

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ/CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**IMPACTO DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO SOBRE AS VAZÕES MÁXIMAS
SIMULADAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIO CASCAVEL**

SUÉLLEM CRISTINE BERTUOL

CASCAVEL

2021

SUÉLLEM CRISTINE BERTUOL

**IMPACTO DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO SOBRE AS VAZÕES MÁXIMAS
SIMULADAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIO CASCAVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Maria Hermínia Ferreira Tavares
Coorientador: Prof. Dr. Wagner de Aguiar

CASCAVEL

2021

Bi Bertuol, Suélem Cristine
IMPACTO DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO SOBRE AS
VAZÕES MÁXIMAS SIMULADAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-
BACIA DO RIO CASCAVEL / Suélem Cristine Bertuol;
orientadora Maria Hermínia Ferreira Tavares;
coorientador Wagner de Aguiar. -- Cascavel, 2021.
53 p.

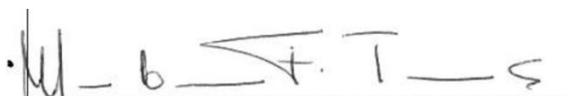
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de
Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do
Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2021.

1. Simulação hidrológica para vazões máximas. I.
Ferreira Tavares, Maria Hermínia, orient. II.
Aguiar, Wagner de, coorient. III. Título.

SUÉLLEM CRISTINE BERTUOL

**IMPACTO DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO SOBRE AS VAZÕES MÁXIMAS
SIMULADAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIO CASCAVEL**

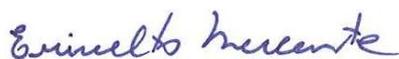
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientadora - Maria Hermínia Ferreira Tavares
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Coorientador Wagner de Aguiar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)



Erivelto Mercante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Eloy Lemos de Mello
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Murilo Cesar Lucas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 13 de Setembro de 2021

BIOGRAFIA

Suéllem Cristine Bertuol, nascida em 13 de janeiro de 1996, na cidade de Toledo-PR, é Engenheira Civil formada pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em 2018. Atua como projetista na empresa Água Engenheiros Associados, da qual é sócia-administradora, desde janeiro de 2018.

IMPACTO DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO SOBRE AS VAZÕES MÁXIMAS SIMULADAS: ESTUDO DE CASO NA SUB-BACIA DO RIO CASCAVEL

RESUMO

O Oeste do Paraná vem sendo destaque nacionalmente devido à prosperidade da economia, o que tem gerado crescimento urbano e, conseqüentemente, o aumento da área impermeabilizada. Com isso, a análise da alteração do uso e cobertura do solo se torna importante para avaliar seus reflexos no regime hidrológico dos rios, sobretudo em área de manancial de abastecimento público. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do uso e cobertura do solo sob as vazões máximas da sub-bacia hidrográfica do Rio Cascavel, responsável por parte do abastecimento da cidade de Cascavel-PR, nos últimos 20 anos. Foram utilizadas imagens da série de satélites Landsat para mapear o uso do solo nos anos de 1999, 2009 e 2019, utilizando o software ENVI 5.1. Com as imagens classificadas e o modelo digital de elevação do terreno, utilizou-se a equação de chuvas intensas da cidade para obter a vazão máxima resultante na bacia para cada cenário, usando cinco diferentes períodos de retorno. A vazão máxima foi calculada por meio do software HEC-HMS. Os resultados mostraram um aumento de 15,87% no CN da bacia, resultando num acréscimo de 92,72% na vazão máxima da bacia, nos últimos 20 anos, o que evidenciou a influência da alteração do uso e cobertura do solo nas vazões máximas da sub-bacia.

Palavras-Chave: cobertura do solo; escoamento superficial; urbanização; uso do solo.

THE IMPACT OF CHANGING SOIL USE UNDER SIMULATED MAXIMUM FLOWS: A CASE STUDY IN THE CASCAVEL RIVER SUB-BASIN

ABSTRACT

The West of Paraná has been highlighted nationally due to the prosperity of its economy, which has created urban growth and, consequently, an increase in the impermeable area. Thus, an analysis of the change in soil use and coverage becomes important to assess its effects on the hydrological regime of rivers, especially in areas of public water supply. Thus, the present work aims to evaluate the use and coverage of soil under the maximum flows of the Cascavel River sub-basin, responsible for part of the supply of the city of Cascavel-PR, in the last 20 years. Landsat satellite images were used to map soil use in 1999, 2009 and 2019 using ENVI 5.1 software. With the classified images and the terrain elevation model, an intense city rainfall equation is used to obtain the resulting maximum flow in the basin for each scenario using six different return periods. The maximum flow was estimated using the HEC-HMS software. The results showed an increase of 15.87% in the CN of the basin, resulting in an increase of 92,72% in the maximum flow of the basin, in the last 20 years, affecting the change in the use, and coverage of the soil in the maximum flow rates of the sub-basin.

Keywords: surface runoff; soil cover; urbanization; soil use.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	15
3.1.1 UTILIZAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO	15
3.2 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DO PONTO DE VISTA HIDROLÓGICO.....	16
3.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	18
3.4 URBANIZAÇÃO E IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO	20
3.5 GEOPROCESSAMENTO	21
3.6 MODELOS HIDROLÓGICOS	22
3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	22
3.6.2. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	24
3.7 O MODELO HEC – HMS	24
3.7.1 APLICAÇÕES.....	25
3.8 DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4.1.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO NA REGIÃO DE ESTUDO.....	29
4.2 MORFOMETRIA DA BACIA	30
4.3 DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	31
4.3.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....	31
4.4 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DA CURVA (CN)	32
4.5 SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO – HEC-HMS.....	33
4.7 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
6 CONCLUSÃO	44
7 REFERÊNCIAS	46

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
C: Contorneada
CCRS: Canadá Center for Remote Sensing
CR: Cobertura de resíduos de culturas
CT: Contorneada e terraço
CN: Número da curva
DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio
EC: Estatuto da Cidade
HEC-HMS: *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LR: Linha reta
MDE: Modelo Digital de Elevação
OSGeo: Open Source Geospatial Foundation
PD: Plano Diretor
PDI: Processamento Digital de Imagens
PNRH: Política Nacional de Recursos Hídricos
SCS: Serviço de Conservação do Solo
SEMA: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SIG: Sistema de Informações Geográficas
SMA: Soil Moisture Accounting
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
USGS: United States Geological Survey

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras	17
Tabela 2 Valores de CN para bacias com ocupação agrícola.....	18
Tabela 3 Valores do CN para bacias com ocupação urbana	19
Tabela 4 Exemplo de trabalhos que utilizaram o HEC-HMS para modelagem hidrológica ..	26
Tabela 5 Descrição das classes de uso e cobertura do solo	33
Tabela 6 Valores do Número de Curva para cada Classe de solo.....	33
Tabela 7 Atributos das 11 parcelas territoriais da sub bacia	38
Tabela 8 Atributos canais	38
Tabela 9 Área ocupada pelas classes de cobertura do solo em cada cenário (km ²).....	39
Tabela 10 CN médio das sub-bacias nos três cenários	40
Tabela 11 Intensidades das precipitações de projeto	40
Tabela 12 Picos de vazão gerados para os cenários de cobertura do solo de 1999, 2009 e 2019	42
Tabela 13 Comparação entre aumento do CN e da Vazão média (m ³ /s) da sub bacia do Rio Cascavel.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Classificação dos modelos hidrológicos	23
Figura 2 Localização da sub-bacia no município de Cascavel-PR (Datum WGS 84).	29
Figura 3 Mapa dos solos de Cascavel-PR (Datum WGS 84).	30
Figura 4 Esquematização do método Muskingum-Cunge	35
Figura 5 Rede hidrográfica, divisão da sub bacia e ponto exutório (Datum WGS 84).....	37
Figura 6 Classificação da cobertura do solo nos três cenários em estudo	39
Figura 7 Hietograma para Tr de 5 anos.....	41
Figura 8 Hietograma para Tr de 10 anos.....	41
Figura 9 Hietograma para Tr de 25 anos.....	41
Figura 10 Hietograma para Tr de 50 anos.....	42
Figura 11 Hietograma para Tr de 100 anos.....	42
Figura 12 Aumento da vazão média da sub bacia do Rio Cascavel em relação ao aumento do CN entre 1999 e 2019.....	43

1 INTRODUÇÃO

A sub-bacia do rio Cascavel tem, na região urbana, o Lago Municipal Paulo Gorski, e engloba áreas agrícolas, áreas de vegetação, além das áreas ocupadas pelos córregos e rios que levam ao ponto exutório, a 50 m da estação de coleta e tratamento de água da Sanepar, na região Sul da cidade. Assim, é responsável por fornecer água potável para mais de 70% dos moradores da área urbana da cidade de Cascavel-PR (SANEPAR, 2014).

Segundo dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2020, Cascavel, no Paraná, possui uma área de aproximadamente 2.101,074 km² e uma população de 332.333 habitantes, sendo a 5ª maior cidade do estado, a qual está em crescente desenvolvimento devido à evolução da economia, que prospera nos setores do agronegócio, comércio e prestação de serviços. Esse crescimento desperta a atenção para o plano de crescimento da cidade, que deve estar em equilíbrio com os recursos naturais presentes na região para garantir a preservação e evitar problemas, como a elevada poluição do leito dos rios, que dificulta o tratamento da água para consumo.

Atualmente, vários corpos hídricos têm apresentado aumentos do escoamento superficial devido às atividades de ocupações territoriais (NASCIMENTO *et al.*, 2019), os quais são objeto de estudo para diversas pesquisas, pois possibilitam a avaliação dos reflexos da alteração das classes de uso da terra na qualidade do corpo d'água (OLIVEIRA, 2018).

Aumentos de áreas impermeáveis (como estacionamentos, prédios e estradas) tem causado escoamento excessivo em áreas urbanas e deterioração da qualidade da água no recebimento de corpos hídricos (JIA *et al.*, 2015).

Infelizmente, no Brasil, a política de preservação dos recursos naturais é tardia e, em muitos casos, falha. O plano de recursos hídricos (PNRH), Lei Federal nº 9.433/97 (BRASIL, 1997), por exemplo, enfatiza o uso do território da bacia hidrográfica, mas suas diretrizes são voltadas especificamente para o planejamento e a preservação das águas, não do seu entorno.

Shi *et al.* (2017) avaliaram o impacto causado pela alteração do uso e ocupação do solo na região dos rios Dourados (PR) e Brilhante (MS), na qualidade das águas, demonstrando o aumento da concentração de nitratos, sólidos suspensos, óleos e outras substâncias poluentes devido ao aumento das áreas urbanas e agrícolas nas bacias. Para bacias de abastecimento urbano, essa é uma das consequências mais preocupantes da alteração da cobertura do solo.

Alguns desses efeitos já estão sendo registrados na sub-bacia do rio Cascavel, desde o início da década, refletindo na perda de qualidade da água e na presença de contaminantes pesticidas organoclorados e organofosforados na sub-bacia (CEMBRANEL, 2017).

Em junho de 2014, fortes chuvas elevaram o nível do volume de água do Rio Cascavel, provocando enchente na área de captação. A água ultrapassou os diques de contenção e inundou todos os equipamentos que coletam e bombeiam a água, paralisando o processo de produção e de distribuição (SANEPAR, 2014).

Contudo, apesar de hipóteses e suposições de que tais impactos negativos podem ser ocasionados pelas alterações no uso do solo, não há estudos que comprovem isso. Para tanto, visando ao preenchimento de uma lacuna com comprovação científica, este trabalho objetivou desenvolver simulações hidrológicas que demonstrem a influência do uso e cobertura do solo nas vazões máximas da sub-bacia do rio Cascavel, com base em simulações hidrológicas feitas no modelo HEC-HMS, para apresentar resultados que auxiliem o planejamento urbano da região em estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do uso e cobertura do solo sobre as vazões máximas da sub-bacia hidrográfica do Rio Cascavel.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar a evolução da urbanização na sub-bacia do rio Cascavel, nos últimos 20 anos;
- Simular as vazões máximas para a sub-bacia, a partir dos cenários de urbanização obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização física de bacias hidrográficas

As características físicas de uma bacia hidrográfica têm influência direta sobre o balanço hidrológico resultante em sua área de abrangência. A área de drenagem, por exemplo, tem influência no volume escoado, pois, quanto maior a área, maior o volume; conseqüentemente, maior poderá ser o pico de enchente esperado (BORSATO E MARTONI, 2004).

O comprimento do canal principal, também de extrema importância para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas, está relacionado ao tempo de viagem da água ao longo de todo o sistema. O tempo de viagem da gota de água da chuva, que atinge a região mais remota da bacia até o momento em que atinge o exutório, é chamado de tempo de concentração (MELLO, 2019).

Ainda, segundo Mello (2019), a declividade do canal principal, definida como a taxa de decréscimo da cota ao longo do curso d'água, ou seja, o grau de inclinação que o curso d'água apresenta em relação a um eixo horizontal, influi na velocidade do escoamento e, em consequência, também no tempo de concentração da bacia.

A forma do canal de drenagem, determinada por diversos aspectos, como o gradiente topográfico, a largura e o equilíbrio entre deposição e erosão de sedimentos, também exerce influência sobre o fluxo. Isso oferece maior ou menor superfície de contato com a água e conseqüente fricção que promove ação de retardamento em direção contrária ao fluxo (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Em relação ao perfil transversal dos rios, a declividade do talude é decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água e, portanto, influencia a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, a erosão do solo, além da propagação de sedimentos (MINELLA e MERTEN, 2012).

Ainda, relativamente aos parâmetros físicos, o grau de desenvolvimento geomorfológico das bacias, refletido no gradiente topográfico dos rios, indica a predominância de processos de erosão ou sedimentação intensos no canal (ETCHEBEHERE *et al.*, 2005).

3.1.1 Utilização de águas superficiais de reservatórios para abastecimento público

Convencionalmente, para atender à necessidade de consumo humano, utiliza-se o armazenamento de águas superficiais em reservatórios. Embora os reservatórios sejam uma fonte confiável de água para atender às demandas, eles têm efeitos transformadores nos rios,

incluindo a fragmentação, mudança do regime fluvial, aumento da perda por evaporação e maior tempo de permanência (residência) da água (CARPENTER *et al.*, 2011).

Variações associadas à intervenção humana, usos da terra e aportes antropogênicos têm afetado significativamente a qualidade das águas (LIMA e ALVES, 2017), principalmente, em bacias com reservatórios, nas quais a tendência de acúmulo de sedimentos é maior (ZANIN *et al.*, 2017).

Lima *et al.* (2018) mostram o nível de degradação do reservatório de acúmulo para consumo na Bacia Hidrográfica do Açude Acarape do Meio, devido, entre outros fatores, às atividades agrícolas da região.

Comparando reservatórios de bacias urbanas e rurais, Souza e Gastaldini (2014) constataram que as concentrações de sólidos totais suspensos e turbidez foram maiores nas bacias com características rurais, devido às práticas agrícolas, enquanto baixas concentrações de OD e elevadas condutividade e concentrações de DBO, fosfato, nitrato e *Escherichia coli* foram observadas nas bacias hidrográficas com maior número de habitantes e percentual de impermeabilização. Conclui-se, portanto, que ambas as ocupações alteram negativamente a qualidade da água da bacia hidrográfica.

3.2 Classificação do solo do ponto de vista hidrológico

Dentre vários modelos que permitem avaliar o escoamento superficial, o do Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos da América (EUA), que considera o tipo e a cobertura do solo, é um dos mais utilizados na prática da engenharia para se estimar o escoamento superficial. Sua metodologia reúne os solos dos EUA em quatro grandes grupos: A (baixo potencial de escoamento); B (moderado potencial de escoamento); C (alto potencial de escoamento); D (muito alto potencial de escoamento). Entretanto, esse modelo não foi desenvolvido para solos tropicais, como os do Brasil (SARTORI, GENOVEZ e LOMBARDI, 2005).

O primeiro trabalho a tentar adaptar a classificação hidrológica do solo às características dos solos brasileiros foi o desenvolvido por Setzer e Porto (1979), no qual propunham cinco classes hidrológicas do solo para o Estado de São Paulo.

Posteriormente, Lombardi Neto *et al.* (1989) apresentaram uma abordagem para a classificação dos solos, a qual foi ampliada por Sartori, Genovez e Lombardi (2005), evidenciada na Tabela 1.

Tabela 1 Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras

Grupo hidrológico	Características	Solos
A	<p>Profundidade > 100 cm;</p> <p>Alta taxa de infiltração com alto grau de resistência e tolerância à erosão;</p> <p>Porosos com baixo gradiente textural;</p> <p>Textura média ou argilosa;</p> <p>Bem drenados;</p> <p>A textura dos horizontes superficial e sub superficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.</p>	<p>Latossolos Amarelo, Vermelho Amarelo e Vermelho, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macro porosidade; Latossolo Amarelo e Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
B	<p>Profundidade entre 100 e 200 cm;</p> <p>Moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão;</p> <p>Porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;</p> <p>Textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso ou argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil;</p> <p>Argila de atividade baixa;</p> <p>Textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.</p>	<p>Latossolo Amarelo e Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; Latossolo Bruno; Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico; Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
C	<p>Profundidade de 50 a 200 cm;</p> <p>Baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;</p> <p>Gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;</p> <p>Solos associados à argila de atividade baixa;</p> <p>Textura nos horizontes superficial e sub superficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.</p>	<p>Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou Argissolo Vermelho, Vermelho Amarelo e Amarelo, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; Cambissolo de textura média e Háplico ou Húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos; Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.</p>
D	<p>Profundidade menor que 50 cm;</p> <p>Taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão;</p> <p>Pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade;</p> <p>Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta);</p> <p>Solos orgânicos.</p>	<p>Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvisso; Plintossolo; Solos de Mangue; Afloramentos de Rocha; Demais cambissolos que não se enquadram no Grupo C; Argissolo Vermelho Amarelo e Amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta</p>

FONTE: Sartori, Genovez e Lombardi (2005).

3.3 Escoamento superficial

O escoamento superficial é uma variável chave para as fontes de água renováveis, que afeta diversos sistemas humanos e naturais (TANG e LETTENMAIER, 2012).

De acordo com Tuset, Vericat e Batalla (2016), a quantidade e intensidade das chuvas, juntamente com a cobertura do solo, propriedades do solo e características morfométricas da paisagem, controlam o volume de escoamento superficial e a erosão hídrica.

A quantificação do escoamento é crítica para estimar e controlar a poluição da água em regiões urbanas (WEI, HUBBART e ZHOU, 2018). Uma das formas mais utilizadas para se calcular o volume de escoamento superficial é o método do Número de Curva (CN), desenvolvido, em 1954, pelo SCS, para aplicação em pequenas bacias agrícolas, florestais e urbanas.

O método baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial, produzida em um evento de chuva de 24 horas, é função da lâmina precipitada e das perdas iniciais que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI *et al.*, 2008).

Considerando as características de cobertura e uso do solo, o grupo hidrológico do solo, tipo de tratamento e condição hidrológica, o valor do CN é tabelado e representa o percentual de escoamento superficial para um determinado evento de chuva (USDA, 1986). As Tabelas 2 e 3 apresentam os Números de Curva de escoamento superficial para áreas agrícolas e urbanas, respectivamente.

Tabela 2 Valores de CN para bacias com ocupação agrícola

Cobertura	Tratamento	Condição hidrológica	CN / Grupo hidrológico			
			A	B	C	D
Solo em repouso	Solo nu		77	86	91	94
	Cobertura de resíduos de culturas (CR)	Pobre	76	85	90	93
Culturas em linha	Linha reta (LR)	Boa	74	83	88	90
		Pobre	72	81	88	91
	CR + LR	Boa	67	78	85	89
		Pobre	71	80	87	90
	Contorneada (C)	Boa	64	75	82	85
		Pobre	70	79	84	88
	C + CR	Boa	65	75	82	86
		Pobre	69	78	93	87
	Contorneada e terraço (CT)	Boa	64	74	81	85
		Pobre	66	74	80	82
	CT + CR	Boa	62	71	78	81
		Pobre	65	73	79	81
		Boa	61	70	77	80

Grãos pequenos	LR	Pobre	65	76	84	88	
		Boa	63	75	83	87	
	LR + CR	Pobre	64	75	83	86	
		Boa	60	72	80	84	
	C	Pobre	63	74	82	85	
		Boa	61	73	81	84	
	C + CR	Pobre	62	73	81	84	
		Boa	60	72	80	83	
	CT	Pobre	61	72	79	82	
		Boa	59	70	78	81	
	CT + CR	Pobre	60	71	78	81	
		Boa	58	69	77	80	
	Leguminosas de semeadura ou difusão ou prado de rotação	LR	Pobre	66	77	85	89
			Boa	58	72	81	85
C		Pobre	64	75	83	85	
		Boa	55	69	78	83	
CT		Pobre	63	73	80	83	
		Boa	51	67	76	80	

Nota: A - Solos arenosos com menos de 8% de argila, B - Solos arenosos com menos de 15% de argila, C - Solos argissolos associados à argila de atividade baixa e D - Solos argissolos associados à argila de atividade alta.

Fonte: USDA (1986).

Tabela 3 Valores do CN para bacias com ocupação urbana

Tipo de cobertura e condição hidrológica	% de área impermeável	CN / Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desenvolvidas					
Espaço aberto:					
Mau estado (cobertura de grama <50%)		68	79	86	89
Condição razoável (cobertura de grama de 50% a 75%)		49	69	79	84
Bom estado (cobertura de grama > 75%)		39	61	74	80
Áreas impermeáveis:					
Parques de estacionamento pavimentados, telhados, calçadas, etc.		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentadas com galeria pluvial		98	98	98	98
Pavimentadas com valas abertas		83	89	92	93
Cascalho		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89
Distritos urbanos:					
Comercial e de negócios	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93

Distritos residenciais por tamanho médio dos lotes:

≤ 505,8 m ²	65	77	85	90	92
Entre 505,8 m ² e 1.011,7 m ²	38	61	75	83	87
Entre 1011,7 m ² e 1.348,95 m ²	30	57	72	81	86
Entre 1.348,95 m ² e 2.023,43 m ²	25	54	70	80	85
≥ 4.046,85 m ²	20	51	68	79	84

Nota: A - Solos arenosos com menos de 8% de argila, B - Solos arenosos com menos de 15% de argila, C - Solos argissolos associados à argila de atividade baixa e D - Solos argissolos associados à argila de atividade alta.

Fonte: USDA (1986).

O aumento no volume de escoamento superficial reflete no aumento da vazão de pico da bacia hidrográfica (ALVES E FORMIGA, 2019), causando a diminuição na recarga das águas subterrâneas (POFF *et al.*, 2006), assoreamento dos corpos hídricos (GALIANO *et al.*, 2021) e a possibilidade de geração de grandes cheias, que podem ter como consequência inundações e erosão do solo (SILVA *et al.*, 2013).

3.4 Urbanização e impermeabilização do solo

O processo de urbanização de muitas cidades brasileiras ocorreu ao longo das margens dos rios e ocasionou consequências prejudiciais para os corpos d'água, à qualidade do ar, solo, fauna e flora da região (FENDRICH E OLIYNIK, 2002).

A ocupação urbana intensa resulta na diminuição do índice de permeabilidade do solo, gerada pela pavimentação crescente que sempre acompanha o desenvolvimento urbano de uma região. Em consequência, o sistema de drenagem pode sofrer sobrecargas, uma vez que a capacidade de infiltração do solo é alterada, visto que a pavimentação aumenta a velocidade de escoamento, bem como as vazões de pico (SANTOS, RUFINO e BARROS, 2017).

Com o objetivo de quantificar os acréscimos nas vazões de cheia decorrentes dos avanços da urbanização, Bastos (2009) realizou um estudo na Bacia do Córrego dos Monos, Cachoeiro de Itapemirim-ES, no qual foi possível observar como instrumentos de uso e ocupação do solo podem incrementar expressivamente os picos de enchentes, tendo significativo efeito negativo sobre o sistema hidrológico da região.

Dias *et al.* (2015) também alertam para essa realidade, após estudo realizado na cidade de Ji-Paraná-RO, no qual se constatou que, de acordo com o aumento da fração impermeável da bacia, o tempo de concentração da chuva é reduzido, pois a água que cai no ponto mais distante da bacia chegará mais rápido ao exutório, o que resulta em vazões mais elevadas.

Segundo censo do IBGE (2020), a população do Município de Cascavel-PR cresceu

de 286.205 pessoas, em 2010, para 332.333, em 2020, o que aumentou aproximadamente 16% a densidade demográfica da cidade. Essa concentração populacional gera implicações sobre a bacia hidrográfica do rio Cascavel, responsável pela captação e abastecimento da cidade, mediante adução de água do rio Cascavel.

A área da sub-bacia do Rio Cascavel apresenta alta fragilidade, devido à presença de nascentes e reservatórios; à área rural, que apresenta uso agrícola intenso e baixa reserva de matas nativas e ciliares (COVATTI, 2006); e à presença da Rodovia Federal BR 277, que cruza a região da sub-bacia, constituindo um ponto crítico, uma vez que acidentes com cargas perigosas são passíveis de comprometer o abastecimento de água da cidade.

3.5 Geoprocessamento

Com o avanço da Infraestrutura cibernética, uma quantidade crescente de funções de geoprocessamento está disponível na Web, sendo frequentemente usadas para orquestrar serviços distribuídos, a fim de enfrentar problemas geoespaciais complexos (ZHANG *et al.*, 2020). Sendo assim, atualmente, os cientistas ambientais dependem fortemente de serviços de geoprocessamento para modelagens ambientais (SUN, DI e GAIGALAS, 2019).

O emprego de geotecnologias para análise temporal de interferências dos processos urbanos em variáveis ambientais, alteradas em função do desmatamento da cobertura vegetal e ocupação desordenada do solo, contribui para a tomada de decisão nos níveis de planejamento e gestão ambiental urbana (GUTIERREZ *et al.*, 2011).

Segundo Louzada *et al.* (2009), o Sistema de Informações Geográficas e o Sensoriamento Remoto representam importantes ferramentas para estudos aplicados ao mapeamento de uso do solo e para delimitação de bacias hidrográficas, fornecendo apoio a grande número de pesquisadores em trabalhos com informações sistematizadas, que proporcionam uma análise da área de estudo em bom nível de detalhes, sem onerar e tornar prolongada a pesquisa.

Dentro da área de obtenção de parâmetros utilizados em modelos hidrológicos, temos, hoje, vários programas de processamento digital de imagens (PDI), gratuitos e pagos, que, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), possibilitam a extração de características morfométricas quantitativas (ALTAF, MERAJ e ROMSHOO, 2013), como: ordem, comprimento dos rios e razão de bifurcação; aspectos de área da bacia de drenagem e aspectos de relevo da rede do canal e declive do solo (KABITE e GESSESSE, 2018).

3.6 Modelos hidrológicos

A hidrologia no contexto de bacias hidrográficas busca conceituar e modelar diferentes processos que interagem, sob condições ambientais, variáveis no espaço e no tempo (SCHULER, 2003).

Os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação, que cai sobre a bacia, em vazão, numa determinada seção de um rio (ALMEIDA E SERRA, 2017). Em escala global, são usados, rotineiramente, para avaliar a escassez de água, riscos de enchentes e secas em todo o mundo (ZAHERPOUR *et al.*, 2018).

De acordo com Aguiar (2017), modelos hidrológicos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos inerentes na bacia hidrográfica, compreendida como um sistema que se utiliza das equações da conservação da massa e de quantidade de movimento, na forma completa ou simplificada.

Por tratarem da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica, os modelos hidrológicos requerem dados de entrada baseados nas características topográficas da região de estudo, tais como: limites das bacias e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento de rampa, forma do declive, orientação das vertentes, características dos canais de drenagem e conexões entre áreas que definirão como a água se move através da paisagem (MOORE *et al.*, 1993).

Para a simulação hidrológica de vazões, é necessário conhecer também o tipo de solo da região e sua ocupação, além dos dados de precipitação.

3.6.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos

Para sistematizar o estudo dos modelos hidrológicos utilizados na engenharia, autores clássicos da hidrologia, como Righetto (1998), Tucci (1998) e Linsley (1949), sintetizaram a classificação, conforme representado na Figura 1.

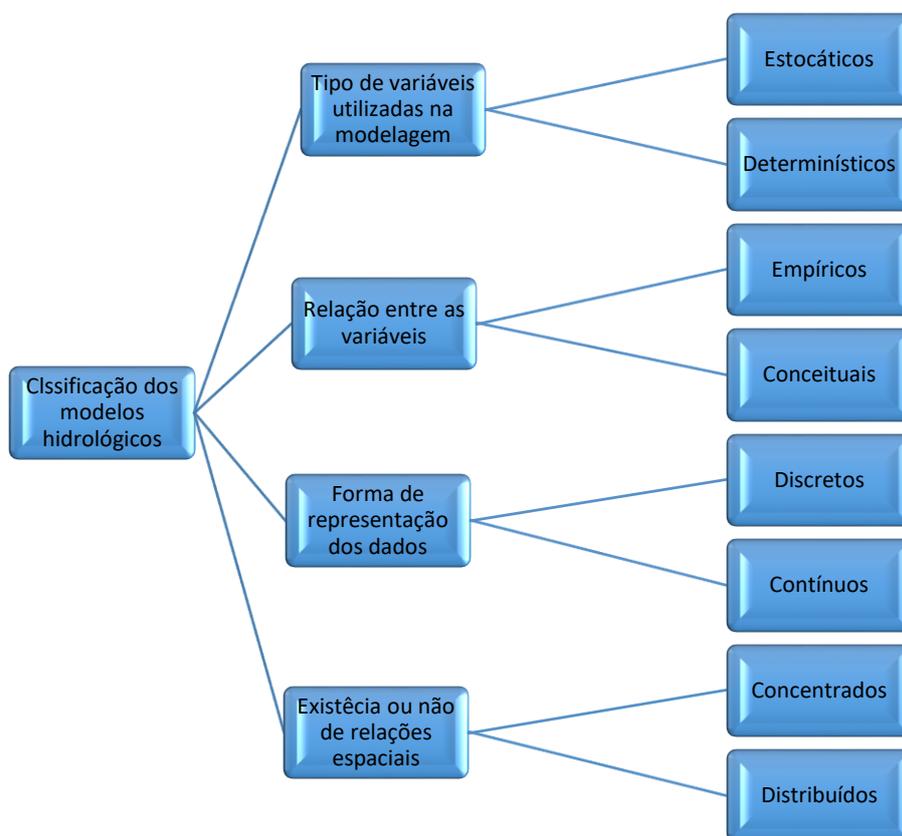


Figura 1 Classificação dos modelos hidrológicos

Modelo estocástico ou determinístico: um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados, durante a elaboração de um modelo, ele será denominado determinístico (CLARKE, 1973).

Concentrado ou distribuído: o modelo é compreendido como concentrado quando não considera a variabilidade espacial da bacia. Já o modelo é considerado distribuído, quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo (SANTOS, 2009).

Ainda segundo Santos (2009), os modelos são ditos conceituais quando consideram os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos, são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

Modelo discreto ou contínuo: um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva a modelagem de períodos isolados da série, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes, contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes (RENNÓ E SOARES, 2003).

3.6.2. Principais aplicações dos modelos hidrológicos

Do ponto de vista agrícola, a simulação hidrológica em bacias hidrográficas representa uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, principalmente para a caracterização das vazões de outorga a projetos de irrigação (VIOLA *et al.*, 2009).

A fim de controle e gestão de bacias hidrográficas, os modelos hidrológicos podem ser aplicados para simulação de vazões e descargas sólidas (SIMÕES *et al.*, 2021), estimativa do balanço sedimentar (PAIM e DE MENEZES, 2009) e previsão de cenários de planejamento (CALDEIRA *et al.*, 2015).

No planejamento urbano, a utilização dos modelos hidrológicos também se volta para a previsão e verificação dos efeitos causados à rede hidrográfica, a partir da ação antrópica no relevo (MATHIAS *et al.*, 2020), uso e cobertura do solo da bacia (LEKULA E LUBCZYNSKI, 2019) e para a previsão e espacialização das áreas inundáveis (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Por fim, segundo Lou (2010), devido à facilidade de operação e custo, é comum a utilização de modelos para análise de consistência e preenchimento de falhas, visto que é normal existirem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Portanto, com base no modelo, é possível, após o ajuste, estender a série de vazão com base na precipitação. O modelo também é utilizado para analisar a consistência da curva-chave, dos níveis e precipitações observados, além de permitir a verificação de alterações no rio e na bacia.

3.7 O Modelo HEC – HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS – Hydrologic Modeling System é um software que foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – U.S. Army Corps of Engineers), utilizado para modelar processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas (USACE-HEC, 2008).

Considerando os critérios da Figura 01, o HEC-HMS é um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico. O HEC-HMS assume que toda a bacia hidrográfica é um grupo interligado de áreas e os parâmetros, assim, refletem as condições médias dentro desse conjunto de áreas (SOUZA, 2012).

É composto por diferentes módulos hidrológicos, os quais simulam o processo de transformação da precipitação, que ocorre na bacia hidrográfica, em escoamento superficial (SANTOS, 2017). De acordo com Fleming e Brauer (2016), esses módulos são definidos como:

a) Modelo de bacia: composto por elementos hidrológicos da bacia que devem ser fornecidos para o programa com o propósito de converter condições atmosféricas em fluxo

em locais específicos na bacia hidrográfica, os quais são: sub-bacias (quando houver), alcance, junção, fonte, exutório, reservatório e desvio. Mapas de fundo podem ser usados para ajudar a acoplar os elementos em um contexto espacial.

b) Modelo meteorológico: o modelo de meteorologia calcula a entrada de precipitação necessária por elemento de sub-bacia. O *software* disponibiliza várias opções de modelos matemáticos para a determinação da infiltração e do escoamento superficial, a fim de serem escolhidos de acordo com os dados disponíveis e as características das bacias.

c) Especificações de controle: as especificações de controle são um dos principais componentes de um projeto. Seu principal objetivo é controlar quando as simulações começam e param, além de qual intervalo de tempo é usado na simulação. As simulações realizadas, neste estudo, têm caráter pontual de obtenção dos picos de vazão para cada cenário analisado, fazendo com que os valores adotados tenham intuito apenas de obter todos os detalhes das respostas da bacia sobre a distribuição das vazões.

d) Componentes de dados de entrada: dados de séries temporais, dados de pareamento e dados em grade são frequentemente necessários como parâmetro ou condições de limite em modelos de bacia e meteorologia. Os dados de entrada podem ser inseridos manualmente ou referenciados a um registro existente em um arquivo HEC-DSS.

Apesar de apresentar interface gráfica que permite uma utilização fácil e intuitiva, o operador necessita ter conhecimentos e suscetibilidade quanto aos métodos a serem seguidos (TAVARES E CASTRO, 2005).

3.7.1 Aplicações

O modelo HEC-HMS foi inicialmente desenvolvido para suprir estudos conduzidos pelo próprio Hydrologic Engineering Center, tais como: inundações em centros urbanos, frequência de inundações, perdas por enchentes, além de dimensionamento e operação de reservatórios. Uma vez que o modelo apresenta resultados satisfatórios, em termos de simulação de vazões e no traçado do hidrograma (MILDE *et al.*, 2002), diversas pesquisas têm sido conduzidas com sua utilização.

O modelo permite realizar simulação de evaporação, precipitação e escoamento em bacias hidrográficas, sendo bastante requisitado para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, simulação de vazões de projeto para inundações, em cenários atuais e tendenciais. O modelo de bacia inclui métodos para o cálculo de perdas de precipitação, transformação da precipitação em escoamento e do escoamento em canais. Os elementos hidrológicos considerados são as sub-bacias, trechos d'água, junções, derivações, reservatórios, fontes e as depressões (SANTOS, 2017).

A Tabela 4 apresenta alguns trabalhos que foram desenvolvidos utilizando o HEC-HMS como ferramenta de modelagem hidrológica para fins semelhantes ao deste estudo.

Tabela 4 Exemplo de trabalhos que utilizaram o HEC-HMS para modelagem hidrológica

Referência	Título	Objetivo resumido
Halwatura e Najim (2013)	Aplicação do modelo HEC-HMS para simulação de escoamento em uma captação tropical	Calibrar e validar o modelo HEC-HMS para a captação do rio Attanagalu Oya por diferentes abordagens para gerar dados de fluxo de longo prazo.
Aguiar (2017)	Simulações hidrológicas de cenários de uso e ocupação do solo no alto vale da bacia hidrográfica do rio Marrecas (PR).	Compreensão do comportamento hidrológico do escoamento superficial da bacia delimitada pelo alto vale do rio Marrecas à montante do perímetro urbano de Francisco Beltrão, sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo.
Santos (2017)	Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP.	Quantificar a produção de água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés por meio da Modelagem Hidrológica HEC-HMS associada a um Sistema de Informações Geográficas.
Koneti, Sunkara e Roy (2018)	Modelagem hidrológica em relação ao impacto do uso da terra na bacia do rio Godavari usando o modelo HEC-HMS.	Avaliar o impacto do uso e ocupação do solo sobre a disponibilidade de recursos hídricos na bacia do rio Godavari.
Ranka et al (2019)	Rainfall-runoff simulations in the Lukovska River Basin with the HEC-HMS model	Descrever uma aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS para simulações de hidrogramas de cheias na bacia do rio Lukovska.

3.8 Dados de precipitação

As precipitações pluviométricas constituem a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica. A quantificação e o conhecimento de como se distribuem temporal e espacialmente são importantes para o desenvolvimento de estudos relacionados à disponibilidade hídrica, controle de inundações, sedimentometria, erosão do solo, dimensionamento de estruturas hidráulicas, entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Incluso no conceito de chuva intensa, deve-se considerar que, quanto menor for a duração de uma precipitação, maiores são as chances de que tenha sido muito intensa e, quanto maior for a frequência da chuva, maior será a probabilidade de sua ocorrência. Dessa forma, na análise da chuva intensa, deve-se considerar a inter-relação das variáveis IDF: Intensidade – Duração – Frequência (SANTOS, 2017).

A definição das relações IDF encontra limitações decorrentes da escassez de dados

pluviográficos que abranjam toda a amplitude das redes pluviométricas, além de demandar um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de grande quantidade de dados (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Como alternativa, foram desenvolvidas algumas técnicas de obtenção de chuva de menor duração, a partir da chuva de um dia, obtida de pluviômetro (SILVA e OLIVEIRA, 2017), a exemplo da desagregação de chuvas de 24 horas, proposta pelo DAEE-CETESB (1980). A metodologia consiste no emprego de coeficientes para transformar a precipitação pluviométrica diária, medida em pluviômetros, em chuvas de menor duração.

Caminha *et al.* (2020) utilizaram o método de desagregação de chuvas CETESP para a determinação das relações intensidade-duração-frequência das precipitações, em algumas localidades de Minas Gerais, de maneira que obtiveram bons resultados quando comparadas com as relações IDF, propostas por Pinto (1995).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A cidade de Cascavel-PR está situada no Terceiro Planalto do Estado do Paraná, na região Oeste Paranaense, com uma altitude média de 781 metros. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, Cascavel situa-se na região de clima subtropical úmido, com verão quente e temperaturas superiores a 22°C nessa estação (APARECIDO *et al.*, 2016).

Já o solo do município, é formado predominantemente por Latossolos Vermelhos e Nitossolos (EMBRAPA, 2011).

Com área de 2.101,074 km², conta com a décima segunda maior população da Região Sul; é sede da Região Metropolitana de Cascavel, capital regional do Oeste do Paraná e polo estratégico do Mercosul (IBGE, 2020).

Com uma área de 50,31 km², a localização geográfica da sub-bacia está entre os paralelos 24°32 e 25°17 de Latitude Sul e os meridianos 53°05 e 53°50 de Longitude Oeste. A região em estudo faz parte da Bacia hidrográfica do Rio Cascavel, sendo delimitada pela área de captação de água para o abastecimento da cidade de Cascavel-PR.

A sub-bacia nasce na região do Lago Municipal, situado no Parque Ecológico Paulo Gorski, abrangendo parte do perímetro urbano da cidade, área rural, a qual é atravessada pela Rodovia Federal BR 277 e tem seu exutório a 50 m do ponto de coleta para a estação de tratamento de água da cidade.

A delimitação aproximada da sub-bacia com a indicação do seu exutório está representada na Figura 2.

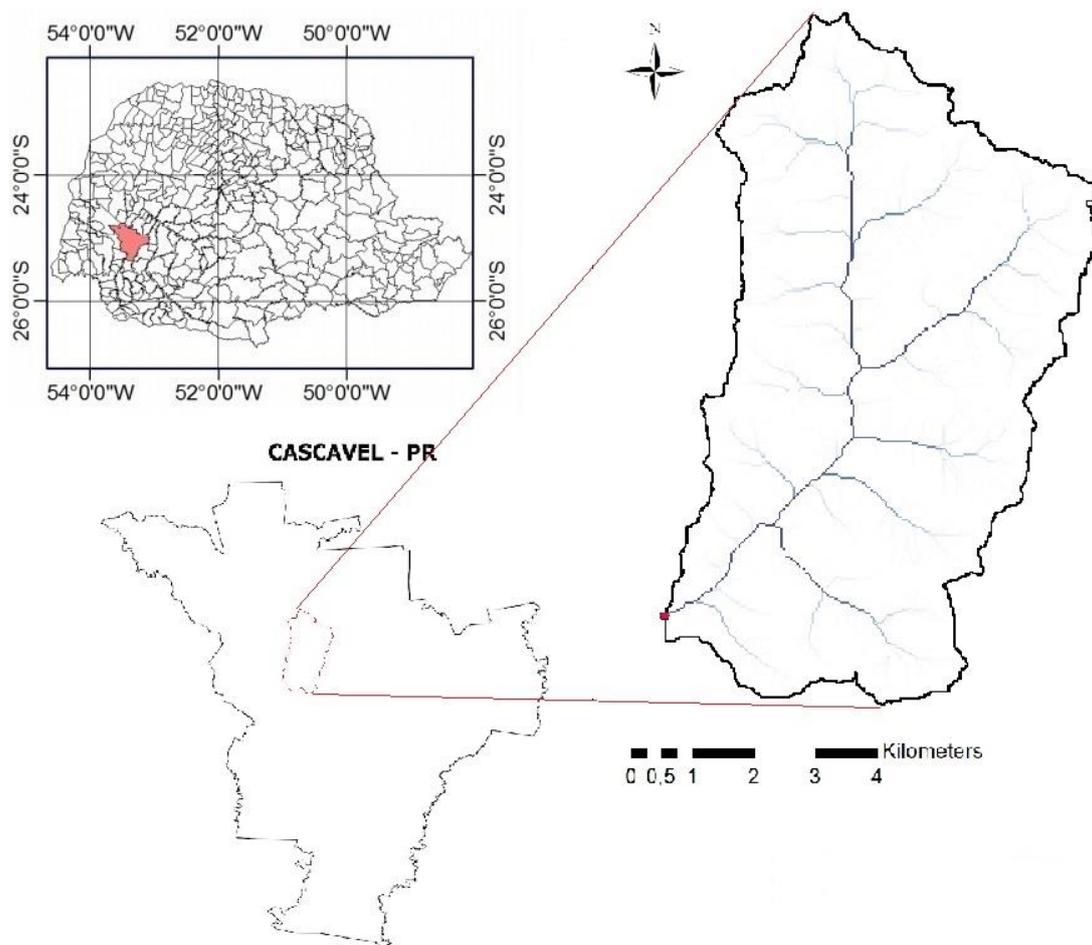


Figura 2 Localização da sub-bacia no município de Cascavel-PR (Datum WGS 84).

4.1.1 Classificação do solo na região de estudo

Segundo levantamento feito pela EMBRAPA, em 2011, na cidade de Cascavel, no Paraná, foram encontrados os seguintes tipos de solos: Gleissolo, Latossolo, Neossolo e Nitossolo, sendo que a microbacia do Rio Cascavel está totalmente dentro da predominância do latossolo, conforme Figura 3.

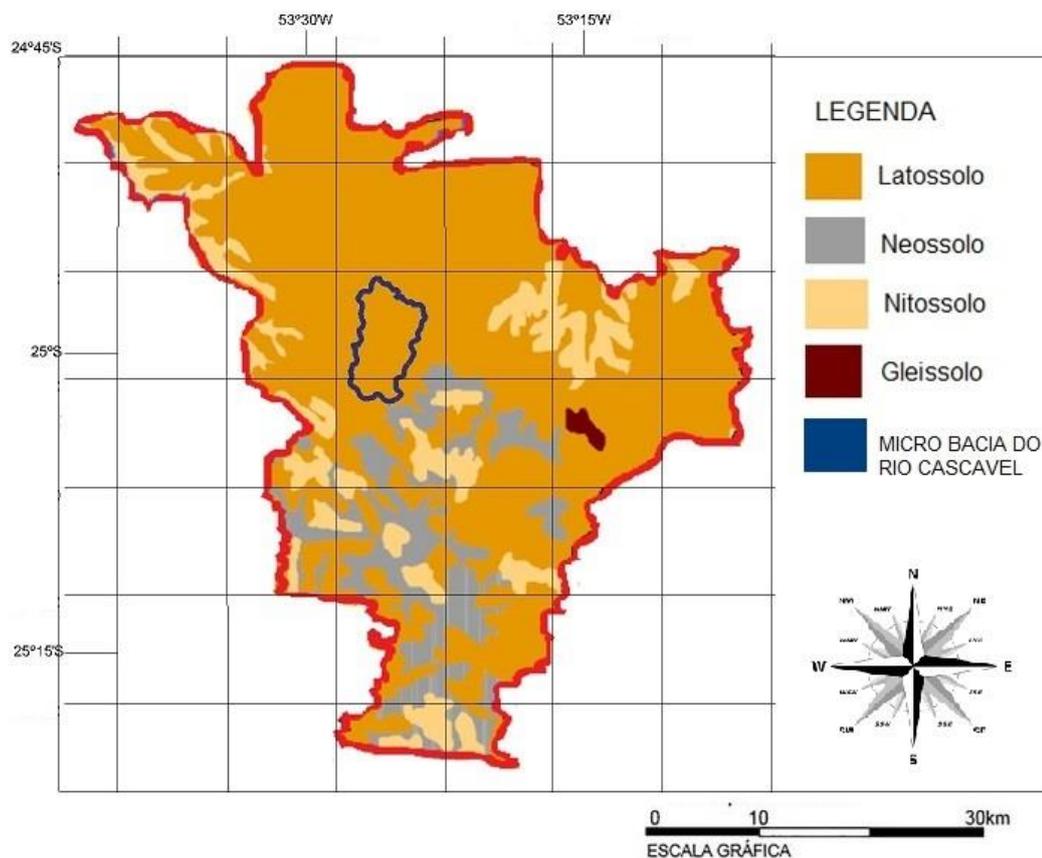


Figura 3 Mapa dos solos de Cascavel-PR (Datum WGS 84).
Fonte: EMPRAPA (2011).

4.2 Morfometria da bacia

As características físicas da bacia foram definidas utilizando o software ArcGis 10.1, juntamente com as extensões Archydro e HEC-GeoHMS 10.1, nos quais foram determinados os parâmetros morfométricos da bacia, a partir do MDE gerado pelo SRTM e disponibilizadas pelo USGS, com base no site Topodata, com resolução espacial de 30 m.

A área de estudo delimitada, no rio Cascavel, foi escolhida por ser região de coleta de água pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), para abastecimento público de grande parte da cidade de Cascavel-PR.

Utilizaram-se as ferramentas de extensão Arc Hydro, dentro do ArcGis, para delimitação da microbacia e criação de um vetor do limite para recorte da imagem.

Após o recorte da imagem, foram aplicados os comandos presentes na aba *Terrain Preprocessing* para preparar o arquivo e dividir a sub-bacia em 11 novas sub-bacias, a fim de aumentar a precisão dos resultados. A divisão é feita de forma automática pelo programa, definindo-se apenas a área máxima desejada para cada unidade.

Elaborado para interligar o HEC-HMS com tecnologias SIG, o HEC-GeoHMS foi

utilizado para determinação dos parâmetros topográficos dos rios e sub-bacias (SANTOS, 2017), como: comprimento e declividade dos rios, declividade das sub-bacias, ponto mais distante de drenagem das sub-bacias e centroides.

A largura do rio e a declividade do talude foram medidas em campo, sendo que foram medidos dois pontos amostrais para cada sub-bacia, totalizando 22 pontos. A média entre os pares de dados amostrais foi feita para determinar os parâmetros largura e declividade do talude para o rio no interior de cada sub-bacia.

4.3 Dados de precipitação

4.3.1 Tempo de concentração

Foram definidas três equações para cálculo do tempo de concentração das sub-bacias, sendo que o valor final utilizado foi a média aritmética entre os três tempos obtidos. As equações escolhidas foram desenvolvidas para bacias entre 50 e 4000 km², predominantemente rurais, que consideram diferentes parâmetros das bacias para a obtenção do tempo de concentração (SILVEIRA, 2005). Foram elas:

Equação de Johnstone, adaptada e analisada por USDA (1973):

$$t_c = 3.258 \left(\frac{L}{S} \right)^{0,5} \quad \text{Eq. (1)}$$

Equação de DNOS, adaptada e apresentada por Mello (1973):

$$t_c = \frac{0,419 * A^{0,3} * L^{0,2}}{K * S^{0,4}} \quad \text{Eq. (2)}$$

E, por fim, a equação de SCS Lag, Kibler (1982):

$$t_c = \frac{0,057L^{0,8} * \frac{1000}{CN-9}^{0,7}}{S^{0,5}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Nas quais:

T_c - Tempo de concentração, em min;

L - Comprimento do talvegue, em km;

CN – Número da curva, adimensional;

A – Área da bacia, em km²;

K – Fator adimensional relacionado ou tipo de solo;

S - Declividade longitudinal, em m/m

4.3.2 Definição dos eventos de precipitação

Para compor o modelo meteorológico de entrada no HEC-HMS, foram determinadas chuvas para eventos máximos, utilizando a equação de chuvas intensas para o município de Cascavel, desenvolvida por Longo *et al.* (2006), com base na distribuição Gumbel pelo método de desagregação de chuvas, com uma série de 24 anos (1972-1996), descrita na Equação 4.

$$i = \frac{778,54 \cdot T_r^{0,1729}}{(t_d + 9,65)^{0,7204}} \quad (4)$$

Nessa equação, T_r representa o tempo de retorno, em anos, e t_d o tempo de duração do evento de chuva, em minutos, que quer se calcular a intensidade (i) em mm.

Os períodos de retorno de precipitação foram definidos, a fim da obtenção de uma boa representação das probabilidades de ocorrência de eventos extremos, de baixa intensidade, porém, com alta frequência, como o período de retorno de 5 anos, até eventos de grande intensidade com baixa frequência de ocorrência, como o de 100 anos. Sendo assim, as precipitações foram geradas para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

O tempo de duração da precipitação foi definido como sendo o valor do maior tempo de concentração obtido entre todas as sub-bacias.

Para a construção dos hietogramas, foi calculada a intensidade de precipitação de chuvas com intervalos de 1 minuto entre cada uma que, posteriormente, foram distribuídas pelo método dos blocos alternados e tiveram seus valores adicionados diretamente no HEC-HMS.

4.4 Determinação do Número de Curva (CN)

Foram selecionadas imagens de satélite dos anos de 1999, 2009 e 2019 para a classificação do uso e cobertura do solo, sendo que todas as imagens são do mesmo mês do ano para que não haja influência da sazonalidade agrícola na cobertura da terra, conforme demonstrado por Aguiar *et al.* (2019).

Foi escolhido o mês de agosto para a seleção das imagens, por ser um dos meses nos quais foi encontrado melhor qualidade de imagens no banco de dados para os três anos em estudo. As imagens utilizadas foram escolhidas com menos de 10% de cobertura de nuvens dos satélites Landsat L5 e L7, com resolução espacial de 30 m.

Para a delimitação da área de abrangência da bacia e recorte da imagem, foi utilizado o vetor criado no ArcGIS para a região. A composição falsa cor utilizada foi 5-4-3 em R-G-B,

para as imagens de 1999 e 2009, e RGB-564, para a de 2019, sendo as que apresentaram maior contraste na imagem, possibilitando uma melhor classificação.

A classificação das imagens foi realizada de forma supervisionada no *software* ArcGis 10.1, coletando-se amostras de cada classe. Para a classificação da cobertura do solo, foram definidas 5 classes: vegetação nativa, água, agricultura, solo exposto e área edificada, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 Descrição das classes de uso e cobertura do solo

Classe	Descrição
Vegetação	Áreas com vegetação nativa e reflorestamento
Água	Rios, lagos e açudes
Agricultura	Áreas de plantio e terrenos com vegetação rasa, incluindo grama
Solo exposto	Solo nu, sem vegetação
Área edificada	Áreas edificadas, asfalto e calçadas

A análise visual e a fotointerpretação das imagens permitiram a classificação e o mapeamento dos elementos da paisagem, bem como facilitaram a análise multitemporal do uso e ocupação do solo de acordo com elementos como cor, tom, textura, forma, tamanho, presença de sombras, brilho e localização da infraestrutura (TAVARES *et al.*, 2012; WAN *et al.*, 2015).

As 5 classes foram combinadas com o tipo de solo da região para a determinação do CN de cada área, conforme classificações apresentadas nas Tabelas 2 e 3. Como a área da Bacia encontra-se totalmente em uma única classe de solo, 5 diferentes CNs foram obtidos.

Tabela 6 Valores do Número de Curva para cada Classe de solo

Classe de solo	CN
Área agrícola	66
Água	100
Vegetação nativa	20
Solo exposto	49
Área urbana	81

Os três mapas temáticos foram associados aos modelos criados anteriormente (1999, 2009 e 2019). O cálculo final do CN médio para cada sub-bacia foi feito com auxílio da ferramenta “Generante CN Grid” do HEC-GeoHMS.

4.5 Seleção dos métodos de cálculo – HEC-HMS

Os métodos para cálculo dentro do HEC-HMS foram escolhidos com base na disponibilidade de informações sobre os canais de drenagem e a bacia, os quais são descritos a seguir, conforme Manual de Referência de Técnicas (USACE-HEC, 2000) do programa.

4.5.1 Método de perdas

As perdas por infiltração foram calculadas pelo método do Número de Curva, no qual podemos definir a porcentagem da chuva que escoar e, conseqüentemente, o restante, que infiltra, utilizando a Equação 5.

$$P_e = (P - I_a) / 2(P - I_a) + S \quad (5)$$

Em que P_e = excesso de precipitação acumulada no tempo t ; P = chuva acumulada no tempo t ; I_a = a abstração inicial (perda inicial); e S = retenção máxima potencial, uma medida adimensional da capacidade de uma bacia hidrográfica de abstrair e reter a precipitação pluvial, calculada pela Equação 6.

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (6)$$

4.5.2 Método de transformação

Para a transformação de precipitação efetiva em escoamento superficial, foi utilizado o método do Hidrograma Unitário Adimensional do SCS, no qual o pico e a hora de pico do evento de precipitação estão relacionados pela Equação 7:

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (7)$$

Em que A = área da bacia hidrográfica, C = constante de conversão (2,08 no SI) e T_p o tempo de pico, relacionado à duração da unidade de excesso de precipitação, como:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (8)$$

Assim, Δt é a duração do excesso de precipitação e T_{lag} o tempo de retardo, obtido pela Equação 9.

$$T_{lag} = 0,6T_c \quad (9)$$

4.5.3 Fluxo do Canal

Como entrada para a propagação da onda no canal, foi definido o método de “Muskingum-Cunge”, baseado na solução da equação de continuidade, equação 09, na qual os índices superiores se referem a instantes de cálculo e os inferiores, a seções de cálculo, conforme a discretização no tempo e no espaço, esquematizada na Figura 4. Nessa equação, Q é a vazão, na seção s (ou $s+1$) no instante t (ou $t+1$).

$$Q_s^{t+1} \cdot C_0 + Q_s^t \cdot C_1 + Q_{s+1}^t \cdot C_2 = Q_{s+1}^{t+1} \quad (10)$$

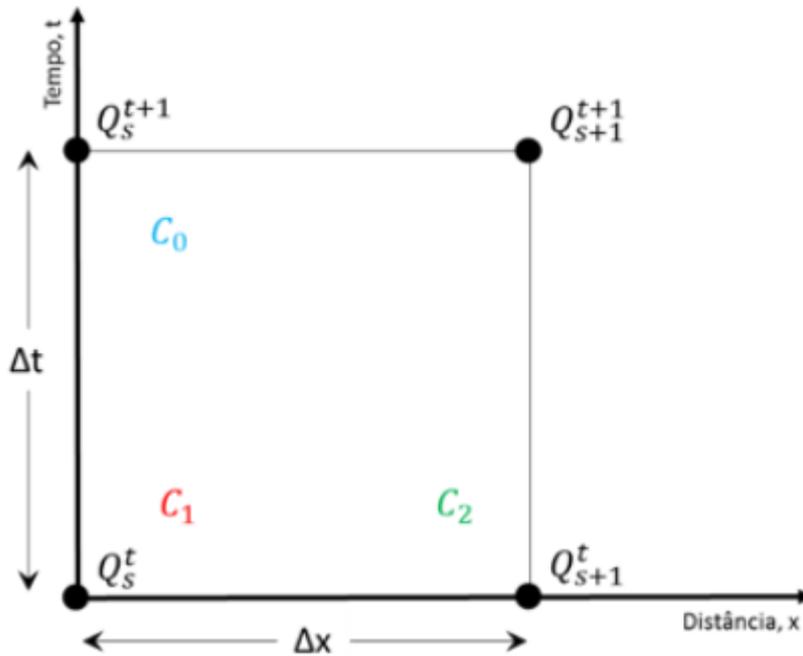


Figura 4 Esquematização do método Muskingum-Cunge

Assim, C_0 , C_1 e C_2 são coeficientes que dependem da velocidade média do escoamento da vazão da seção.

4.7 Simulação hidrológica

O modelo da bacia gerado no ArcMap foi importado no HEC-HMS juntamente com as características obtidas com o auxílio da extensão HEC-GeoHMS.

Cinco modelos meteorológicos foram criados, um para cada tempo de retorno definido *a priori*, sendo os dados de precipitação unitária inseridos, de forma manual, em cada modelo, utilizando a opção de hidrograma unitário.

Por fim, para as especificações de controle, que determinaram os intervalos das simulações, como data, hora de início e fim, definiram-se eventos de chuva de 10 minutos para cada tratamento.

Foram criadas e rodadas 5 simulações para cada cenário de uso e cobertura do solo, sendo uma para cada período de retorno de chuva adotado, totalizando 15 simulações. Como resultados das simulações, obteve-se a vazão de pico em cada elemento hidrológico das parcelas da sub-bacia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A distribuição hídrica da sub-bacia, divisão e nomenclatura das 11 unidades territoriais, geradas pelo HEC-GeoHMS, são apresentadas na Figura 05.

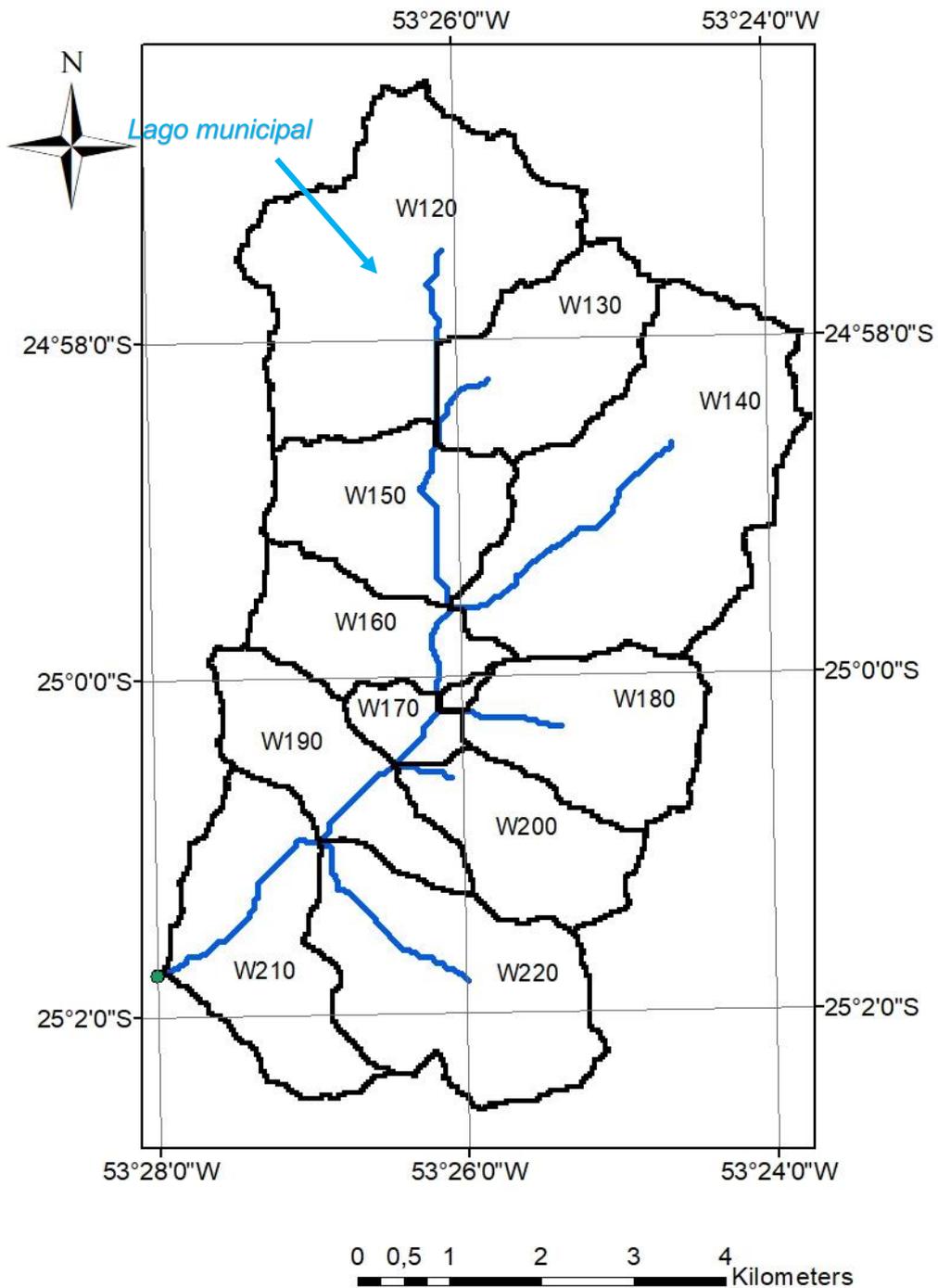


Figura 5 Rede hidrográfica, divisão da sub-bacia e ponto exutório (Datum WGS 84).

Os atributos obtidos para as divisões da sub-bacia e rio são apresentadas nas Tabelas

7 e 8.

Tabela 7 Atributos das 11 parcelas territoriais da sub-bacia

Nome	Perímetro (m)	Área (m ²)	Área (km ²)	Tc (min)	Declividade (%)
W120	18120	8572500	8,5725	2,18	6,638
W130	10500	3759300	3,7593	1,85	6,790
W140	17700	9306000	9,3060	1,85	7,302
W150	10500	3835800	3,8358	2,18	8,996
W160	10380	2732400	2,7324	1,53	10,512
W170	6960	990900	9,9090	0,76	12,403
W180	10440	3842100	3,8421	1,71	8,712
W190	11640	3195000	3,1950	1,57	10,348
W200	9840	3034800	3,0348	2,23	9,085
W210	13260	4573800	4,5738	2,15	10,588
W220	13680	5980500	5,9805	1,96	11,224

Tabela 8 Atributos canais

Nome	Comprimento (m)	Elevação a montante (m)	Elevação a jusante (m)	Declividade (%)
R10	2287,90	708	692	0,69
R20	1070,33	699	692	0,65
R30	2028,82	692	649	2,11
R40	3348,74	709	649	1,79
R50	1259,11	649	632	1,35
R60	1397,13	665	632	2,36
R70	811,25	632	636	0,49
R80	694,70	638	636	0,28
R90	1210,66	636	626	0,82
R100	2582,05	626	617	0,35
R110	2508,56	650	626	0,95

As classificações de cobertura do solo para os três cenários podem ser verificadas na Figura 6 e na Tabela 9.

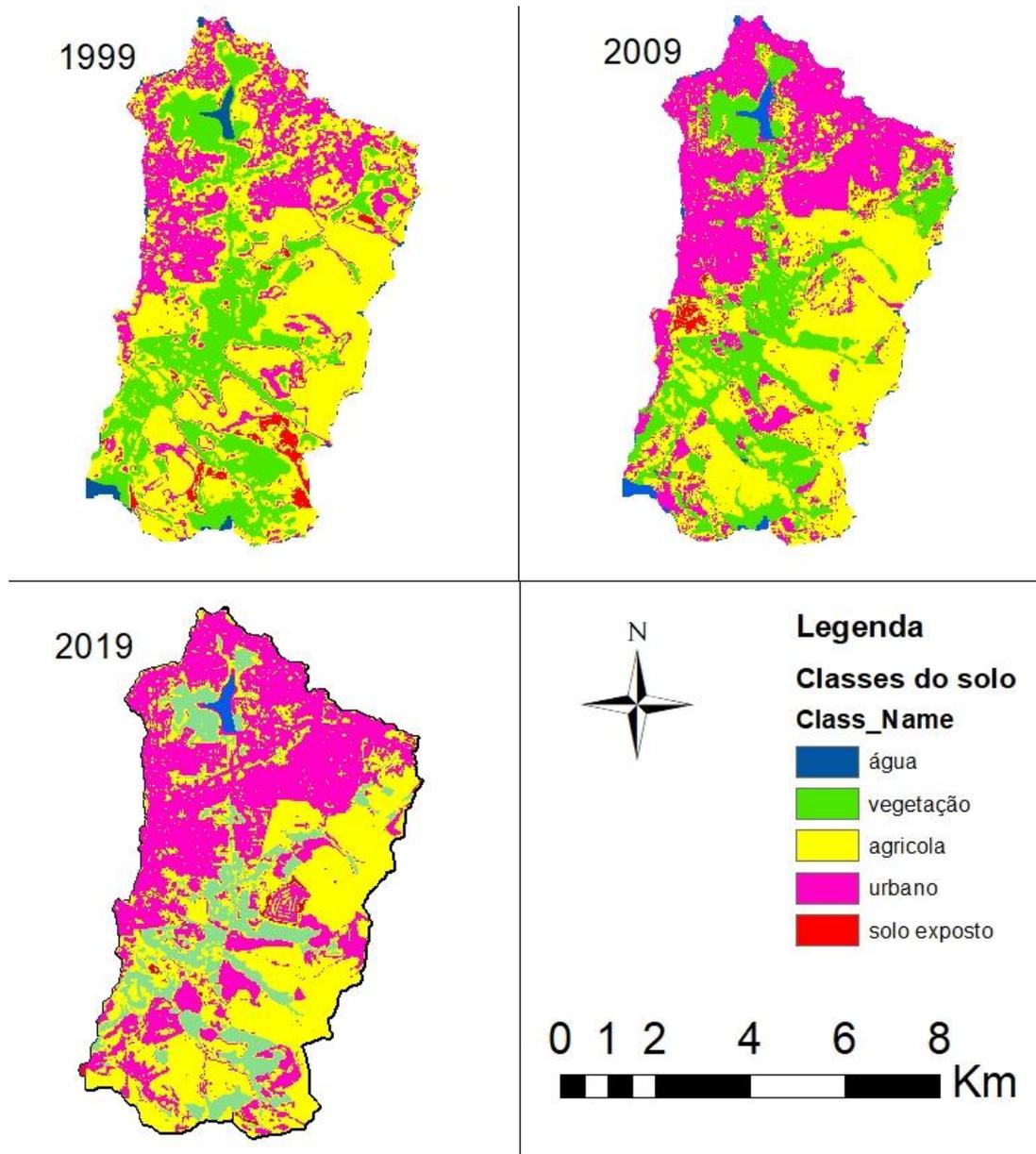


Figura 6 Classificação da cobertura do solo nos três cenários em estudo

Tabela 9 Área ocupada pelas classes de cobertura do solo em cada cenário (km²)

Cobertura do solo	Água	Agrícola	Urbana	Solo exposto	Vegetação
1999	0,70	24,21	11,30	1,90	12,20
2009	0,90	21,30	16,25	0,71	11,15
2019	0,31	21,23	21,37	0,27	7,13

Acompanhando o desenvolvimento urbano da região, o número de habitantes da cidade de Cascavel, durante o período analisado, cresceu de 237.508 para 332.333 pessoas (IBGE, 2020), o que aumentou o consumo de água potável.

Com o aumento do consumo e da impermeabilização do solo, ocorre a diminuição da recarga dos aquíferos (PINHEIRO *et al.*, 2019), importantes componentes do fluxo de base dos rios (LANCIA *et al.*, 2018), o que compromete o abastecimento de água da cidade em

épocas de estiagem, quando as águas subterrâneas são responsáveis por manter o volume de produção para consumo (PRATES *et al.*, 2012).

Refletindo também o crescimento das áreas urbanas na sub-bacia, o Número de Curva médio cresceu de 55,63 para 64,46, nos últimos 20 anos, conforme Tabela 10.

Tabela 10 CN médio das sub-bacias nos três cenários

Sub-bacia	1999	2009	2019
W120	62,04	67,75	70,37
W130	69,19	74,74	78,02
W140	61,29	60,66	67,33
W150	65,14	68,48	73,66
W160	52,91	54,69	61,81
W170	38,47	41,38	50,92
W180	61,35	60,41	64,17
W190	50,66	54,13	60,07
W200	54,09	60,31	62,34
W210	50,21	55,46	63,74
W220	46,57	50,93	56,68
MÉDIA ponderada	55,63	58,99	64,46

As chuvas de projeto calculadas com a equação de chuvas intensas para o município são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 Intensidades das precipitações de projeto

Duração (min)	Intensidade pluviométrica (mm/h)					
	Período de retorno (anos)					
	5	10	25	50	100	200
1	168,033	189,428	221,946	250,205	282,061	317,974
2	144,432	162,822	190,773	215,063	242,445	273,313
3	126,645	142,769	167,278	188,576	212,586	239,653
4	112,758	127,115	148,936	167,899	189,276	213,375
5	101,616	114,554	134,219	151,308	170,572	192,290
6	92,477	104,252	122,148	137,701	155,233	174,997
7	84,847	95,650	112,070	126,339	142,425	160,559
8	78,380	88,360	103,528	116,709	131,569	148,321
9	72,829	82,102	96,196	108,444	122,251	137,816
10	68,012	76,672	89,834	101,271	114,165	128,701

Já os hietogramas unitários, encontrados a partir do método dos blocos alternados, são apresentados nas Figuras 7 a 11.

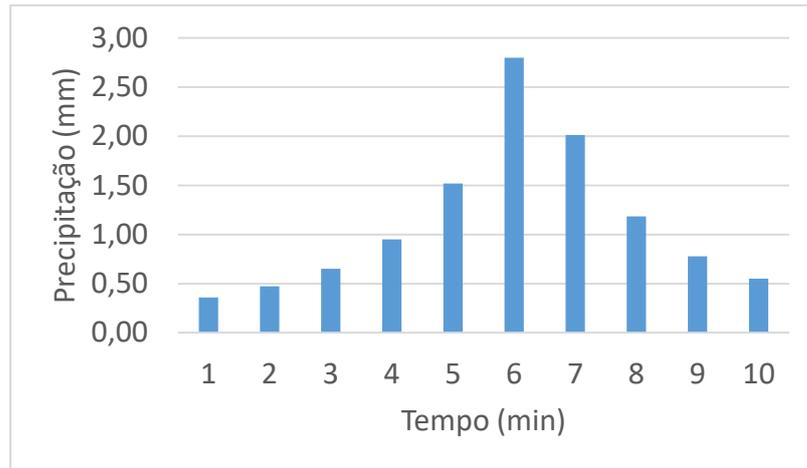


Figura 7 Hietograma para Tr de 5 anos

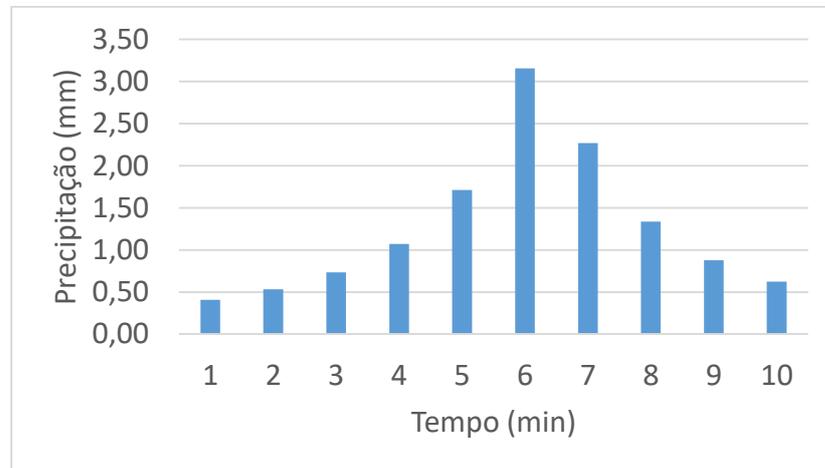


Figura 8 Hietograma para Tr de 10 anos

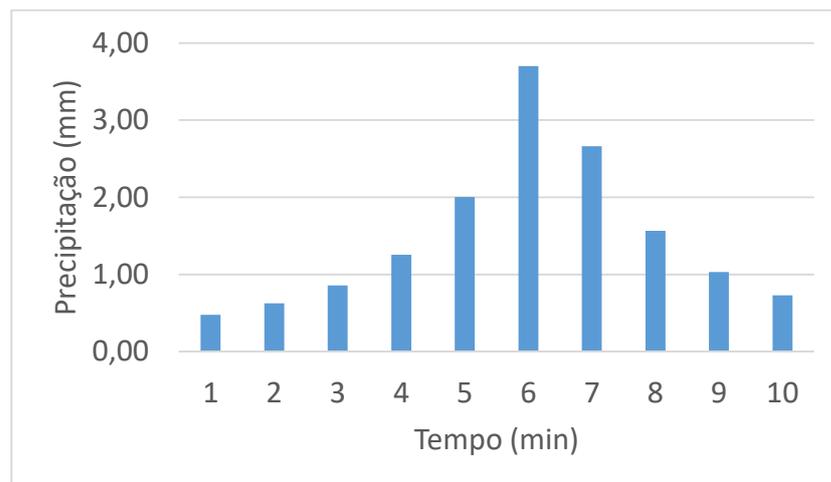


Figura 9 Hietograma para Tr de 25 anos

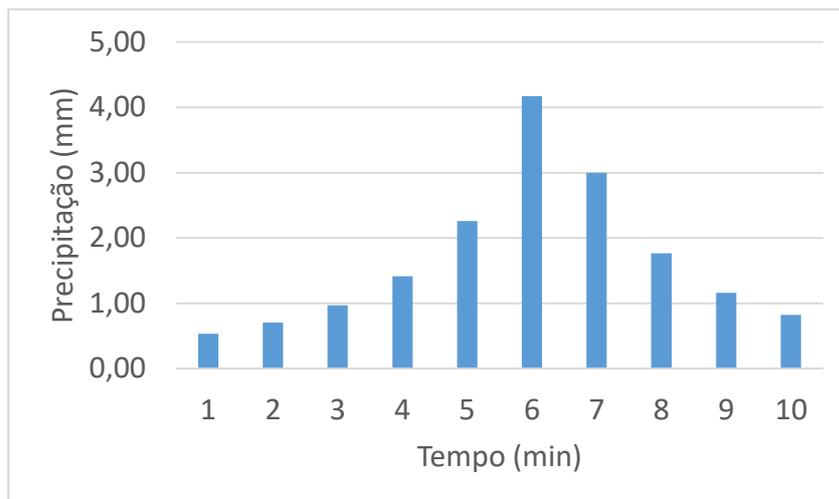


Figura 10 Hietograma para Tr de 50 anos

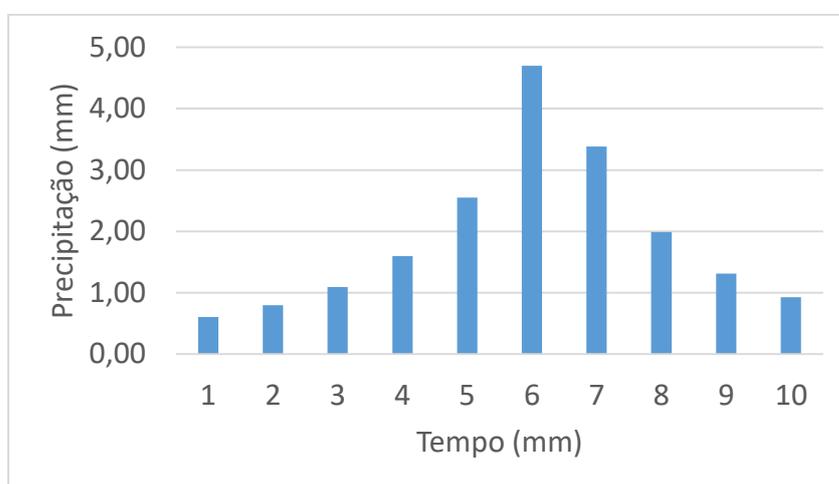


Figura 11 Hietograma para Tr de 100 anos

Para a sub-bacia do Rio Cascavel, o aumento na vazão do ponto exutório expresso para uma chuva de 10 minutos, nos últimos 20 anos, para os 5 períodos de retorno, é mostrado na Tabela 12.

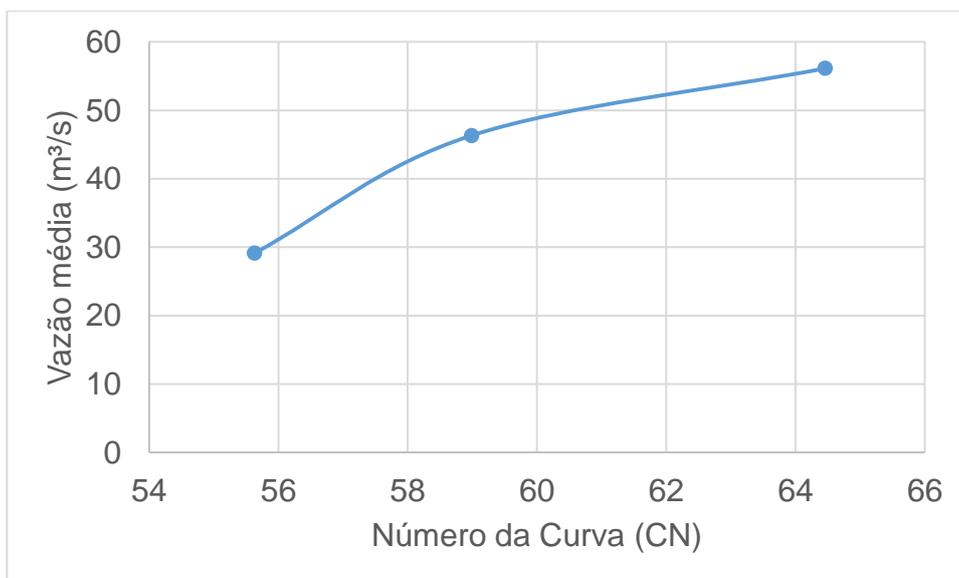
Tabela 12 Picos de vazão gerados para os cenários de cobertura do solo de 1999, 2009 e 2019

Ano	Pico de vazão (m ³ /s)				
	Períodos de retorno (anos)				
	5	10	25	50	100
1999	22,2	23,9	29,3	33	37,2
2009	35,4	37,3	46,8	52,7	59,4
2019	42,9	44,7	56,8	64,0	72,2

A comparação percentual entre o aumento no número da curva e da vazão média da bacia, entre os três cenários, podem ser verificados na Tabela 13 e na Figura 12.

Tabela 13 Comparação entre aumento do CN e da Vazão média (m³/s) da sub-bacia do Rio Cascavel

Ano	CN médio	Acréscimo CN (%)	Vazão média (m ³ /s)	Acréscimo vazão média (%)
1999	55,63	-	29,12	-
2009	58,99	6,04	46,32	59,06
2019	64,46	9,27	56,12	21,68

**Figura 12** Aumento da vazão média da sub-bacia do Rio Cascavel em relação ao aumento do CN entre 1999 e 2019.

O aumento da vazão média de 1999 para 2019 foi de 92,72%, confirmando a influência exercida pela cobertura do solo sobre a distribuição das vazões.

Podemos observar, ainda, que um aumento de 6,04%, no CN entre 1999 e 2009, acarretou um acréscimo de 59,06% para a vazão média, enquanto o aumento de 9,27%, no CN entre 2009 e 2019, resultou no aumento de 21,68% para a vazão.

6 CONCLUSÃO

A área de vegetação diminuiu 41,55%, na região da sub-bacia do Rio Cascavel, enquanto a classe de solo que apresentou maior índice de crescimento foi a urbana, com um aumento de 89,11%, nos últimos 20 anos. Essa foi a alteração que mais contribuiu para o aumento do número curva do solo na região, que teve um aumento de 15,87%, nos últimos 20 anos, refletindo num aumento de 92,72% na vazão máxima da unidade hidrográfica.

Conforme demonstrado pelo estudo de caso de Wang *et al.* (2017), as condições físico-químicas e as propriedades das partículas, carregadas pelo escoamento superficial urbano para rios de bacias com grande densidade de drenagem, refletem num alto índice de poluição para o rio, incluindo metais pesados e lixiviação.

Outros estudos, como o de Ignatavicius *et al.* (2017), demonstram a alta concentração de metais pesados carregados pelo escoamento superficial em áreas urbanas, confirmando o grau de contaminação das águas pluviais escoadas em regiões urbanizadas. Para a região em estudo, que caracteriza área de coleta de água para consumo, o efeito mais preocupante do aumento do escoamento superficial é a contaminação por carreamento de poluentes, visto que a água é a principal via de disseminação de poluentes das áreas de aplicação para outras parcelas do ambiente (MASIÁ *et al.*, 2013).

Covatti (2006) analisou parâmetros de qualidade da água na região de captação da Sanepar na sub-bacia do Rio Cascavel. Constatou que os valores de pH, turbidez e concentração de matéria orgânica ficaram fora dos parâmetros exigidos pela Resolução Conama 357/2005, chegando a 5,4, 1800 UNT e 8mg/l, respectivamente, já em 2006, refletindo os impactos do aumento do escoamento superficial na região.

Cembranel (2017) analisou a contaminação do Lago Municipal, localizado na bacia objeto deste estudo, por pesticidas organoclorados e organofosforados. Concluiu que a concentração de organoclorados, provenientes das atividades agrícolas contínuas e de longa data na região, chegaram a 0,154 ng g⁻¹, enquanto a concentração de organofosfatos, que indica ocorrência recente e contínua, proveniente das atividades urbanas, alcançaram 0,516 ng g⁻¹.

Além de contaminar as águas superficiais, o aumento do escoamento superficial, refletindo na vazão máxima observada para a sub-bacia, poderá prejudicar também a qualidade das águas subterrâneas (LAPWORTH, 2017), o que interfere no abastecimento futuro da região (MADHNURE, 2016). Caso a curva de crescimento da área urbana, demonstrada nos últimos 20 anos, continue na região, a tendência de aumento do escoamento superficial continuará e, conseqüentemente, a intensificação dos prejuízos à qualidade da água disponível para consumo na cidade.

Para estudos futuros, sugere-se que mais cenários de uso e cobertura do solo, entre 1999 e 2019, sejam estudados para definição mais precisa da relação matemática entre o aumento do CN e acréscimo da vazão máxima na bacia.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, jan, 2017.

ALTAF, F., MERAJ, G., ROMSHOO, A.S. Morphometric analysis to infer hydrological behavior of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Geography Journal**, v.2013, p. 1-14, abril, 2013. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/geography/2013/178021/>
Acesso em: 01/09/2020

AGUIAR, W. **Simulações hidrológicas de cenários de uso e ocupação do solo no alto vale da bacia hidrográfica do rio Marrecas (PR)**. Orientador: Sampaio, Silvio César. 2017. 108 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Pós Graduação em Engenharia agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

AGUIAR, W. de; SAMPAIO, S. C.; PAISANI, J. C.; REMOR, M. B.; REIS, R. R. dos. Seasonal dynamics of agricultural soil cover in runoff generation. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.39, n.5, p.592-599, setembro, 2019.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIMJO, G. S.; RICHETTI, N.; DE SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A. Classificações climáticas de Köppen, Thornthwaite e Camargo para o zoneamento climático do Estado do Paraná, Brasil. **Agricultural Sciences**, Lavras, v.40, n.4, p. 405-417, julho, 2016.

BARBOSA, P. I. G. **Modelagem hidráulica com base em dois modelos hidrológicos como subsídio à predição de eventos de cheias na bacia do rio Jucu braço sul/ES**. Orientador: Marco Aurélio Costa Caiado. 2020. 80 folhas. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2020.

BASTOS, P. C. **Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente**. Orientador: Antônio Sérgio Ferreira Mendonça. 2009. 69 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – PósGraduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum (UEM)**, Maringá, v. 26, n.2, p. 273-285, março, 2004.

CALDEIRA, T. L.; BESKOW, S.; DE MELLO, C. R.; FARIA, L. C.; DE SOUZA, M. R.; GUEDES, H. A.S. Probabilistic modelling of extreme rainfall events in the Rio Grande do Sul State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.3, p.197-203, março, 2015.

CAMINHA, A. R.; DE SOUZA, G. E.; DE OLIVEIRA, L. F. C. Desempenho do método de desagregação de chuvas para determinação das relações intensidade-duração-frequência das precipitações em algumas localidades de Minas Gerais. **SUSTENTARE**, Vale do Rio Verde, v.4, n.2, p.1-14, Agosto, 2020.

CARPENTER, S.R., STANLEY, E.H., ZANDEN, M.J.V. State of the World's Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes. **Annual Review Environment Resources**, Madison, v. 36, p.75-99, julho, 2011.

CASCADEL. **Lei complementar nº 91 de 23 de fevereiro de 2017**. Altera o plano diretor de Cascavel, estabelece diretrizes para o desenvolvimento da cidade e das sedes dos demais distritos administrativos e, dá outras providências relativas ao planejamento e à gestão do território do município, nos termos da Lei Federal 10.257/2001 - Estatuto da Cidade.

CEMBRANEL, A. S. **Pesticidas em sedimentos de lago urbano**. Orientador: Frigo, Elisandro Pires. 2017. 55 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Pós Graduação em Engenharia agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, Cambridge, v.19, n.1, p. 1-20, maio, 1973.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR. **Utilidade pública**. 2014. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/utilidade-publica/chuvas-provocam-falta-de-agua>. Acesso em: 28 jun. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR. Notícias. 2014. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/noticias/estacao-de-tratamento-de-agua-de-cascavel-completa-40-anos>. Acesso em: 28 jun. 2020.

COVATTI, J. A. C. **Caracterização quali-quantitativa da água do rio Cascavel**. Orientador: Queiroz, Manoel Moisés Ferreira de. 2006. 62 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-Graduação em Engenharia agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1981.

DIAS, R. H. S., SILVA, E. P., SANTOS, A. M. e ROSA, A. L. D. Influência do uso e ocupação do solo no escoamento superficial na cidade de Ji-Paraná-RO, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 08, n. 05, p. 1493-1508, agosto, 2015.

DAEE - CETESB. Departamento de Água e Energia Elétrica - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo, 1980.

EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/920267/o-novo-mapa-de-solos-do-brasil-legenda-atualizada>. Acesso em: 06 jul. 2021.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; CASADO, F. C. 3 Análise morfoestrutural aplicada no vale do Rio do Peixe (SP): uma contribuição ao estudo da neotectônica e da morfogênese do planalto ocidental paulista. **Geociências**, Guarulhos, v. 6, n.1, p. 45-62, 2005.

FENDRICH, R.; OLIYNIK, R. **Manual de utilização das águas pluviais**. 1. Ed. Curitiba: Livraria do Chain, 2002.

FLEMING, M., BRAUER, T. **HYDROLOGIC MODELLING SYSTEM HEC-HMS QUICK START GUIDE VERSION 4.2**. US Army Corps of Engineers, Institute of water Resources, 2016.

GALIANO, V. A.; LORANDI, R.; DOS SANTOS, F. M.; DE LOLLO, J. A. Carta de Potencial de Erosão Acelerada como Ferramenta para o Ordenamento Territorial. **Revista brasileira de cartografia**, Uberlândia, v. 73, n.1, p.150-166, Fevereiro, 2021.

GUTIERREZ, L. A. R., SOUZA, G. F., PERERIA, G., PARANHOS FILHO, A. C., ARIMA, G. A., BARBASSA, A. P. Mapeamento temporal dos índices: Área de superfície impermeável e escoamento superficial da área urbanizada de Campo Grande - MS. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 12, n. 37, p. 269-288, abril, 2011.

HALWATURA, D.; NAJIM, M.M.M. Application os the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modeling & Softwares**, Provo, v. 46, n.1, p. 155-162, agosto, 2013.

IBGE. **Cidade e Estados, 2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/cascavel.html>. Acesso em: 21 abr. 2021.

IGNATAVICIUS, G., VALSKYS, V., BULSKAYA, I., PALIULIS, D., ZIGMONTIENE, A., STAKUNAS, J. Heavy metal contamination in surface runoff sediments of the urban area of Vilnius, Lithuania/Raskmetallid Vilniuse linnakeskkonna pindmise aravoolu setendites. **Estonian Journal of Earth Sciences**, Estonia, v. 66, n. 01, p.13-20, Fevereiro, 2017.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement**. [S.l.: s.n.], 2008.

JIA, h., YAO, H., TANG, Y., YU, S. L., FIELD, R., TAFURI, A. N. LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. **Journal of Environmental Management**, Belgica, v. 149, n.1, p. 65-76, Fevereiro, 2015.

KABITE, G., GESSESSE, B. Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, China, v.6, n.2, p. 175-183, junho, 2018.

KIBLER, D. F. Desk-top Methods for Urban Stormwater Calculation. In: KIBLER, D. F. **Urban Stormwater Hydrology**. Local: Washington DC. Editor American Geophysical Union, 1982. p. 87-135.

LEKULA, M.; LUBCZYNSKI, M. W. Use of remote sensing and long-term in-situ time-series data in an integrated hydrological model of the Central Kalahari Basin, Southern Africa. **Hydrogeology Journal**, v.27, n.1, p.1541-1562, março, 2019.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 174 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

KONETI, S. SUNKARA, S. L. ROY, P. S. Hydrological Modeling with Respect to Impact of Land-Use and Land-Cover Change on the Runoff Dynamics in Godavari River Basin Using the HEC-HMS Model. **Internacional Journal of Geo-Information**, India, v. 7, n. 6, p.1-17, maio, 2018.

LANCIA, M.; ZHENG, C.; YI, S.; LERNER, D. N.; ANDREWS, C. Analysis of groundwater resources in densely populated urban watersheds with a complex tectonic setting: Shenzhen, southern China. **Hydrogeology Journal**, Missouri, v. 27, n.2, p. 183-194, fevereiro, 2019.

LAPWORTH, D. J.; NKHUWA, D. C. W.; OKOTTO-OKOTTO, J.; PEDLEY, S.; STUART, M. E.; TIJANI. M. N.; WRIGHT, J. Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. **Hydrogeology Journal**, Missouri,

v. 25, n.6, p. 1093-1116, junho, 2017.

LIMA, R. S., ALAVES, J. P. H. Avaliação da qualidade da água dos reservatórios localizados nas bacias hidrográficas dos rios Piauí – Real, utilizando o índice de qualidade da água (IQA). **Scientia Plena**, Sergipe, v. 13, n.10, p.1-10, novembro, 2017.

LIMA, B.P.; MAMEDE, G.L.; LIMA NETO, I.E. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v.23, n.1, p.125-135, janeiro, 2018.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1949.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. *In*: Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas. **Anais[...]**. Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 99-124.

LONGO, A. J., SAMPAIO, S. C., SUSZEC, M. Equação de chuvas intensas e precipitação provável para o Município de Cascavel, PR. **Revista Varia Scientia**, Cascavel, v. 06, n. 11, p. 119-127, agosto, 2006.

LOUZADA, F. L. R. O., PIROVANI, D. B., LOUGON, M. S., SANTOS, A. R. Caracterização do Uso e Ocupação do Solo Da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Vala do Souza- Es. *In*: IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação. Vale do Paraíba. **Anais [...]** Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

MADHNURE, P.; PEDDI, N. R.; ALLANI, D. R. An integrated hydrogeological study to support sustainable development and management of groundwater resources: a case study from the Precambrian Crystalline Province, India. **Hydrogeology Journal**, Missouri, v. 24, n.2, p. 475-487, março, 2016.

MASIÁ, A.; CAMPO, J.; VÁZQUEZ-ROIG, P.; BLASCO, C.; PICÓ, Y. Screening of currently used pesticides in water, sediments and biota of the Guadalquivir River Basin (Spain). **Journal of Hazardous Materials**, USA, v. 263, n.1, p. 95-104, setembro, 2013.

MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; NUNES, J. O. R. Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. **Sociedade & natureza: revista do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, v.32, n.1, p.820-831, novembro, 2020.

MELLO, A. J. Q. **Rios e Chuvas do Brasil: Novos métodos e Tabelas de Hidrologia**. Curitiba: Editora A M. Cavalcante Cia Ltda, 1973.

MELLO, E. L. **Apostila de Hidrologia**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2019.

MILDE, L.C.E.; MORAES, J.M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, F.F.B.; GROppo, JULIANO. Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 10, n. 19. p. 61-69, janeiro, 2002.

MINELLA, J. P. G.; MERTENI, G. H. índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.9, p.1575-1582, set., 2012.

MOORE, I.D.; TURNER, A.K.; WILSON, J.P.; JENSON, S.K.; BAND, L.E. GIS and landsurface-subsurface process modeling. *In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 19, p. 196-230.

NASCIMENTO, L. P. do; REIS, D. A.; ROESER, H. M. P.; SANTIAGO, A. de F. Relationship between land use and water quality in a watershed impacted by iron ore tailings and domestic sewage. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 14, n. 5, p.1-11, agosto, 2019.

OLIVEIRA, D. G. de; VARGAS, R. R.; SAAD, A. R.; ARRUDA, R. de O. M.; DALMAS, F. B.; AZEVEDO, F. B. Land use and its impacts on the water quality of the Cachoeirinha Invernada Watershed, Guarulhos (SP). **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 13, n. 1, p.1-17, novembro, 2018.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. SALDANHA, D. L. Modelos de previsão e espacialização das áreas inundáveis em montenegro, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 13, n. 4, p.355-378, outubro, 2013.

OLIVEIRA, L.F.C.; ANTONINI, J.C.A.; FIOREZE, A.P. & SILVA, M.A.S. Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 620-625, abril, 2008.

OLIVEIRA, L.F.C., CORTÊS, F.C., WEHR, T.R., BORGES, L.B., SARMENTO, P.H.L., GRIEBELER, N.P. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiás, v.35, n.1, p.13-18, novembro, 2005.

PINHEIRO, J. A. C., DIAS, H. C. T., PAIVA, H. N., SILVA, C. M., FILHO, E. I. F., NETO, S. N., BARBOSA, R. A. Hydrological processes in the Zerede Creek watershed in Timoteo-MG. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v.29, n.4, p.1658-1671, outubro, 2019.

PINTO, F.A. **Chuvas intensas no Estado de Minas Gerais: análises e modelos**. 1995. 87 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Pós graduação em irrigação e drenagem, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

PRATES, M. M., LOURENCETTI, J., NASCIMENTO DE OLIVEIRA, J. O CRESCIMENTO URBANO E SUAS IMPLICAÇÕES NA ÁGUA SUBTERRÂNEA: O EXEMPLO DE MIRASSOL/SP. **Águas Subterrâneas**. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27756>. Acesso em: 01/09/2020

POFF, N. L.; BLEDSOE, B. P.; CUHACIYAN, C. O. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 264-285, setembro, 2006.

RANKA, E.; ANDRIJANA, T.; JASNA, P.; VESNA, D. Rainfall-runoff simulations in the Lukovska River Basin with the HEC-HMS model. **Glasnik Sumarskog fakulteta - Univerzitet u Beogradu**, Sérvia, v.119, n.6, p.33-60, janeiro, 2019.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 13 jul. 2021.

RIBEIRO, A. N., CIRILO, J. A., DANTAS, C. E. O., SILVA, E. R. Caracterização da for mação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrocinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 394-403, abril, 2015.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998.

SANTOS, J. B. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP**. Orientador: Zimback, Célia Regina Lopes . 2017. 80 folhas. Tese (Doutorado em Agronomia) – Irrigação e Drenagem - FCA, Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp, Campus de Botucatu, Botucatu, 2017.

SANTOS, L. L. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.2, n.03, p. 01-19, setembro, 2009.

SANTOS, K. A., RUFINO, I. A. A., BARROS, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 943- 952, setembro, 2017.

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 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n 4. p. 19-29, outubro, 2005.

SETZER, J; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo**. Boletim Técnico DAEE. v.2, n.2. São Paulo, 1979.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. Orientador: Reynaldo Luiz Victoria. 2003. Tese (Doutorado em Ciências) – Energia nuclear na agricultura. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SILVA, R. M., SANTOS, C. A. G., SILVA, V. C. L., SILVA, L. P. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff–erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, USA, v. 185, n.11, p. 8979-8990, maio, 2013.

SILVA, C. B., OLIVEIRA, L. F. C. Relação Intensidade - duração - frequência De Chuvas extremas na Região Nordeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 20, n.13, p. 267-283, janeiro, 2017.

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

SIMÕES, K.; CONDÉ, R. C. C.; ROIG, H. L.; CICERELLI, R. E. Application of the SWAT hydrological model in flow and solid discharge simulation as a management tool of the Indaia River Basin, Alto São Francisco, Minas Gerais. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 16, n. 3, p. 1-18, janeiro, 2021.

SHI, P.; ZHANG, Y.; LI, Z.; LI, P.; XU, G. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. **Catena**, Amsterdam, v. 151, n.1, p. 182-190, abril, 2017.

SOUZA, M.M.; GASTALDINI, M.C.C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.19, n.3, p. 263-274, julho, 2014.

SOUZA, K. T. M. Estudo Comparativo entre os Modelos SWMM e HEC-HMS para Simulação de Escoamento Superficial – Caso de Estudo na Bacia do Córrego Samambaia. **Revista Eletronica de Engenharia Civil**, Goias, v. 05, n. 02, p.1-11, dezembro, 2012.

SUN, Z. DI, L. GAIGALAS, J. SUI: Simplify the use of geospatial web services in environmental modeling. **Environmental Modelling & Software**, USA, v. 119, n.1, p. 228-241, setembro, 2019.

TANG, Q. LETTENMAIER, D. P. 21st century runoff sensitivities of major global river basins. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 06403, p.1-5, março, 2012.

TAVARES. P. R. L.; CASTRO. M. A. H. Simulação de perfis d'água e planícies de inundação relacionada a diferentes cenários de urbanização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 16. 2005. João Pessoa. **Anais**. Porto alegre: SBRH. 2005. p. 1793-1799.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos,1998.

TUSET, J., VERICAT, D., BATALLA, R.J. Rainfall, runoff and sediment transport in a Mediterranean mountainous catchment. **Science of The Total Environment**, espanha, v. 540, p. 114-132, 2016.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 352, n.3-4, p. 388-403, maio, 2008.

USACE-HEC. “**Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.3 – User’s Manual**”, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, September 2008.

USACE-HEC. “**Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual**”, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, September 2000.

USDA. **Linear Theory of Hydrological Systems, Technical Bulletin**. United States Departement of Agriculture, No. 1468. Washington, 1973.

USDA. **Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55**. United States Departement of Agriculture, 2ª Ed. Washington, 1986.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JUNIOR, F. W. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 581-590, outubro, 2009.

WEI, L., HUBBART, J.A., ZHOU, H. Variable Streamflow Contributions in Nested Subwatersheds of a US Midwestern Urban Watershed. **Water Resour Manage**, v. 32, n.1, p. 213-228, janeiro, 2018.

WANG, Q., ZHANG, Q., WU, Y., WANG, X. C. Physicochemical conditions and properties of particles in urban runoff and rivers: Implications for runoff pollution. **Chemosphere**, v. 173,

n.1, p. 318-325, janeiro, 2017.

ZANIN, P. R. BONUMÁ, N. B. FRANCO, D. Comportamento hidrossedimentológico de bacia hidrográfica como reservatório. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 185-203, março, 2017.

ZAHERPOUR, J. ; GOSLING, S.N. ; MOUNT, N. ; SCHMIED, H.M. ; VELDKAMP, T.I.E. ; DANKERS, R. ; EISNER, S. ; GERTEN, D. ; GUDMUNDSSON, L. ; HADDELAND, I. ; HANASAKI, N. ; KIM, H. ; LENG, G. ; LIU, J. ; MASAKI, Y. ; OKI, T. ; POKHREL, Y. ; SATOH, Y. ; SCHEWE, J. ; WADA, Y. Worldwide evaluation of mean and extreme runoff from six global-scale hydrological models that account for human impacts. **Environmental Research Letters**, v. 13, n.1, p.1-19, junho, 2018.

ZHANG, M. JIANG, L. ZHAO, J. PENG, Y. ZHANG, X. Coupling OGC WPS and W3C PROV for provenance aware geoprocessing workflows. *Computers & Geosciences*, v. 138, n.104419, janeiro, 2020.