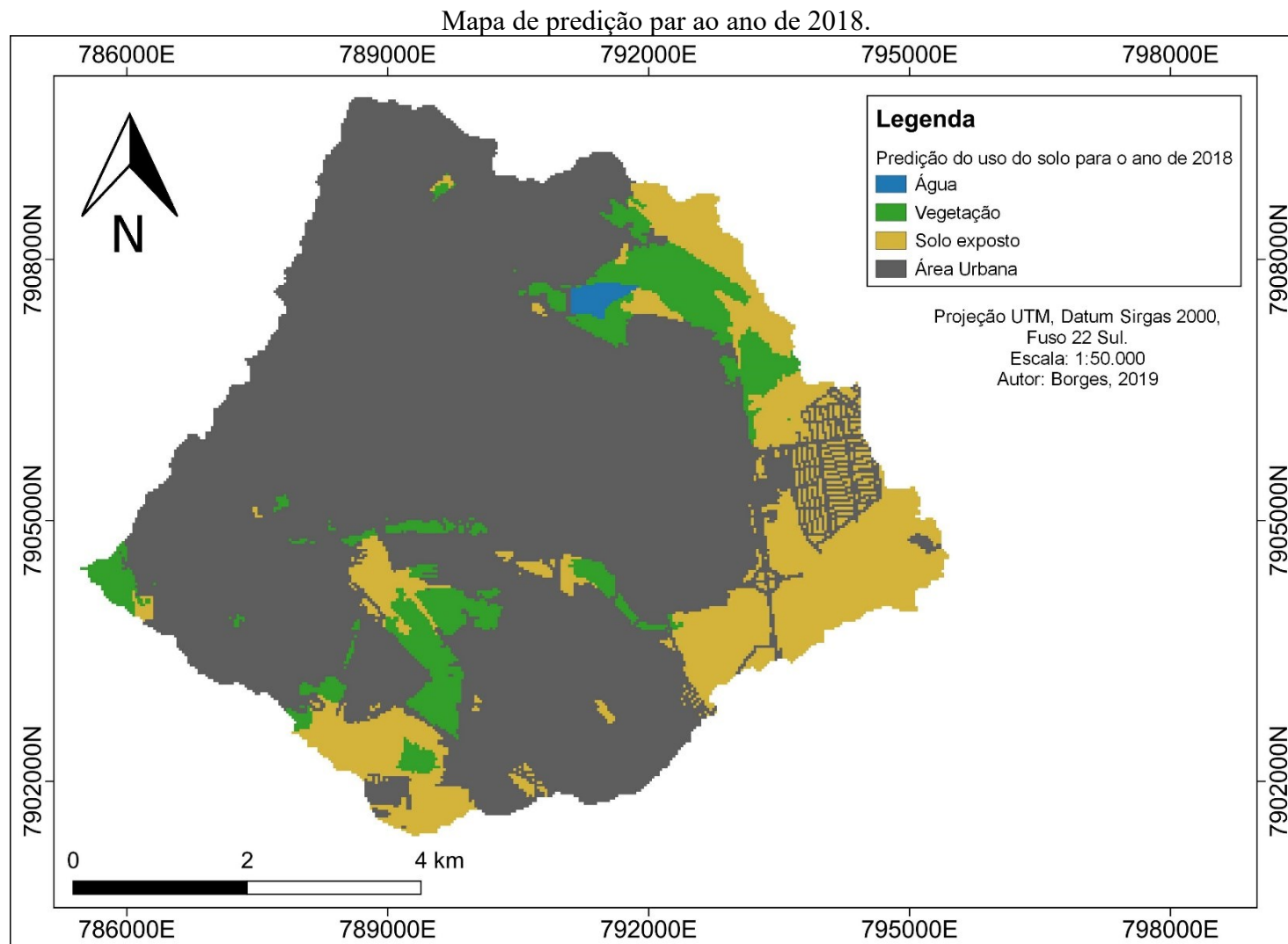


Mapa de probabilidade de mudança de áreas de vegetação para áreas urbanas.



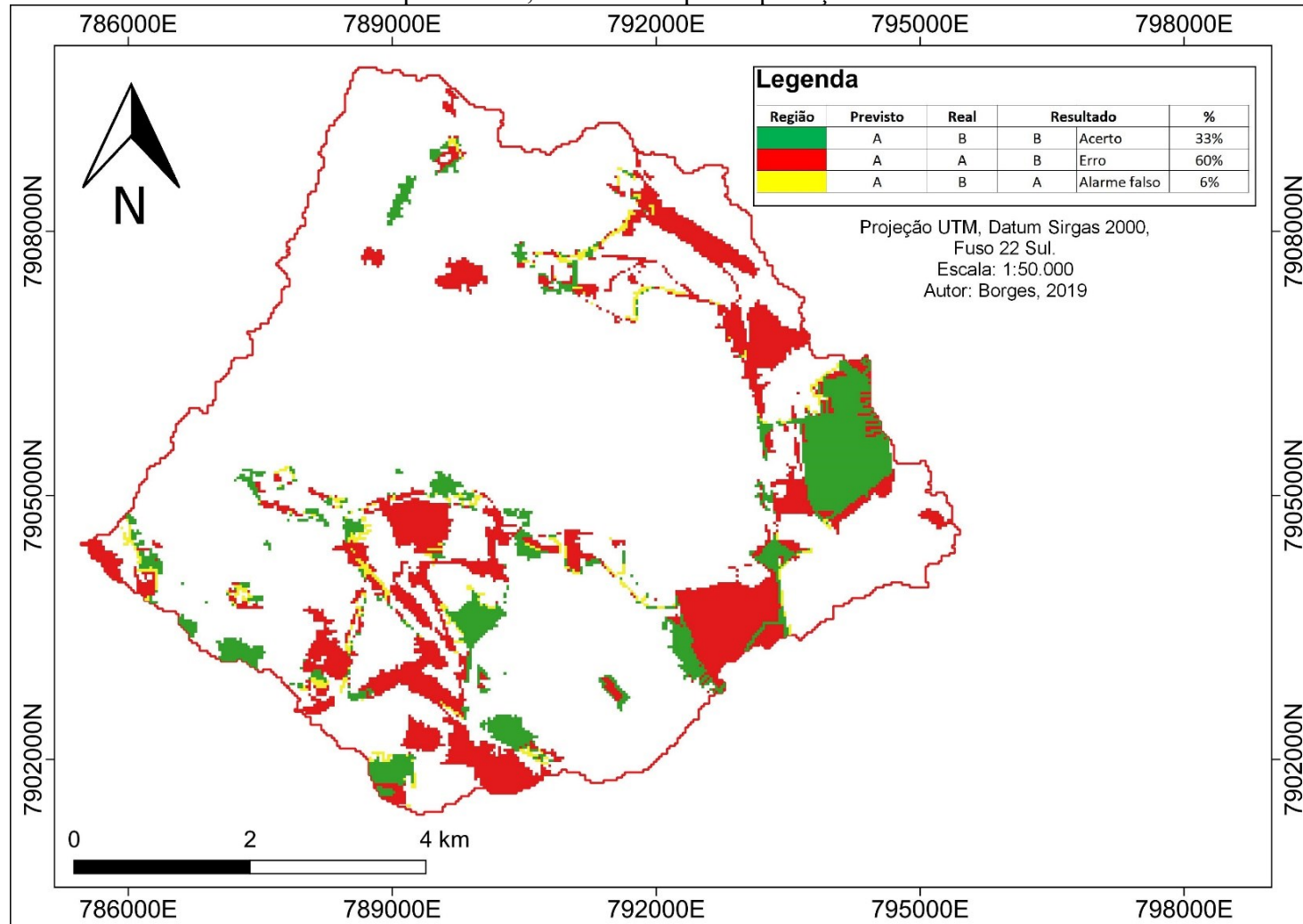
Mapa de Probabilidade de mudança de áreas de solo exposto para áreas urbanas.





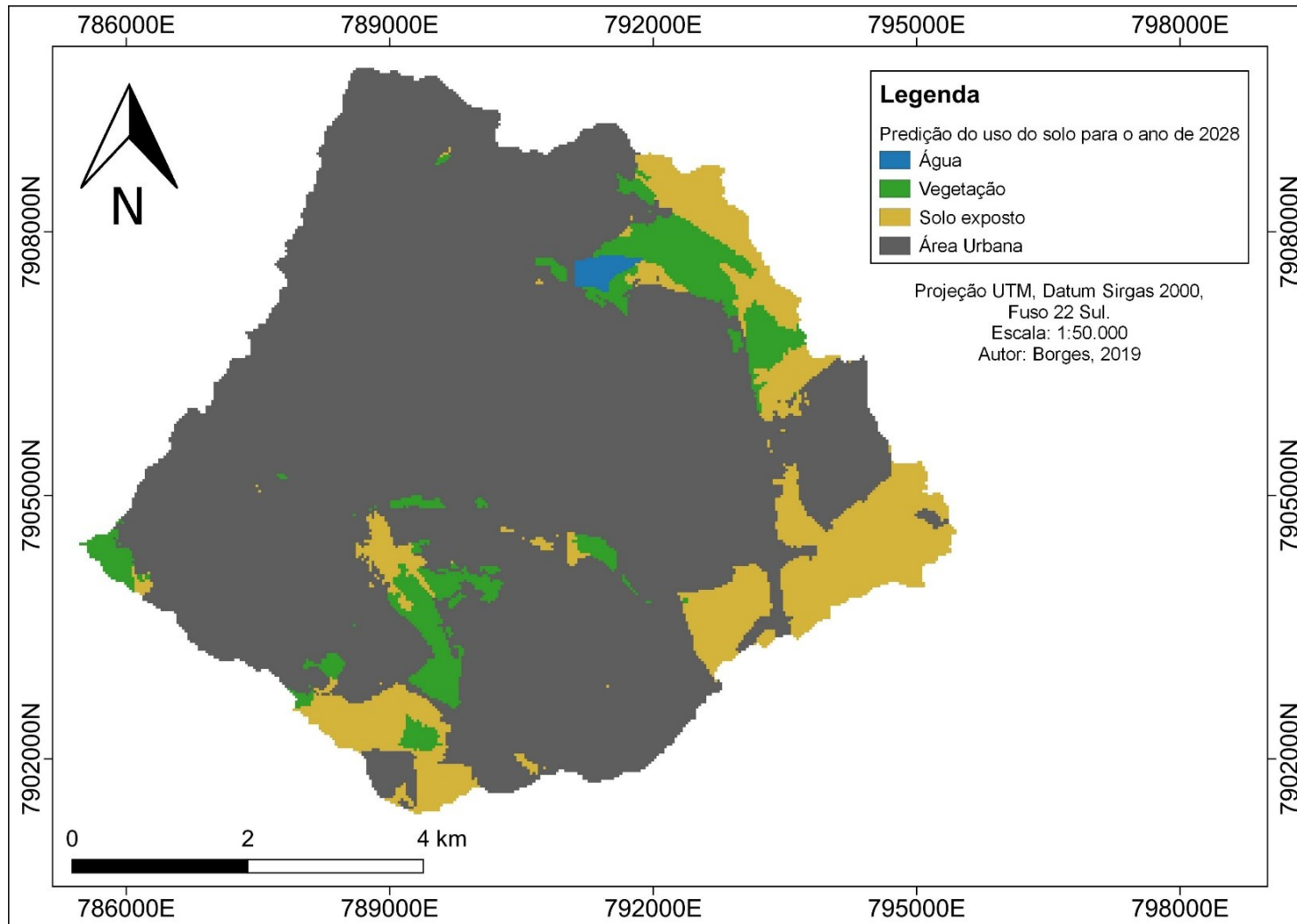


Mapa e acerto, erro e alerta para a predição de 2018.

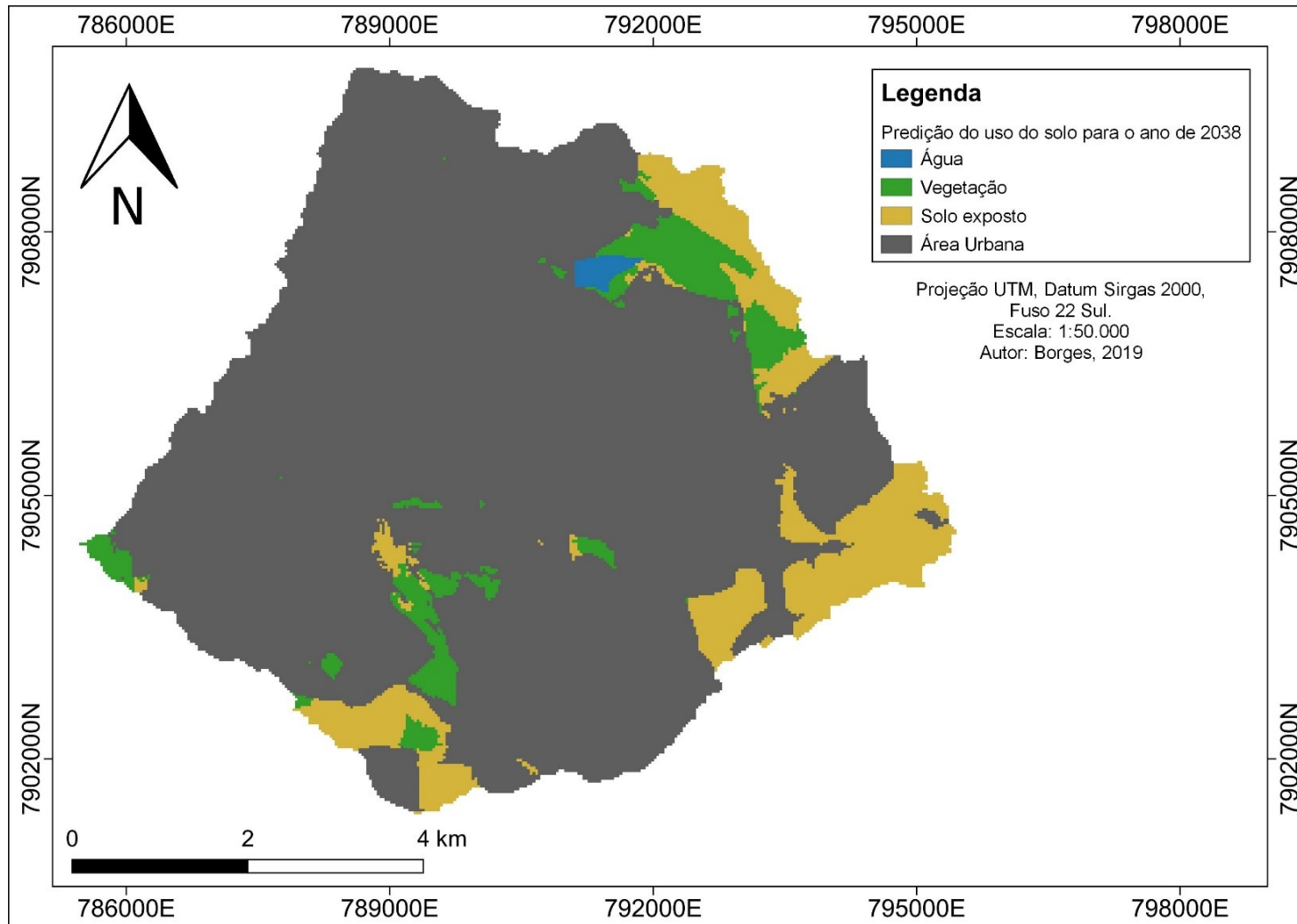




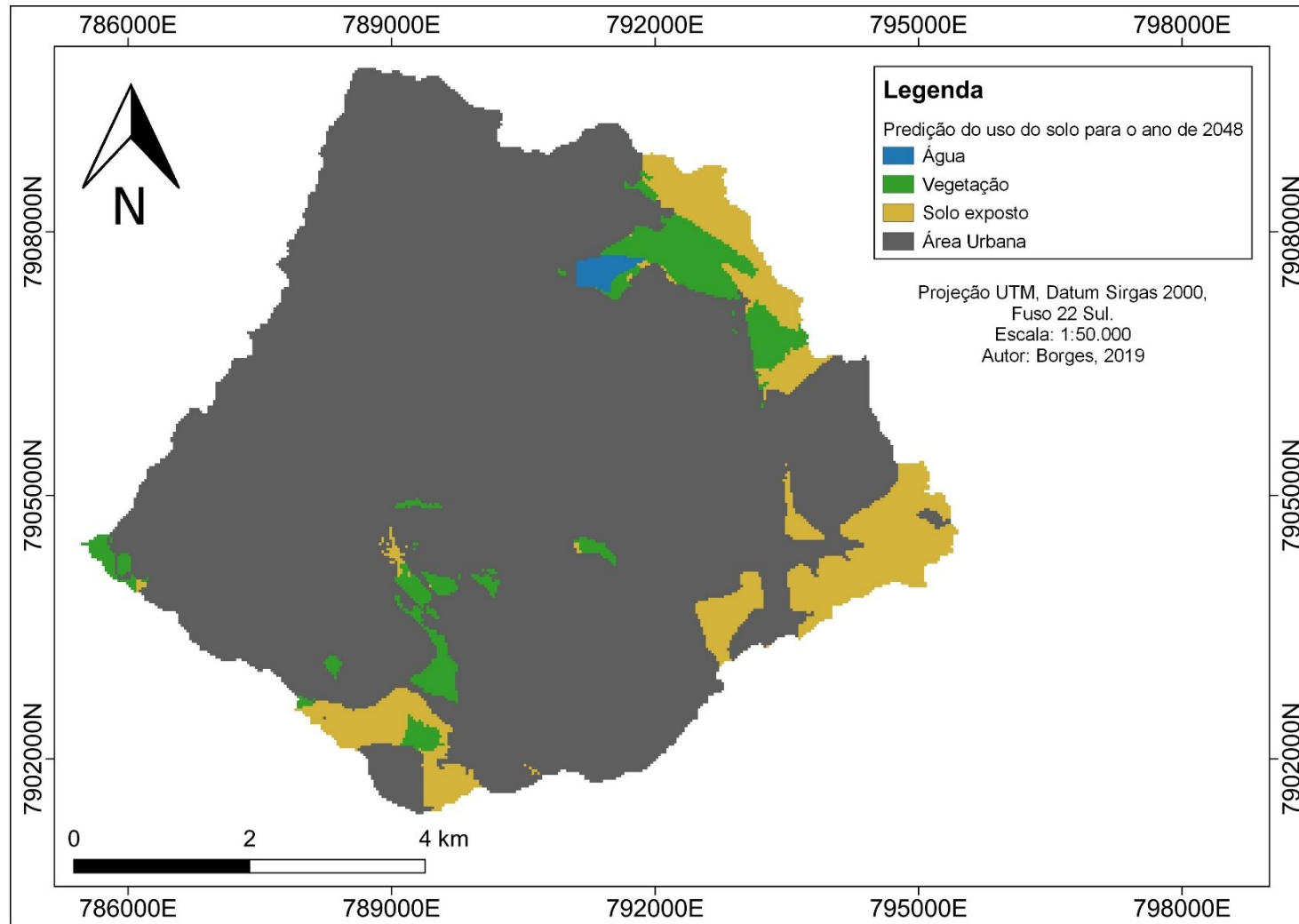
Mapa de predição do uso do solo para 2028.



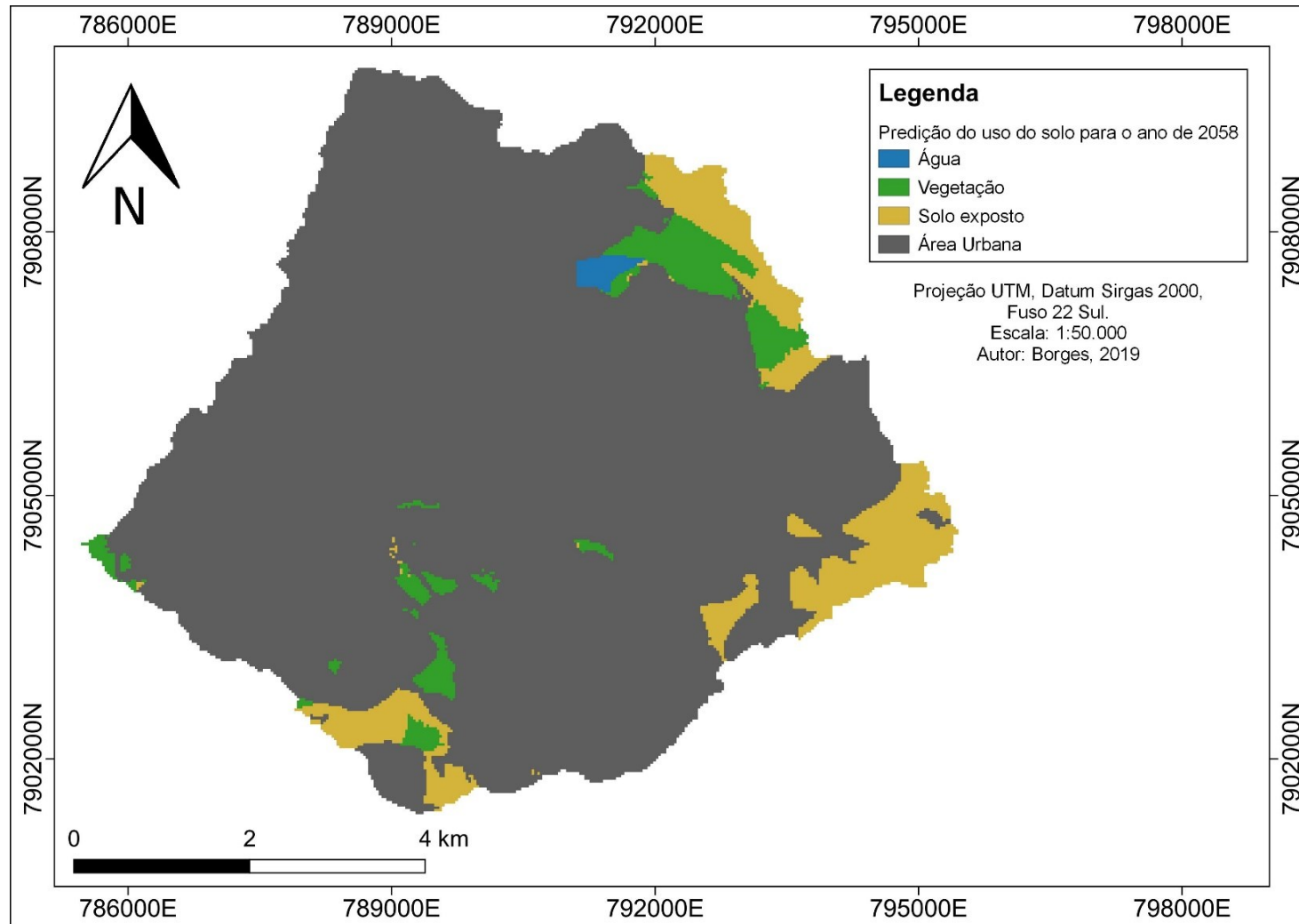
Mapa de predição do uso do solo para 2038.



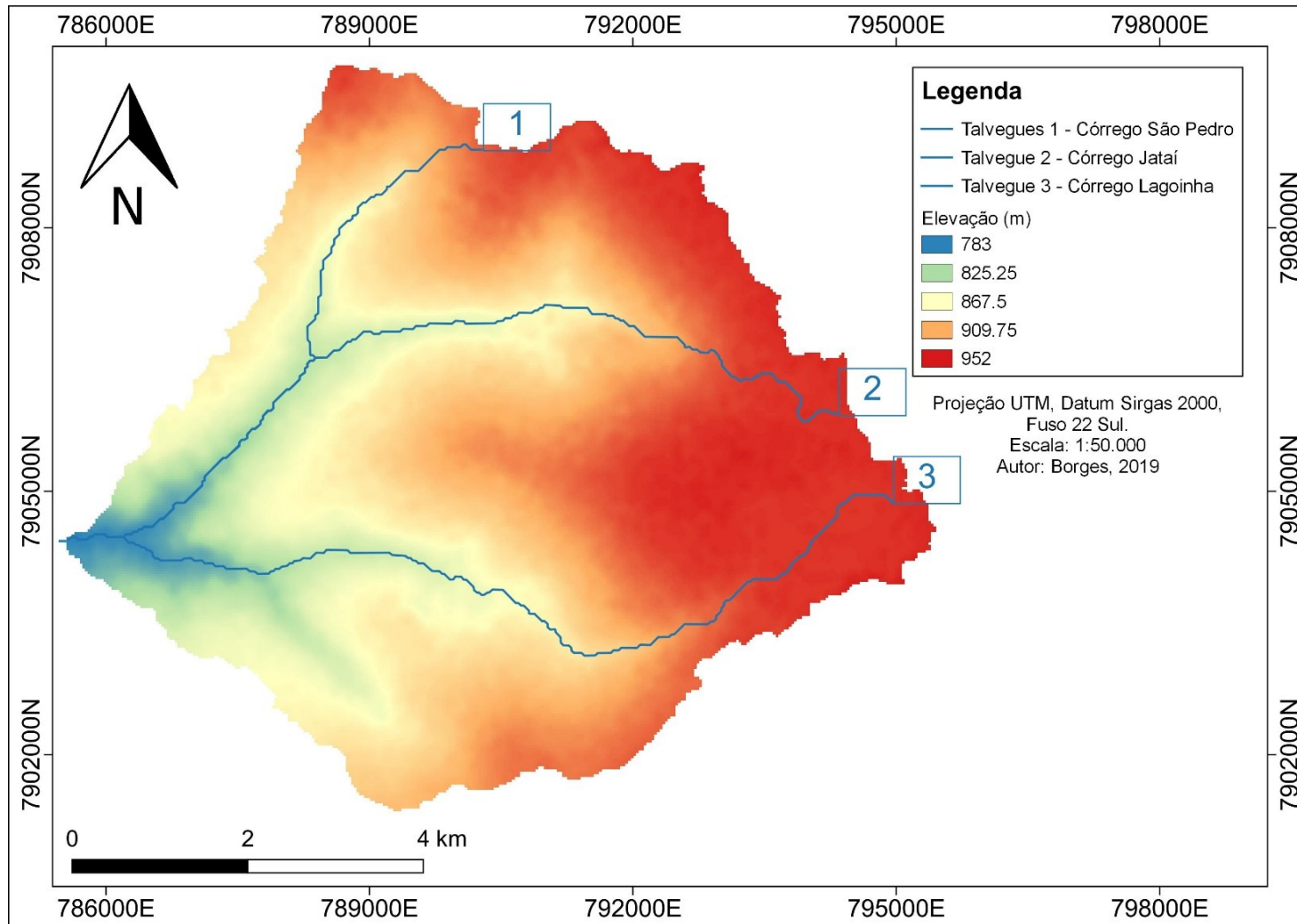
Mapa de predição do uso do solo para 2048.



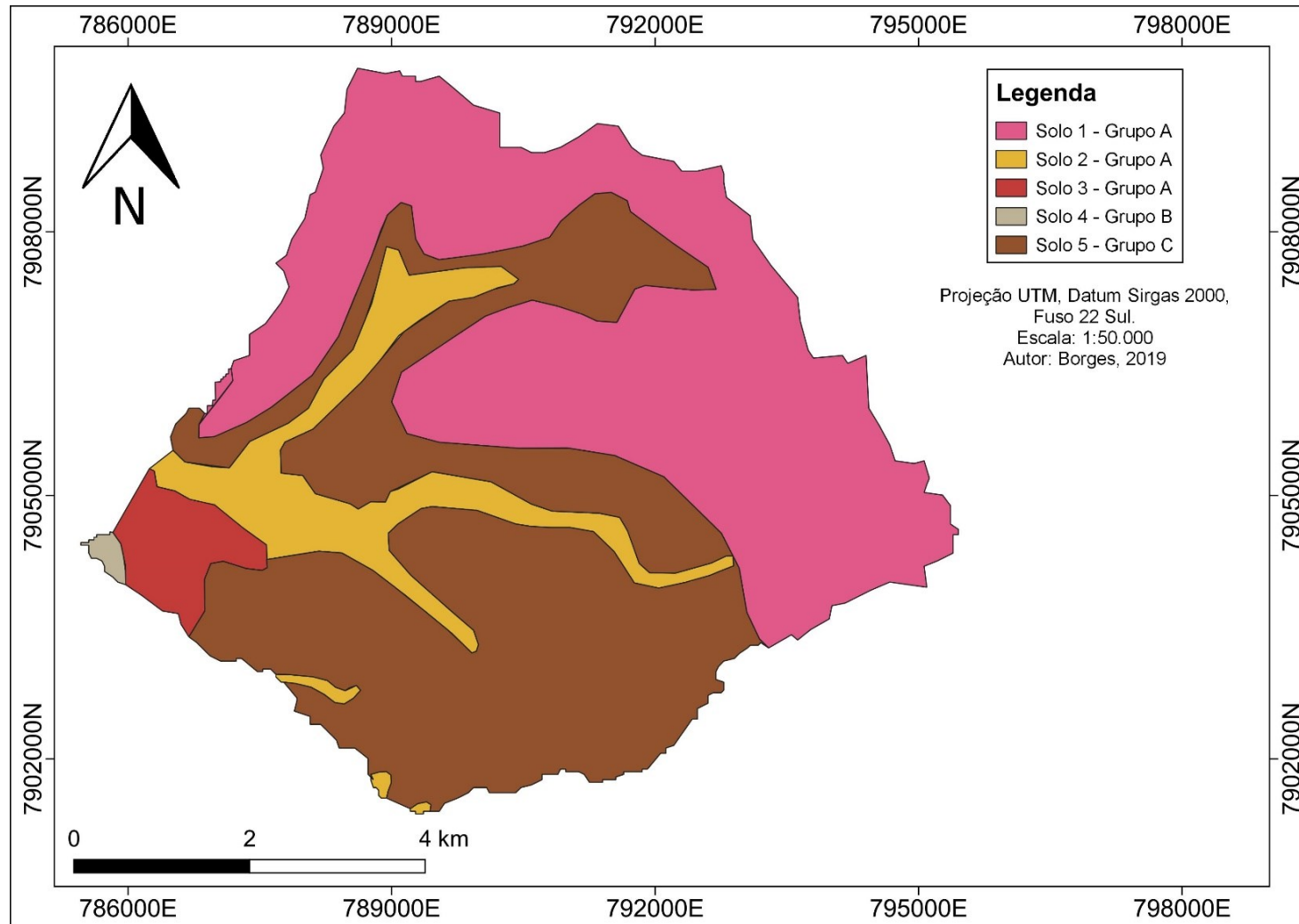
Mapa de predição do uso do solo para 2058



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		9.642755	

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

SBUH 1998 50 120										
Tempo	Intensidade	Precipitação	Precipitação	Pef	Pef(t)	ie	I1	I2	Q1	Q2
min	mm/h	mm	Acumulada	[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		11.07219	

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

<b>SBUH 2008 25 120</b>										
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	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		11.10748	

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

<b>SBUH 2018 25 120</b>										
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	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		11.19431	

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

<b>SBUH 2028 25 120</b>										
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	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		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]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/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		11.28441	

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

<b>SBUH 2038 25 120</b>										
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		11.33564	

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

<b>SBUH 2048 25 120</b>										
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		9.942946	

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

SBUH 2048 50 120										
Tempo	Intensidade	Precipitação	Precipitação	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

<b>SBUH 2058 25 120</b>										
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	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		11.39716	

