

MÉTODOS DE CÁLCULO DE VAZÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM BACIAS RURAIS DE DIFERENTES ESCALAS

Matheus Morioka Siqueira (Universidade Estadual de Ponta Grossa) E-mail: matheusmorioka11@gmail.com
Willian Thomas Rocha (Universidade Estadual de Ponta Grossa) E-mail: willianthomasrocha@gmail.com
Amanara Potykytã de Sousa Dias Vieira (Universidade Federal do Paraná) E-mail: amanara@ufpr.br
Maria Magdalena Ribas Döll (Universidade Estadual de Ponta Grossa) E-mail: mmrdoll@uepg.br
Guilherme Araujo Vuitik (Universidade Estadual de Ponta Grossa) E-mail: gavuitik@uepg.br

Resumo: Os estudos hidrológicos são um instrumento de gestão ambiental uma vez que permitem o diagnóstico do sistema hidrológico e buscam solucionar as questões que causam impacto negativo. Este estudo tem como objetivo avaliar métodos de cálculo de vazão de escoamento superficial em meio rural. A utilização de Sistema de Informação Geográfica - SIG integrou todos os dados em um único ambiente computacional. Dentro da área da Fazenda Escola Capão da Onça, objeto de estudo desta pesquisa, as vazões máximas foram calculadas pelo Método Racional, Método Racional Modificado, Método Ven Te Chow, I-PAI-WU e McMath. Os resultados foram obtidos, para a Bacia 1, através da utilização do tempo de concentração de Ven Te Chow e vazão de escoamento por I-PAI-WU, com o valor de 62,95 m³/s. Para a Bacia 2 foi utilizado o método Racional para o cálculo da vazão, obtendo 5,33 m³/s. Para a Bacia 3, também empregando o método Racional para cálculo de vazão, obtendo o valor de 1,61 m³/s. Avaliando os métodos empregados, o método I-PAI WU se mostrou o mais adequado para cálculo de vazão de escoamento superficial entre as diferentes escalas de bacias rurais estudadas. Para bacias pequenas (até 0,5 km²), o método Racional também é adequado, pela sua fácil aplicação e pequena demanda de informações para alimentar o modelo.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, Cálculo de vazões de escoamento superficial, zona rural.

DRAINAGE FLOW CALCULATION METHODS IN DIFFERENT SCALE RURAL BASINS

Abstract: Hydrological studies are an instrument of environmental management which allows diagnosis of the hydrological system and seeks to solve the issues that cause negative impact. This study aims to evaluate methods for calculating surface runoff flow in rural areas. The use of Geographic Information System - GIS integrated all data in a single computational environment. Within the area of Fazenda Escola Capão da Onça, object of study of this research, the maximum flows were calculated by the Rational Method, Modified Rational Method, Ven Te Chow Method, I-PAI-WU and McMath. The results were obtained, for Basin 1, through the use of the Ven Te Chow concentration time and flow rate by I-PAI-WU, with a value of 62.95 m³/s. For Basin 2, the Rational method was used to calculate the flow, obtaining 5.33 m³/s. For Basin 3, also using the Rational method for flow calculation, obtaining the value of 1.61 m³/s. Evaluating the methods used, the I-PAI WU method proved to be the most suitable for calculating surface runoff flow between the different scales of rural basins studied. For small basins (up to 0.5 km²), the Rational method is also suitable, due to its easy application and small demand for information to feed the model.

Keywords: watershed, runoff flow calculation, rural area

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos, sejam na forma de água superficial ou subterrânea, são bens naturais de domínio público e de grande importância, possuem valor econômico e são finitos. Sua escassez pode impedir o desenvolvimento de regiões. A água possui diferentes usos, dentre eles o agropecuário. Segundo a ANA (2021), cerca de 78% da água doce no Brasil é destinada ao uso agropecuário, sendo que parte deste valor incluiu a má administração dos recursos hídricos, como irrigações mal executadas, falta de controle do agricultor na quantidade usada em lavouras e no processamento dos produtos.

Segundo o levantamento do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (2021), a média de consumo diário de água de cada brasileiro é de 152,1 litros, o que resulta em um consumo médio anual de aproximadamente 10 trilhões de litros no país. Desse total, pouco mais de 7 trilhões são destinados à agricultura, que acaba desperdiçando cerca de 3 trilhões de litros de água.

A chuva é uma importante etapa do ciclo hidrológico e, quando intensa, pode gerar consequências indesejáveis relacionadas a impactos ambientais, acarretando preocupações referentes ao planejamento e a ocupação do espaço geográfico, seja ele rural ou urbano. No meio rural, tal questão se aplica principalmente na agricultura, em áreas onde a drenagem superficial é prática indispensável, visando a conservação do solo.

A drenagem é o processo de remoção do excesso de água da superfície do solo ou do subsolo possuindo duas formas básicas: drenagem superficial, que é a remoção do excesso de água da superfície do solo, para torná-lo adequado ao aproveitamento agrícola, e drenagem subsuperficial ou subterrânea, que remove o excesso de água do perfil do solo, com a finalidade de propiciar condições favoráveis de umidade, aeração e manejo agrícola (SILVA, et al., 2008).

Para o estudo de drenagem é necessário conhecer as distribuições espaço-temporais da precipitação, da infiltração e das vazões nas seções de interesse. Deve ser feita uma análise hidrológica, seja para saber se a precipitação interfere no processo, ou se a drenagem é adequada para o tipo de empreendimento (ANA, 2016). O estudo das ramificações e do desenvolvimento do sistema é importante, pois ele indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica. O padrão de drenagem de uma bacia depende da estrutura geológica do local, tipo de solo, topografia e clima. Esse padrão também influencia no comportamento hidrológico da bacia.

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi avaliar os valores teóricos das vazões de escoamento superficial e distinguir a aplicabilidade dos métodos em bacias rurais.

2. DETERMINAÇÃO DE VAZÕES DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A utilização de modelos hidrológicos é visto para Hollanda et al., (2015) como uma solução que proporciona custos menores e economia de tempo para análise dos potenciais impactos das mudanças antrópicas no regime hídrico de bacias hidrográficas, pois os modelos hidrológicos são ferramentas primordiais para avaliar, simular e prever os danos favorecidos por eventos de precipitação auxiliando no planejamento, no manejo e na tomada de decisões relacionadas aos recursos naturais, especialmente os hídricos, em uma bacia hidrográfica.

As determinações das vazões de escoamento são obtidas por diferentes métodos de acordo com as características físicas da área estudada. De acordo com Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (2006), a área de drenagem é o fator determinante, sendo que para bacias com área de drenagem inferior a 50 km² devem ser utilizados métodos indiretos, baseados nos estudos de intensidade, duração e frequência das chuvas da região. Para estas bacias, caso sejam disponíveis dados fluviométricos em quantidade e qualidade suficientes, deve ser utilizado o método direto estatístico. Em função da área da bacia hidrográfica, deve-se utilizar o método racional para área menor que 2 km², métodos de Ven Te Chow, I Pai Wu ou triangular, para áreas entre 2 km² e 50 km² e o método estatístico direto para áreas acima de 50 km².

As limitações dos métodos são amplamente discutidas na literatura. De acordo com Arndt (2009), o método racional é geralmente aplicável a bacias com área variando entre 0,05 e 0,5 km². Dada esta circunstância, o método racional passa a ser modificado a fim de não ser

restringido a microbacias. Segundo Franco (2004), o método racional modificado possui aplicabilidade para áreas de 0,5 a 1 km². Para áreas ainda maiores, o método racional foi novamente aprimorado, sendo desenvolvido a partir dele o método I-Pai Wu, sendo este método aplicável a bacias com área entre 2 e 200 km² (DIAS et al., 2015).

2.1. Método Racional

De acordo com Almeida e Serra (2017), o Método Racional foi proposto por Mulvany por volta de 1850, com o objetivo de prever a vazão máxima decorrente de um evento de chuva. Esse método tem registros na literatura no fim do século XIX devido suas aplicações nos projetos de redes de esgoto. Como descreve Batista (2010), o método racional é o mais utilizado pelos profissionais de engenharia e é o que apresenta valores mais desfavoráveis, ou seja, aqueles que devem ser utilizados no dimensionamento dos órgãos de drenagem, e que garantem maior segurança em casos extremos.

A equação racional estima a vazão máxima de escoamento de uma determinada área sujeita a uma intensidade máxima de precipitação, com um determinado tempo de concentração, a qual é apresentada na Equação 1, onde: Q = vazão máxima de escoamento (m³/s); C = coeficiente de escoamento superficial (Tabela 1); i = intensidade máxima de precipitação, (mm/h). A = área de contribuição da bacia (ha).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \quad (1)$$

Tabela 1 - Coeficientes de escoamento superficial

Tipo de cobertura do Solo	C
Superfícies Impermeáveis	0,9
Terreno estéril e montanhoso	0,8
Terreno estéril e ondulado	0,6
Terreno estéril plano	0,5
Prados, campinas, terreno ondulado	0,4
Florestas decíduas, folhagem caduca	0,35
Florestas coníferas, folhagem permanente	0,25
Florestas tropicais, folhagem permanente	0,2
Pomares	0,15
Solos cultivados em zonas altas	0,15
Solos cultivados em vales	0,1

Fonte: Friedrich (2008)

2.2. Método Racional Modificado

Para os cálculos de vazões, segundo Fritsch (2013), uma pequena modificação do método racional tradicional é possível estender sua utilização para áreas entre 50 e 100 ha, possibilitando o cálculo para bacias de médio porte. O método consiste em um cálculo de coeficiente de retardo que será multiplicado na equação do método racional. O coeficiente de retardo é calculado, de acordo com Pinto et al. (1976) de quatro maneiras (indicadas pelas Equações 2 a 5), de acordo com as condições indicadas após cada equação:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[3]{100 \cdot A}} \quad (2)$$

Onde: A = área da bacia, em km²; n = coeficiente em função da declividade da bacia, sendo: $n = 4$: para bacias de declividade inferior a 5/1000; $n = 5$: para declividades até 1/100; $n = 6$: para declividades maiores que 1/100.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{10 \cdot L}} \quad (3)$$

Sendo: $n = 3,5$: para declividades fortes; $n = 3$: para declividades médias; $n = 2,5$: para declividades fracas.

Para áreas rurais emprega-se a Equação 4 e para áreas urbanas a Equação 5, onde: A = área da bacia (km^2)

$$\varphi = A^{-0,10} \quad (4)$$

$$\varphi = A^{-0,15} \quad (5)$$

Portanto, o cálculo da vazão segue da seguinte maneira (Equação 6):

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A \cdot \varphi}{360} \quad (6)$$

2.3. Método Ven Te Chow

O método Ven Te Chow, segundo Bianchi *et al.*, (2012) permite analisar áreas que não possuem dados fluviométricos, calculando vazões de enchentes decorrentes da precipitação incidente, atribuindo um tempo de retorno, estabelecendo assim, relação com o risco hidrológico para a determinada chuva crítica ou vazão de projetos na previsão de enchentes e elaboração de obras hidráulicas (FENDRICH, 2008). Neste método a chuva efetiva, ou seja, a chuva excedente ou escoamento superficial é a maior responsável pelas vazões de cheias em pequenas bacias urbanizadas. O método proposto por Ven Te Chow empregou o Método do *Soil Conservation Service (SCS)* para a avaliação da chuva efetiva (P_e). O coeficiente de escoamento superficial é obtido através do método da Curva Número, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service (SCS)* dos Estados Unidos da América – EUA. que possibilita a obtenção do valor de escoamento superficial a partir de características específicas do solo, como uso, tipo e da umidade antecedente do solo das bacias hidrográficas, permitindo avaliar os impactos do uso do solo na resposta hidrológica da bacia. O método proposto por Ven Te Chow, conforme Nunes e Fiori (2007) estabelece que a chuva efetiva, denominada de chuva excedente, é responsável pelas vazões de cheias principalmente em bacias de pequenas escalas e urbanizadas. Assim, a vazão máxima pode ser expressa pela Equação (7):

$$Q = \frac{A \cdot X \cdot Y \cdot Z}{3,6} \quad (7)$$

Onde Q = vazão máxima em m^3/s ; A = área da bacia em km^2 ; X = fator de escoamento superficial, igual à razão da precipitação efetiva pela duração da chuva (P_e/t_d); Y = fator climático, igual à unidade nos locais onde há fórmula base regionalizada; Z = fator de redução do tempo de pico (adimensional).

A chuva efetiva ou precipitação excedente é calculada de acordo com a equação proposta por Fendrich (2008), onde: P_e = precipitação excedente (mm); P_p = chuva total (mm); N = Número de escoamento superficial (Curva Número).

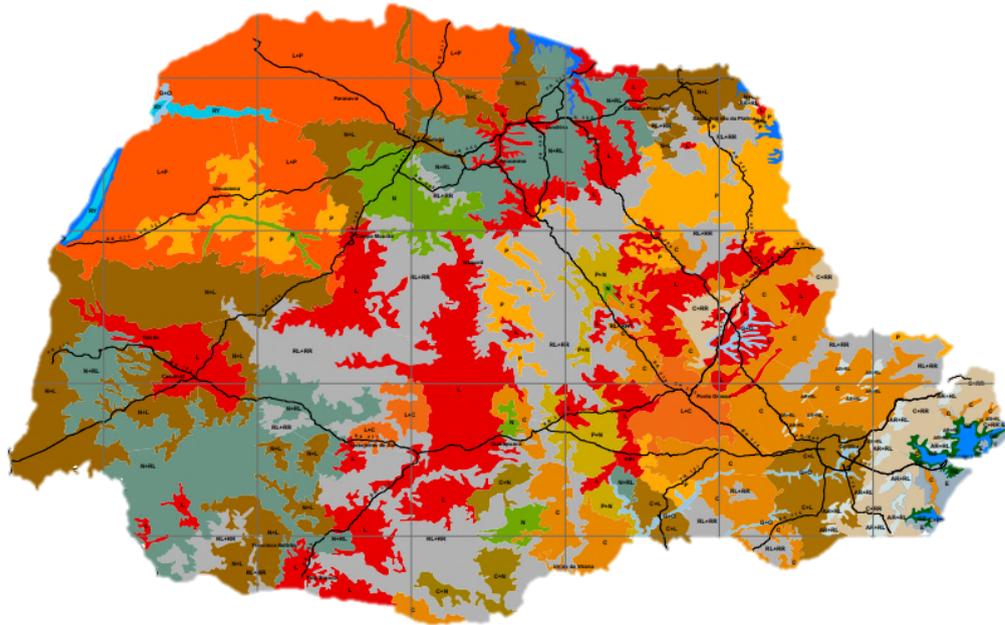
$$P_e = \frac{\left(\frac{P_p - 5080}{N + 50,8}\right)^2}{\frac{P_p + 20320}{N - 203,2}} \quad (8)$$

A chuva total ou precipitação incidente (P_p) é obtida pela multiplicação da intensidade pluviométrica pelo tempo de duração estabelecido para diferentes tempos de retorno (T_r), o qual é decidido pelo risco hidrológico aceitável para a comunidade; para obras hidráulicas o T_r já é estipulado e seu valor varia de acordo com o tipo de ocupação da área (FENDRICH, 2008).

$$i_m = P_p * t_d \tag{9}$$

Na Figura 1 é apresentada a classificação dos solos que possibilita a relação do tipo de solo com o grupo pertencente. O grupo do solo é um parâmetro determinante para estabelecer o coeficiente de Deflúvio ou escoamento superficial (*N*).

Figura 1 - Classificação dos Solos do Paraná



Fonte: SBCS (2020)

Na Tabela 2 são apresentados os tipos de Solo e uma classificação em diferentes grupos (A, B, C, D e E) que serão utilizados para a obtenção do número de deflúvio (*N*).

Tabela 2 - Classificação hidrológica dos solos do Estado do Paraná

SIGLA	TIPO DE SOLO	GRUPO
P	Podzol	A
Ca	Cambissolos	C ou D
PV	Podzólico vermelho / amarelo - vermelho / escuro	B
Ra	Solos litólicos	D ou E
LE	Latossolo vermelho escuro	C ou D
LR	Latossolo roxo	E
LB	Latossolo bruno	E
TR	Terra roxa estruturada	E
TB	Terra bruna estruturada	E
PE	Podzólico vermelho / amarelo eutrófico	B
LV	Latossolo vermelho / amarelo álico	C
AQ	Areias quartzosas	A
SM	Solo de mangue	D ou E
AR	Afloramento de rocha	B
HO	Solos orgânicos	D ou E
Ae	Solos aluviais	C ou D
HG	Solos hidromórficos	B ou C

Fonte: Gomes & Fendrich (1991)

Na Tabela 3, por sua vez, é apresentado o valor do número de Deflúvio (*N*), a partir dos grupos determinados na Tabela 2. As siglas para a defesa contra a erosão, apresentados por siglas, significam: SR = Sulcos retos; C = cultivo em contorno, paralelo às curvas de nível e T = Terraceamento.

Tabela 3 - Número de Deflúvio conforme o tipo de uso do solo

Cobertura vegetal ou tipo de solo	Defesa contra erosão	Situação hidrológica de erosão	Grupo hidrológico do solo				
			A	B	C	D	E
Arado quase sem cobertura vegetal	SR	Boas	65	80	88	92	95
	C	Boas	65	78	86	90	92
Cultivo de ciclo curto e cultivos frequentes	SR	Más	60	72	81	87	90
	SR	Boas	52	66	75	82	86
	C	Más	56	65	78	84	87
	C	Boas	48	60	72	78	82
	C-T	Más	52	62	74	80	84
	C-T	Boas	45	55	67	75	80
Cultivo de ciclo médio, arações anuais	SR	Más	58	65	73	82	88
	SR	Boas	54	62	70	79	85
	C	Más	55	64	72	78	84
	C	Boas	50	60	67	75	83
	T	Más	52	62	70	77	82
	T	Boas	48	55	65	73	80
Semeação densa ou a lanço; cobertura curta, mas densa, como a das leguminosas e dos pastos em rodízio	SR	Más	56	64	72	80	86
	SR	Boas	50	58	66	76	82
	C	Más	54	60	69	76	83
	C	Boas	48	56	64	72	80
	T	Más	50	58	65	75	80
	T	Boas	45	52	60	70	76
Pastagem velha com arbustos		Más	65	70	78	85	90
		Médias	60	66	75	82	87
		Boas	56	62	72	79	84
	C	Más	55	62	70	78	86
	C	Médias	42	59	67	75	82
	C	Boas	50	56	64	72	79
Reflorestamento	SR	Más	35	50	62	74	83
	SR	Boas	30	42	55	68	78
	C	Más	30	45	57	69	80
	C	Boas	25	36	52	64	75
Mata, capoeira velha		Más	32	40	55	67	76
		Boas	18	25	42	58	70
Gramados tratados		Más	65	72	78	84	88
		Boas	59	67	74	81	86
Estradas de terra	SR	Más	80	85	90	93	95
	C	Boas	74	80	86	90	92
Áreas urbanizadas			98	98	98	98	98

Fonte: DER/SP (2006)

2.4. Método I-Pai Wu

O objetivo deste método é determinar a forma geral de hidrogramas para pequenas bacias hidrográficas, por meio de uma expressão matemática contendo certos parâmetros que podem ser correlacionados com características físicas identificáveis e de fácil obtenção da bacia hidrográfica (WU, 1963).

Os fatores avaliados para o método de I-Pai Wu são: Área de drenagem (A); Comprimento da corrente principal (L); Inclinação média do talvegue (S); fator de forma da bacia hidrográfica (f). Na Equação 10 é apresentado matematicamente o método, onde Q = vazão (m^3/s); C = coeficiente de escoamento superficial; i = intensidade de precipitação (mm/h); A = área da bacia (km^2); K = coeficiente de distribuição espacial da chuva. O coeficiente de escoamento superficial “ C ” para este método é obtido por meio da Equação 11, onde: C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional; C_1 = coeficiente de forma, adimensional; C_2 = coeficiente volumétrico de escoamento, adimensional; F = fator de forma da bacia, adimensional.

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K \tag{10}$$

$$C = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{2}{1+F} \tag{11}$$

Ao contrário do Método Racional que admite o tempo de duração igual ao tempo de concentração em uma chuva crítica, o I-Pai Wu considera que bacias de forma alongada podem apresentar tempo de concentração maior que o tempo de pico (FRITSCH, 2013). Isso faz com que deva ser levado em consideração o efeito da forma da bacia, obtido pelas equações 12 e 13, onde: L = comprimento do talvegue, em km; A = área da bacia, em km². O coeficiente volumétrico “ C_2 ” é obtido em função do grau de impermeabilização da superfície. A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente “ C_2 ”. O coeficiente K , por sua vez, é obtido através do seguinte ábaco da Figura 2.

$$C_1 = \frac{4}{2+F} \tag{12}$$

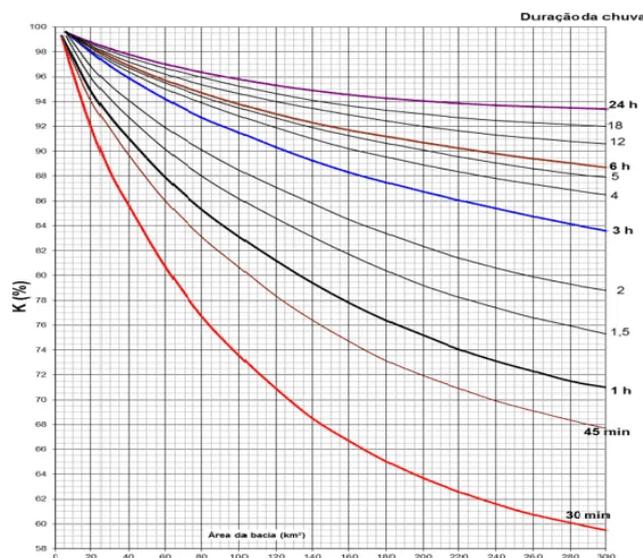
$$F = \frac{L}{2 \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5}} \tag{13}$$

Tabela 4 – Coeficiente volumétrico para diferentes graus de impermeabilidade do solo

Grau de impermeabilidade	Coeficiente volumétrico “ C_2 ”
Baixo	0,3
Médio	0,5
Alto	0,8

Fonte: DAEE/SP (1999)

Figura 2 - Coeficiente de distribuição espacial da chuva "K"



Fonte: DAEE/SP (1999)

2.5. Método McMath

Segundo Batista *et al.*, (2002) a fórmula de McMath pode ser utilizada em bacias maiores que 50 ha, porque seu fator de correção impede que a vazão aumente na mesma proporção que a área da bacia. Entretanto a fórmula não abrange bacias de grandes dimensões, como acima de 800 ha, por apresentar valores pequenos a partir desta área. A equação é descrita como:

$$Q = 0,0091 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{\frac{4}{5}} \cdot S^{\frac{1}{5}} \tag{14}$$

Onde: Q = vazão (m^3/s); C^* = coeficiente de escoamento de McMath; i = intensidade de chuvas (mm/h); A = área da bacia (ha); S = declividade do talvegue principal (m/m). O coeficiente de McMath é obtido através da somatória dos coeficientes encontrado na Tabela 5:

Tabela 5 - Coeficiente de McMath

Condições de escoamento	Tipo de Cobertura Vegetal		Tipo de Solo		Condições Topográficas da Bacia	
	Baixa	Área coberta de gramíneas	0,08	Areia	0,08	Área plana
Moderada	Cobertura vegetal intensa	0,12	Textura Leve	0,12	Ligeiramente ondulada	0,06
Média	Cobertura razoável a rala	0,16	Textura Média	0,16	Ondulada a montanhosa	0,08
Alta	Cobertura rala a esparsa	0,22	Textura Pesada (argilosa)	0,22	Montanhosa a escarpada	0,11
Muito alta	Cobertura esparsa e solo descoberto	0,30	Textura Pesada e área rochosa	0,30	Escarpada	0,15

Fonte: Batista et al. (2002)

3. METODOLOGIA

O estudo foi realizado por meio das ferramentas SIG para a caracterização fisiográfica, devido à possível manipulação de arquivos de imagens e dados para a elaboração de um cenário estático. Através de Modelo Digital de Elevação, foi possível obter as informações relacionadas a topografia da região, tais como: cota altimétrica, linhas de fluxo dos corpos hídricos, direção da drenagem, curvas de nível de 10 m, e microbacias existentes.

O coeficiente de escoamento, parâmetro que complementa a equação das vazões, foi obtido por meio das suas respectivas tabelas apresentadas para cada método de vazão. O tempo de concentração empregado para o cálculo das vazões foi obtido pelo método Ven Te Chow (1988).

O local escolhido para o estudo foi a Fazenda Escola Capão da Onça (FESCON), localizada no município de Ponta Grossa – PR, pertence à Universidade Estadual de Ponta Grossa e possui uma área de 312,110 hectares. O local está entre os pontos de latitude $25^{\circ} 5' 35,7''S$ e longitude $50^{\circ} 3' 19''W$. Seu ponto mais alto tem cerca de 1040 m de altitude. A topografia da FESCON é caracterizada pela fase de relevo suave ondulado a ondulado, composto de arenito Furnas, com presença de Latossolo Vermelho Distrófico (FRANQUITO, 2019). Essa informação concorda com a Figura 1, que apresenta o mapa do Paraná de acordo com a classificação do solo.

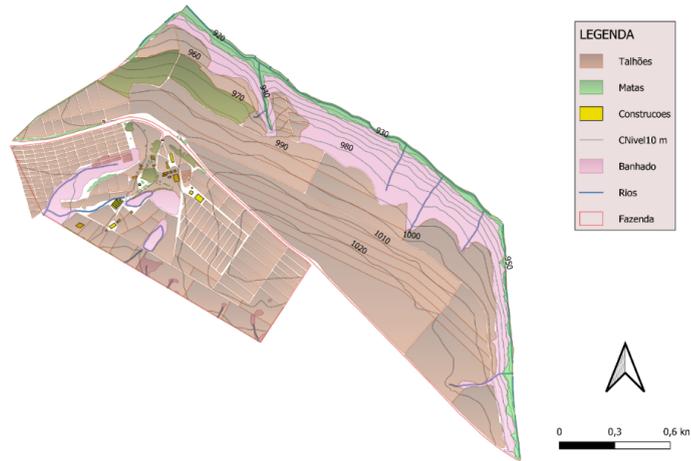
Para o cálculo das vazões são necessárias algumas informações de relevo, vegetação e tipo solo, para que seja obtido o valor do coeficiente de escoamento superficial, critério que difere as equações entre si. As conclusões acerca do tipo de vegetação e solo, foram obtidas a partir da avaliação dos critérios exigidos em cada equação e as observações em visitas a campo e outros trabalhos específicos relacionados com a área de estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Desenvolvimento dos mapas

A princípio foram delimitadas as bacias hidrográficas inseridas na região da FESCON, a partir do mapa que delimita a região da fazenda escola e pelo modelo digital de elevação SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (Figura 3).

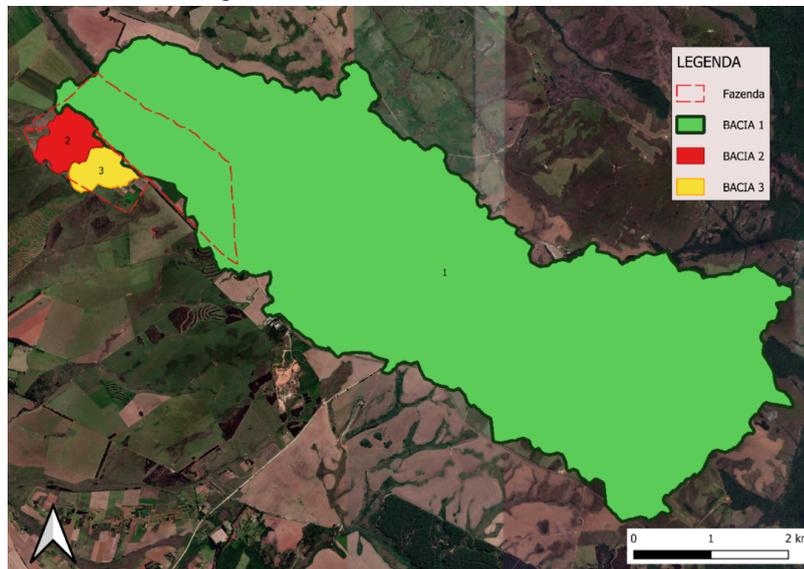
Figura 3 - Shapes da FESCON



Fonte: os autores (2022)

A partir do complemento GRASS 7, disponível no QGis, foram determinadas as microbacias inseridas na FESCON, a partir de suas linhas de fluxos e direção de drenagem, sendo que estas microbacias foram delimitadas a partir da determinação do ponto de exutório como pertencente do territorialmente à fazenda. O resultado obtido da delimitação de bacias nos limites topográficos da região de estudo foi de três microbacias. A Bacia 1, de maior extensão ($A = 23,66 \text{ km}^2$), abrange áreas interna e externa à FESCON e deságua no Rio Verde. As bacias 2 ($A = 0,45 \text{ km}^2$) e 3 ($A = 0,34 \text{ km}^2$) localizam-se integralmente nos limites da FESCON e deságuam no arroio Terra Vermelha (Figura 4).

Figura 4 - Bacias inseridas na FESCON



Fonte: os autores (2022)

4.2. Cálculo das vazões

As vazões foram determinadas por todas as fórmulas apresentadas na seção 2 a fim de avaliar os resultados e compará-los para analisar a viabilidade de utilização dos métodos. Um resumo dos valores de vazão obtidos está disposto na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazões calculadas para as bacias delimitadas

Método	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3
Método Racional	102,954 m ³ /s	1,607 m ³ /s	5,333 m ³ /s
Método Racional Modificado	75,030 m ³ /s	1,740 m ³ /s	5,939 m ³ /s
Método Ven Te Chow	47,822 m ³ /s	4,317 m ³ /s	1,192 m ³ /s
Método I-Pai-Wu	59,172 m ³ /s	1,650 m ³ /s	6,494 m ³ /s
Método McMath	46,698 m ³ /s	1,690 m ³ /s	6,055 m ³ /s

Fonte: os autores (2022)

O método racional, que apresenta limitação de área máxima variando entre 2 a 5 km² dependendo da literatura, teve como coeficiente de escoamento $C = 0,25$, valor obtido a partir da determinação do tipo de cobertura do solo. De acordo com a Tabela 2, a classificação de escoamento superficial que mais se aproxima da região, conforme a verificação após as visitas a campo, foi a de “Florestas coníferas com folhagem permanente”.

O método racional modificado apresentou o parâmetro de coeficiente de retardo (ϕ), calculado a partir da área da bacia. O cálculo foi feito a partir da Equação 7 (para áreas rurais), e o coeficiente de retardo foi de 0,729 (Bacia 1), 1,083 (Bacia 2) e 1,114 (Bacia 3). Esse método também apresenta uma limitação quanto a área de drenagem.

O Método Ven Te Chow apresenta mais exigências para a determinação da vazão. Primeiramente foi identificado o grupo do solo hidrológico através da Figura 2. Para o tipo de solo (Cambissolo e/ou Latossolo vermelho), de acordo com a Tabela 3, o correspondente é o grupo C. A partir disso foi obtido o valor de N , conforme a Tabela 4, sendo o valor de N igual a 67, para cobertura de cultivos de ciclos médios, cultivo em contorno, com situação de infiltração boa. A precipitação efetiva foi calculada a partir da Equação 1 sendo igual a 18,14 mm (Bacia 1), a 21,67 mm (Bacia 2) e 1,81 mm (Bacia 3).

O método de I-PAI-WU leva em consideração outros parâmetros além da área e da precipitação, como é detalhado na seção 3.5.4. O coeficiente de escoamento é dividido em entre outros fatores que levam em consideração as características fisiográficas da bacia. Para o fator de forma (F), segundo a equação 24, o valor obtido foi de 1,518 (Bacia 1), 0,635 (Bacia 2) e 0,165 (Bacia 3). A partir do fator de forma, o efeito de forma (CI) foi calculado resultando em 1,14 (Bacia 1), 1,52 (Bacia 2) e 1,85 (Bacia 3). O coeficiente volumétrico foi obtido a partir da Tabela 6, considerando que na área de estudo, a impermeabilização é baixa, portanto, $C2$ é igual a 0,3 (Bacias 1, 2 e 3). Encontrados esses 3 valores de base, o coeficiente de escoamento resultou em 0,210 (Bacia 1), 0,242 (Bacia 2) e 0,279 (Bacia 3). Para o valor de K foi utilizado o ábaco da Figura 4, obtendo o valor de 94% (Bacia 1), 98% (Bacia 2) e 100% (Bacia 3) para o coeficiente de distribuição espacial de chuvas.

A equação de McMath leva em consideração além da área, e a precipitação, o coeficiente de escoamento próprio e a declividade máxima do talvegue. O coeficiente de escoamento é composto por três informações que caracteriza a cobertura, o solo e a topografia do relevo. Para a área da bacia, conforme a Tabela 3, foi observado e comparado em outros trabalhos as seguintes características: Cobertura razoável e rala, solo de textura leve e topografia ondulada a montanhosa. A somatória dessas características resultou em um coeficiente de escoamento de 0,36 (Bacias 1, 2 e 3). A declividade do terreno é de 0,091 m/m (Bacia 1), 0,0249 m/m (Bacia 2) e 0,0275 (Bacia 3).

Avaliando os resultados obtidos, é possível analisar o superdimensionamento causado pelo método racional para a Bacia 1, decorrente de poucos parâmetros necessários para este modelo hidrológico. O método considera uma chuva distribuída igualmente em toda a área de

drenagem, o que acarreta um valor superestimado conforme a área de uma bacia aumenta, isso justifica sua limitação para o uso apenas em bacias menores.

O método racional modificado também apresenta a mesma deficiência do que tange à distribuição das chuvas na bacia uma vez que não prevê um fator de correção para este problema. O coeficiente de retardo minora o resultado obtido do método racional, mas quando comparado aos outros 3 métodos, ainda é insuficiente dados as considerações que os outros métodos realizam.

Os métodos McMath e Ven Te Chow apresentaram valores de vazão próximos, visto que ambos os métodos possuem diversas exigências para a definição do valor de coeficiente de escoamento. Entretanto, assim como os métodos racionais, não há um fator que corrige a distribuição de chuva ao longo da bacia, isso pode acarretar dimensionamentos equivocados em bacias com grandes áreas de drenagem.

O método que melhor se encaixa para a determinação de vazão de grandes bacias é o método de I-Pai Wu, visto que é um método simples de ser calculado, que leva em consideração fatores do solo, vegetação e é o único dentre os métodos apresentados que fornece um coeficiente de distribuição espacial das chuvas, que na equação é o coeficiente “K”, todavia em pequenas bacias seu emprego não é necessário.

5. Conclusão

Avaliando os métodos apresentados, o método I-Pai Wu se mostrou o mais adequado para cálculo de vazão de escoamento superficial entre as diferentes escalas de bacias rurais estudadas, uma vez que é um método que atendeu a demanda da Bacia 1, considerada uma bacia grande ($A > 2 \text{ km}^2$), bem como às bacias 2 e 3, que são bacias pequenas ($A < 2 \text{ km}^2$). O método de I-Pai Wu corrige o fator de maior deficiência das outras equações que é a distribuição espacial das chuvas. Entretanto, é válido ressaltar que para bacias pequenas (até $0,5 \text{ km}^2$ como foi feito neste trabalho), o método Racional também é adequado, pela sua fácil aplicação e pequena demanda de informações para alimentar o modelo, sendo necessário apenas estimar o coeficiente de escoamento, enquanto a área e a precipitação são informações facilmente acessíveis.

O método racional modificado não tem sua utilização justificada neste estudo, uma vez que só atendeu aos valores das bacias menores, onde foi aceita a utilização do método racional. O método Ven Te Chow e o método McMath apresentam algumas dificuldades quanto ao conhecimento mais aprofundado da área a ser estudada, principalmente o método Ven Te Chow, o qual exige a consulta de numerosas informações da vegetação, solo, além do uso de maior número de tabelas que as outras equações. Para todos os métodos é necessário atentar ao valor do coeficiente de escoamento, por ser o parâmetro variável, e, portanto, parâmetro que pode causar alterações mais expressivas no resultado.

6. Referências

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

ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidrologia Básica**, Unid 1, p. 1–55, 2016.

ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas da irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2ªed. Brasília: ANA, 2021.

ARNDT, M.A. **Uso e ocupação do solo e escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Cascavel**, 2009. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

BATISTA, C. M. N. **Drenagem superficial de vias de comunicação**, 2010. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Disponível em: <<http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/409/1/Dissertacao.pdf>> . .

BATISTA, M. DE J.; NOVAES, F. DE; SANTOS, D. G. DOS; SUGUINO, H. H. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. 2º ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2002.

BIANCHI, R. DE C.; RIZZI, N. E.; GUIMARÃES, R. Z.; SCHECHI, R. G. Estimativa da Vazão Máxima da Bacia Hidrográfica do Rio Canguiri através do Método de Ven Te Chow. **Revista RA'EGA**, v. 25, p. 164–185, 2012.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill; 1988.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO.. **Estudos Hidrológicos**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DE SÃO PAULO. DP-H06. **Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”**. São Paulo, 1999.

DIAS, R.H.S.; SILVA FILHO, E.P.; SANTOS, A.M.; 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**, v. 8, n. 5, p. 1493–1508, 2015.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2004.

FRANQUITTO, J. K. **Geração de modelos e índices digitais para diagnóstico da erosão de área agrícola**, 2019. 73f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2019.

FRITSCH, F. E. D. **Influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, Pato Branco – PR**. 2013. UTFPR.

GOMES, J.; FENDRICH, R. **A microinformática em projetos de macrodrenagem urbana**. Relatório Técnico Final de Pesquisa. Curitiba – PR, 1991

HOLLANDA, M.P.; CECÍLIO, R.A.; CAMPANHARO, W.A.; ZANETTI, S.S.; GARCIA, G.O. Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 489–496, 2015.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; GOMIDE, F.L.S.; MARTINS, J.A. **Hidrologia básica**. Editora Edgard Blücher, São Paulo – SP, 278p., 1976.

SNIS - Sistema nacional de informações sobre o saneamento. **Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021.

WU, I. PAI. **Hydrology of small watersheds in Indiana and Hydrodynamics of overland flow**. Lafayette: [s. n.], 1963.