

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

PEDRO CORSINO DURANT

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA
REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS

UBERLÂNDIA-MG

2019

PEDRO CORSINO DURANT

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA
REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental –Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Hudson de Paula
Carvalho

UBERLÂNDIA-MG

2019

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

D951t
2019 Durant, Pedro Corsino, 1993
Tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais [recurso eletrônico] / Pedro Corsino Durant. - 2019.

Orientador: Hudson de Paula Carvalho.

Coorientador: Roberto Terumi Atarassi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.868>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Ecologia. 2. Bacias hidrográficas. 3. Modelos matemáticos. 4. Escoamento superficial. I. Carvalho, Hudson de Paula, 1976, (Orient.). II. Atarassi, Roberto Terumi, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental. IV. Título.

CDU: 574

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

PEDRO CORSINO DURANT

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NA
REGIÃO DE UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental –Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 17 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. Roberto Roberto Terumi Atarassi – UFU
(coorientador)

Prof. Dr. Márcio Ricardo Salla – UFU

Prof. Dr. Júlio César Neves dos Santos – IFTM



Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho
ICIAG – UFU
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao criador de toda a natureza, aquele que ao me proporcionar fazer ciência revelou a mim a sua beleza. Nesse tempo descobri que o papel da ciência não é provar a sua existência, mas é ser instrumento nas mãos de homens para que o avanço do conhecer nos liberte da ignorância e nos revele a essência de sermos pessoas melhores. Obrigado, Deus, por mais esta caminhada.

Aos meus pais e irmãos, que sempre me incentivaram, me escutaram e nunca deixaram de me ajudar nos momentos de incerteza. O amor de vocês surpreende e me inspira todos os dias.

Ao meu orientador, Professor Dr. Hudson de Paula Carvalho, pelo conhecimento técnico adquirido ao seu lado, pelo cuidado ao ensinar, pelas críticas que trouxeram crescimento e pela boa amizade que construímos nesse tempo.

Ao coorientador, Professor Dr. Roberto T. Atarassi, pela atenção e dúvidas esclarecidas.

A Márcia Batistela pela companhia, apoio e toda organização do nosso local de trabalho.

Aos Professores Doutores presentes na banca examinadora desta dissertação. Foi um privilégio contar com a participação e o conhecimento de todos vocês.

Aos amigos de pesquisa, Darione Leal, Fernando Matias e João Carlos, que me ajudaram ao longo desta jornada e a todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), ao Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental – UFU, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento, apoio financeiro e ao incentivo à pesquisa e desenvolvimento ambiental sustentável.

Muito obrigado!

RESUMO

DURANT, P. C. **Tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais**. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.¹

O tempo de concentração (t_c) é um parâmetro hidrológico de grande importância que permite visualizar o comportamento de uma bacia quanto à resposta do escoamento superficial em relação à ocorrência de eventos chuvosos. O conhecimento de reação desse tempo nas bacias hidrográficas é fundamental, pois trata de um parâmetro indispensável em projetos de engenharia hidráulica para dimensionamento de pontes, bueiros, barramentos, vertedouros, entre outros. O tempo de concentração pode ser alcançado diretamente por hidrogramas unitários monitorados ou por equações empíricas já existentes na literatura. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estimar o tempo de concentração em três bacias hidrográficas experimentais na região de Uberlândia, Minas Gerais, a partir da análise de 62 hidrogramas observados, e compará-los com o desempenho de 23 equações empíricas utilizadas em estudos hidrológicos. O tempo de concentração médio dos hidrogramas levantados para as Bacias Hidrográficas Experimentais do Córrego Água Vermelha (BHEAV), Córrego Fundo (BHEFU) e Córrego Glória (BHEGL) foi respectivamente 615 min, 55 min e 215 min. As equações que manifestaram melhores desempenhos ao serem comparadas com os valores do tempo de concentração de cada hidrograma obtido foram a de Izzard, Giandotti, Ventura e Carter com erros estatísticos de variação em até 40 %. Por fim, foi proposto um equacionamento matemático capaz de estimar o tempo de concentração nas pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia – MG e também em qualquer bacia com características hidrológicas similares. O equacionamento proposto, que levou em consideração as variáveis área da bacia e declividade longitudinal do curso principal, mostrou-se bem consistente e com boa exatidão ao revelar um coeficiente de determinação 0,93 e coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,87.

Palavra-chave: Bacia hidrográfica experimental. Escoamento superficial. Hidrograma. Modelo matemático hidrológico.

¹Orientador: Hudson de Paula Carvalho - UFU

ABSTRACT

DURANT, P. C. **Tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais.** 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.²

The time of concentration (t_c) is a hydrological parameter of great importance that allows to visualize the behavior of a basin as the response of the superficial runoff in relation to the occurrence of rainy events. The knowledge of this time in watersheds is fundamental, because it is an indispensable parameter in hydraulic engineering projects for dimensioning bridges, culverts, gallery, spillways and among others. The time of concentration can be reached directly by monitored unit hydrograms or by empirical equations already existent in the literature. In this sense, the present work aims to estimate the time of concentration in three experimental watersheds, in the region of Uberlândia, Minas Gerais, from the analysis of 62 observed hydrograms and compare them with the performance of 23 empirical equations used in studies hydrological. The mean concentration time of the hydrographs collected for the experimental watersheds of the Água Vermelha Stream (BHEAV), Fundo Stream (BHEFU) and Glória Stream (BHEGL) were 615 min, 55 min and 215 min, respectively. The equations that showed the best performance when compared to the values the time of concentration each hydrograph obtained were those of Izzard, Giandotti, Ventura and Carter with statistical erros of variation up to 40%. Finally, it was proposed a mathematical equation capable of estimating the time of concentration to small watersheds in the region of Uberlândia-MG and also in any watershed with similar hydrological characteristics. The proposed equation, which took into account the variables of the basin area and longitudinal slope of the main course, was well consistent and with good accuracy when it revealed a coeficiente of determination 0.93 and Nash-Sutcliffe coefficient 0.87.

Keywords: Experimental watershed. Hydrograph. Mathematical hydrological model. Surface runoff.

²Orientador: Hudson de Paula Carvalho - UFU

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Métodos de separação gráfica do ESD com base no prolongamento do escoamento base a partir das inflexões A e C	17
Figura 2	Mapa da BHEAV e suas estações de monitoramento hidrológico	26
Figura 3	Mapa da BHEFU e suas estações de monitoramento hidrológico	27
Figura 4	Mapa da BHEGL e suas estações de monitoramento hidrológico	28
Figura 5	Mapa de Localização das Bacias Hidrográficas Experimentais	29
Foto 1	Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha –BHEAV	31
Foto 2	Sensor de nível ultrassônico da estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha – BHEAV	32
Foto 3	Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória – BHEGL	33
Foto 4	Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo – BHEFU	34
Foto 5	Sensor de nível ultrassônico da estação fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo – BHEFU	35
Figura 6	Método de Simpson para cálculo da área de cada seção de interesse	37
Figura 7	Imagem ilustrativa do procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013)	40
Figura 8	Uso do solo BHEAV	48
Figura 9	Uso do solo BHEFU	49
Figura 10	Uso do solo BHEGL	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Relação de estações da rede de monitoramento hidrológico do Laboratório de Hidrologia – HIDRO/UFU, com as respectivas localizações geográficas	30
Tabela 2	Equações empíricas para estimativa do tempo de concentração utilizadas neste trabalho. Fonte: Silveira (2005)	45
Tabela 3	Parâmetros fixos para BHEAV, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção	54
Tabela 4	Parâmetros fixos para BHEFU, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção	55
Tabela 5	Parâmetros fixos para BHEGL, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção	56
Tabela 6	Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEAV	59
Tabela 7	Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEFU	61
Tabela 8	Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEGL	62
Tabela 9	Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEAV	64
Tabela 10	Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEFU	66
Tabela 11	Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEGL	69
Tabela 12	Tabela de correlação entre o tempo de concentração e as variáveis independentes área (A), comprimento do talvegue principal (L), declividade média do curso principal (S) e intensidade de precipitação (i), nas bacias experimentais dos córregos Água Vermelha, Fundo e Glória	71
Tabela 13	Resultados estatísticos do modelo matemático para tempo de concentração ajustado para as três bacias hidrográficas experimentais em estudo	73
Tabela 14	Tempos de concentração observados ($t_{c_{obs}}$) em 30 hidrogramas e tempos de concentração estimados ($t_{c_{est}}$) a partir da equação matemática modelada para as três bacias hidrográficas	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	HIPÓTESE	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1	Monitoramento hidrológico em pequenas bacias hidrográficas	14
4.2	Escoamento superficial	15
4.3	Precipitação efetiva	18
4.4	Tempo de concentração	19
4.5	Hidrograma	21
4.6	Equações empíricas para tempo de concentração	22
5	MATERIAL E MÉTODOS	25
5.1	Área de Estudo	25
5.1.2	Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha.....	25
5.1.3	Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo.....	26
5.1.4	Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	27
5.2	Estações hidrometeorológicas monitoradas	29
5.3	Levantamento cartográfico e SIG - sistema de informação geográfica	36
5.4	Aquisição da curva-chave de vazão para cada bacia experimental	36
5.5	Método para o cálculo do Escoamento Superficial Direto	39
5.6	Método para estimativa da precipitação efetiva	42
5.7	Tempo de concentração (tc) a partir de hidrogramas	44
5.8	Tempo de concentração (tc) a partir de equações empíricas	44
5.8.1	Parâmetros utilizados nas equações empíricas	46
5.9	Modelagem matemática do tempo de concentração para pequenas bacias hidrográficas experimentais na região de Uberlândia, Minas Gerais	51
5.9.1	Teste estatístico de Nash-Sutcliffe para validação do modelo matemático de regressão comparado com tempo de concentração estimados por hidrogramas	51
5.10	Avaliação estatística do desempenho das equações empíricas para tempo de concentração	52
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54

6.1	Parâmetros obtidos para determinação do tempo de concentração por equações empíricas	54
6.2	Hidrogramas obtidos nas três bacias experimentais em estudo.....	57
6.2.1	Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha.....	58
6.2.2	Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Fundo.....	60
6.2.3	Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Glória.....	61
6.3	Resultados comparativos entre o tempo de concentração obtido por hidrogramas com aqueles estimados pelas equações empíricas.....	63
6.4	Modelagem de uma equação para estimativa do tempo de concentração em pequenas bacias hidrográfica na região de Uberlândia, Minas gerais.....	71
7	CONCLUSÕES.....	76
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A – HIDROGRAMAS BHEAV	82
	APÊNDICE B – HIDROGRAMAS BHEFU	91
	APÊNDICE C – HIDROGRAMAS BHEGL.....	95

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos ambientais insubstituíveis para manutenção da vida no planeta Terra. Sua disponibilidade não garante somente um equilíbrio ecológico como também promove o desenvolvimento humano e econômico da comunidade civil. Nas últimas décadas, inúmeros desafios têm surgido devido à escassez hídrica e à desigualdade na distribuição da água, tanto em escala global quanto em escala nacional brasileira. À vista disso, a preservação, o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos passaram a ser fundamentais na política ambiental do Brasil.

No Brasil, a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), Lei nº 9.433 de 1997, fundamenta que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e estabelece como instrumento de gestão o Plano Nacional de Recursos Hídricos, que serão elaborados por bacias hidrográficas, por Estado e para o país.

Uma bacia hidrográfica é caracterizada por uma área geográfica física de drenagem natural, delimitada por divisores de água, pela qual todo curso hídrico ou evento de chuva nesse espaço será direcionado para um único ponto de saída. A definição para caracterização do tamanho da bacia, como grande e pequena, ainda retrata um certo grau de subjetividade na literatura técnica. Isso se deve à variabilidade natural e fisiográfica atribuída a cada extensão hidrográfica, o que dificulta determinar um valor único e aceitável para classificar a grandeza de uma bacia.

Diversas pesquisas têm se destacado no campo hidrológico para grandes e pequenas bacias. O intuito de conhecer com afinco a aplicabilidade de vários métodos empíricos em bacias menores possibilita um melhor entendimento das atividades hidrológicas nela compreendidas e conseqüentemente um melhor aproveitamento racional sustentado na viabilização dos recursos naturais e no mínimo dano ao meio ambiente. Além disso, o monitoramento de pequenas bacias é de fundamental importância para o abastecimento da rede de informações e para os estudos que objetivam entender o comportamento e os impactos das atividades químicas, físicas e biológicas que influenciam o ciclo hidrológico.

Entre as diversas pesquisas realizadas, alguns termos, como escoamento superficial, escoamento subterrâneo, tempo de concentração e precipitação efetiva, são componentes importantes a serem estudados, pois refletem diretamente na vazão dos rios. O escoamento superficial e a precipitação efetiva são fatores decisivos para determinar o tempo de concentração em uma bacia hidrográfica.

Tempo de concentração é o período gasto para que a precipitação no ponto mais distante da bacia chegue até a seção de controle. No campo da hidrologia o tempo de concentração é um parâmetro de grande importância, pois é fundamental para estimar vazões máximas em projetos de engenharia, auxiliando na prevenção e minimização de desastres naturais referentes aos recursos hídricos.

Os valores do tempo de concentração podem ser estimados pela análise do hidrograma obtido no monitoramento de chuva e vazão em uma bacia hidrográfica, como também por diversas fórmulas empíricas que o determinam em função das características físicas da bacia, como a área, a forma, o comprimento do talvegue, a declividade longitudinal média, o tipo e a ocupação do solo, a densidade de drenagem, entre outros. Vale lembrar que a determinação do tempo de concentração por meio de equações empíricas está sujeita a imprecisões e incertezas significativas que se devem à particularidade do escoamento a que cada bacia está sujeita.

Reconhecendo as dificuldades para obter o tempo de concentração exato em pequenas bacias hidrográficas, dada a diversidade de bacias existentes no território brasileiro e seus diferentes interesses de ocupação em cada região, este estudo é de fundamental importância, pois busca produzir conhecimentos relevantes para tempo de concentração com valores que se aproximam ao máximo do real. Assim, projetos que dependem desse índice hidrológico para dimensionamento de obras hidráulicas serão capazes de apresentarem resultados mais precisos em razão do conhecimento dos processos hidrológicos ocorridos nas bacias hidrográficas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar o tempo de concentração para pequenas bacias hidrográficas na região Triângulo Mineiro, em Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- a) estimar o tempo de concentração para três bacias experimentais a partir da análise de hidrogramas;
- b) comparar o tempo de concentração dos hidrogramas com aqueles calculados por equações empíricas;
- c) modelar uma equação matemática que estime o tempo de concentração para as bacias experimentais em estudo.

3 HIPÓTESE

A partir da modelagem matemática é possível determinar uma equação empírica capaz de estimar o tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas, na região do Triângulo Mineiro, em Minas Gerais.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Monitoramento hidrológico em pequenas bacias hidrográficas

Bacia hidrográfica é caracterizada por uma área geográfica física de drenagem natural, pela qual todo curso hídrico ou evento de chuva nesse espaço será direcionado para um único ponto de saída. Mello e Silva (2013) conceituam como sendo uma área demarcada por limites geográficos, compondo uma rede de drenagem interligada de forma que todo fluxo hídrico conflua para um mesmo ponto denominado seção de controle ou exutório.

Estudos aplicados em bacias hidrográficas devem ser precedidos de um planejamento, que irá contribuir para o melhor entendimento dos aspectos físicos e matemáticos dos eventos hidrológicos nelas ocorridos. Pesquisas que trabalham com o monitoramento de bacias não têm como intuito principal a coleta de dados, mas essencialmente buscar uma forma coerente de interpretar esses dados para melhor delineamento no uso dos recursos hídricos e do solo.

O grande desafio começa em caracterizar essas áreas de estudos quanto ao seu tamanho. A variabilidade natural das características fisiográficas atribuída a cada extensão dificulta estabelecer um valor único e aceitável em grandeza de escala como forma de padronização das bacias hidrográficas. A homogeneidade em bacias menores favorece uma maior aplicabilidade das pesquisas, isso porque possibilita um melhor entendimento das atividades físicas, químicas e biológicas influentes no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, um melhor aproveitamento racional, sustentado na viabilização dos recursos naturais e no mínimo dano ao meio ambiente (PAIVA et al., 2016).

O limite de uma bacia pequena pode ser considerado em função da sua área ou do seu tempo de concentração, porém esses limites ainda transferem uma certa aleatoriedade. Assim, uma bacia hidrográfica é tida pequena caso apresente algumas propriedades como: precipitação uniformemente distribuída no tempo e espaço de toda bacia; a duração das tormentas exceder o tempo de concentração da bacia; a geração de água e sedimentos se dá pelo escoamento nas vertentes e os processos de retenção e de fluxo concentrado na calha dos cursos hídricos são pequenos (PONCE, 1989).

Pequenas bacias também podem ser classificadas em bacias representativas, bacias elementares e bacias experimentais. As representativas são aquelas situadas em uma mesma região homogênea e instrumentalizadas com equipamentos para obtenção de dados típicos que são aplicados em pesquisas intensivas, a fim de compreender os processos hidrológicos atuantes (PAIVA et al., 2016). As bacias elementares, ou de pequena ordem, apresentam

dimensões de grandeza de até 5 km² e permitem uma boa compreensão das atividades envolvidas no ciclo hidrossedimentológico devido à precisão na avaliação numérica dos parâmetros representativos da bacia. As experimentais são bacias relativamente homogêneas quanto às características fisiográficas e vegetação, podendo ser premeditadamente alteradas para práticas de estudos científicos no comportamento hidrológico. Pesquisas em bacias experimentais normalmente são comparativas, o que requer um monitoramento em duas ou mais unidades hidrográficas (PAIVA et al., 2016). De acordo com Farrell (1995), estudos realizados em bacias experimentais produzem muitos benefícios à ciência e sociedade.

As primeiras coletas hidrológicas no Brasil com dados organizados ocorreram por volta de 1920, com estações sob monitoramento da Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas, um núcleo operacional que era vinculado ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2009). Eram estações que monitoravam bacias de grande porte dirigidas para estudos de aproveitamento hidráulico, visando à instalação de hidrelétricas para geração de energia.

No Brasil ainda existe uma grande carência de dados hidrológicos para médias e pequenas bacias. O monitoramento de pequenas bacias é fundamental para o preenchimento da rede de informações hidrológicas do país (SOUZA et al., 2018). A maioria das estações em operação contempla áreas de drenagem com mais de 500 km² e mesmo assim é comum encontrar inúmeras dificuldades com falhas existentes nas séries históricas devido à má gestão dos postos instalados e ao baixo incentivo financeiro para o monitoramento hidrológico em bacias hidrográficas no Brasil.

Uma série histórica de dados confiáveis é muito importante para estudos hidrológicos, isso possibilita a obtenção de resultados próximos aos reais. Tais valores podem afetar os custos em projetos que utilizam valores de vazão em suas planificações. As informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) do Brasil, que integra dados pluviométricos, fluviométricos, climatológicos e sedimentométricos, podem ser extraídas no Portal HydroWeb, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), que opera as estações com auxílio de entidades parceiras ou contratadas.

4.2 Escoamento superficial

Os escoamentos que ocorrem em uma bacia são geralmente definidos como superficial, subsuperficial e subterrâneo. O escoamento superficial direto (ESD) consiste no

fluxo gerado sobre a superfície do solo e nos múltiplos canais de drenagem. Considera-se uma das principais fases do ciclo hidrológico, uma vez que a maioria dos eventos hídricos ocasionados em uma bacia hidrográfica está relacionada ao deslocamento da água superficial e aos desdobramentos acarretados por esse evento. O escoamento subsuperficial pode ser definido como fluxo que se dá rente às raízes da cobertura vegetal. Já o escoamento subterrâneo, também conhecido como escoamento de base, é o fluxo gerado na contribuição do aquífero (MELLO; SILVA, 2013).

O escoamento superficial tem início quando a intensidade da precipitação excede a velocidade de infiltração da água no solo. Quando isso ocorre, a velocidade de infiltração começa a ser excedida e a água precipitada começa a preencher as cavidades existentes na superfície do solo e, na sequência, começa o escoamento superficial (LINSLEY et al., 1975; MOHAMOUD et al., 1990).

A separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é de grande importância, pois permite uma compreensão da dinâmica dos escoamentos hidrológicos, o que proporciona uma análise da influência de medidas para a conservação de água e do solo na redução dos picos de vazão e no aumento das vazões mínimas em períodos de estiagem (HUANG; ZHANG, 2004). No entanto, a estimativa do escoamento superficial direto é um pouco complexa e dependente de vários fatores que influenciam esse processo. Tais fatores são de natureza climática, associados à precipitação em intensidade e duração, e fatores de natureza fisiográfica, referentes às particularidades intrínsecas de cada bacia hidrográfica.

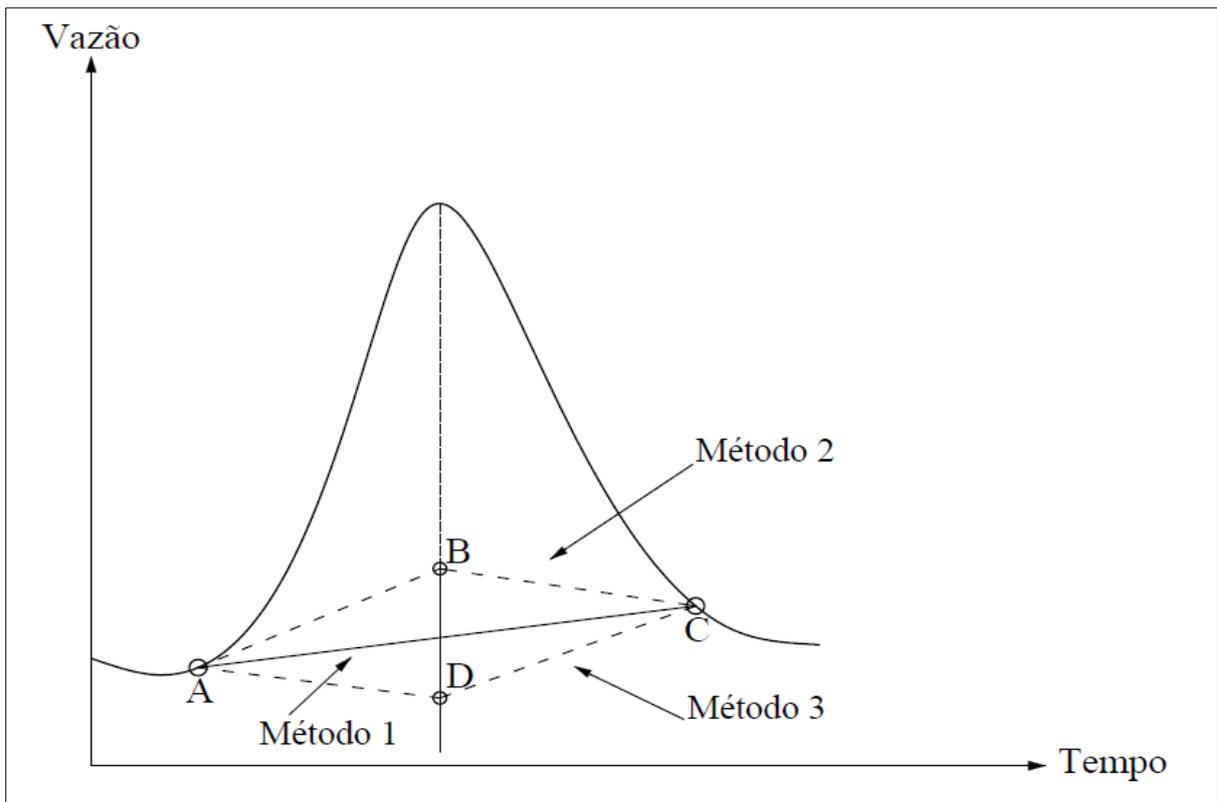
Alguns estudos têm procurado avaliar métodos que determinam o escoamento superficial com intuito de aprimorar a separação do escoamento superficial direto do subterrâneo (FUREY; GUPTA, 2003; GONZALES et al., 2009; COSTA; BACELLAR, 2010).

Miranda et al., (2014) analisaram os métodos de separação do escoamento direto e de base em duas sub-bacias na região do Alto Rio das Velhas, em Minas Gerais. Os autores utilizaram valores diários e totais anuais estimados a partir dos métodos do Intervalo Fixo (IF); do Intervalo Móvel (IM); e do Mínimo Local (ML), desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979). Os resultados indicaram que os métodos de separação produziram valores semelhantes entre si, com relação à estimativa do escoamento superficial diário e total anual, para as duas áreas de drenagem em estudo.

O escoamento superficial também pode ser determinado graficamente por meio do hidrograma da bacia. Mello e Silva (2013) e Tucci et al. (2014) destacam três metodologias para esse cálculo conforme demonstrado na Figura 1. Segundo Tucci et al. (2015), a primeira

metodologia está em considerar uma reta linear que ligue os pontos A e C, sofrendo alterações proporcionais à inclinação da reta AC. Esse procedimento define o escoamento de base e, por subtração do escoamento total, obtém-se o escoamento superficial direto. Na segunda metodologia, o escoamento de base é considerado linear, porém extrapolado abaixo da vertical do pico, sendo o escoamento superficial o volume acima da linha (ABC). A terceira metodologia consiste em extrapolar a linha anterior ao ponto A até encontrar o ponto D abaixo da vertical do pico. Ao ligar os pontos D e C tem-se a separação dos escoamentos.

Figura 1 – Métodos de separação gráfica do ESD com base no prolongamento do escoamento base a partir das inflexões A e C



Fonte: Adaptada de Tucci (2014).

No Brasil, ainda existe a necessidade de mais estudos que adotem a separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo pela análise de hidrogramas. Tais pesquisas encarregam de fornecer resultados que proporcionam atestar a validação do método quando submetido às condições brasileiras (COSTA; BACELLAR, 2010).

4.3 Precipitação efetiva

Na hidrologia a precipitação é conhecida como toda água presente do meio atmosférico em forma de umidade, que, em função das condições termodinâmicas, precipita e atinge a superfície terrestre. Chuva, granizo, neve, orvalho, geada e neblina consistem em formas de precipitação. O que as diferencia é o estado físico em que as partículas de água se encontram. A precipitação é a principal forma de entrada da água na bacia hidrográfica e seu comportamento no espaço e tempo proporciona respostas hidrológicas na bacia (MELLO; SILVA, 2013).

Toda precipitação terá um significado maior quando analisado seu total, duração e distribuição temporal e espacial. Ou seja, um valor precipitado pode ser pouco em um mês, muito em um dia e mais acentuado ainda em uma hora. A ocorrência e duração de um precipitado é um procedimento natural e aleatório de difícil previsão. Por esse motivo, os dados para boa parte dos problemas hidrológicos são considerados estatísticos (TUCCI et al., 2014).

Em hidrologia, a determinação da parcela de chuva que gera o escoamento superficial é nomeada precipitação efetiva ou excesso de precipitação. Paiva et al. (2016) ressaltam que a precipitação efetiva é determinada subtraindo do total precipitado as perdas devido à interceptação vegetal, ao armazenamento na superfície e à infiltração. Dessa forma, nem toda chuva contribui para a vazão do rio. Qualquer fator que afete a infiltração, o escoamento superficial ou a evapotranspiração tem influência no valor da precipitação efetiva (SAMPAIO et al., 2000).

Existem diferentes métodos para o cálculo da precipitação efetiva, que podem ser classificados em físicos, conceituais e empíricos. Os mais utilizados no campo da hidrologia são método do índice ϕ , método de Horton, método do Soil Conservation Service (SCS) e método de Green e Ampt (GA) (PAIVA et al., 2016).

Segundo Paiva et al. (2016), no método do índice ϕ estão incluídas todas as perdas de uma precipitação. Como para chuva intensa boa parte da perda ocorre pela infiltração, o índice ϕ pode ser interpretado como uma capacidade de infiltração constante. Portanto, pode-se dizer que nesse método a infiltração é subestimada no início da chuva e superestimada no fim. Na prática recomenda-se calcular os índices ϕ para vários eventos de chuva na bacia e adotar o valor médio entre eles.

4.4 Tempo de concentração

Em 1951, o engenheiro Thomas James Mulvany começou a revelar os primeiros conhecimentos sobre o tempo de concentração, a partir de um estudo hidrológico realizado para instituição de engenheiros civis da Irlanda. A partir de então, o termo tempo de concentração passou a ser bastante pesquisado, uma vez que qualquer projeto de engenharia que envolva questões hidrológicas precisa de, pelo menos, um parâmetro de tempo de resposta na bacia e muitas vezes esse parâmetro é o tempo de concentração (McCUEN et. al., 1984).

Seu conhecimento é fundamental na prevenção e minimização de acidentes naturais referentes aos recursos hídricos, pois sua aplicação é frequente em projetos para alertas de inundações, drenagem urbana, dimensionamento de obras hidráulica, estimativa de vazões máximas, entre outros (McCUEN et. al., 1984; MOTA; KOBİYAMA, 2015).

Em uma linguagem mais conceituada da ciência hidrológica é possível encontrar diversas definições para o tempo de concentração. Segundo Ven Te Chow (1988), o tempo de concentração corresponde ao tempo necessário para que o escoamento de superfície desloque do ponto mais afastado da bacia até um ponto em consideração. Tucci et al. (2014) afirmam que é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia deslocar até a seção principal de interesse.

O tempo de concentração pode ser obtido de maneira prática pela análise de hidrograma, definido como o tempo entre o fim da chuva efetiva e o ponto de inflexão do hidrograma. Ou então pela aplicação de equações empíricas disponíveis na literatura técnica. Essas equações foram desenvolvidas em campo ou laboratório a partir de métodos experimentais e analíticos, portanto devem ser aplicadas em condições que se aproximem daquelas para as quais foram determinadas (TUCCI et al., 1993).

Por outro lado, o tempo de concentração obtido diretamente do hidrograma pode apresentar melhores resultados do que as fórmulas empíricas, pois reflete diretamente a resposta da própria bacia ao evento de chuva ocorrido, desde que o monitoramento das variáveis hidrológicas seja realizado de forma cuidadosa.

Almeida et al. (2013), trabalhando na Bacia Hidrográfica do Córrego Guariroba, em Campo Grande - MS, testaram dez equações para estimativa do tempo de concentração, concluindo que a equação de Giandotti foi a que mais se aproximou do valor de tempo obtido pela análise do hidrograma gerado no monitoramento hidrológico da bacia em estudo.

Um estudo realizado por Souza et al. (2018) no Espírito Santo – ES avaliou métodos de apropriação para tempo de concentração em oito bacias hidrográficas rurais com áreas entre 17,77 e 82,33 km². Para isso, investigou as características fisiográficas de cada bacia por meio de diferentes resoluções espaciais de escala e selecionou três equações empíricas que melhor atenderam aos critérios do estudo. A partir de um cenário de referência criado e composto por um tempo de concentração estimado pelo método George Ribeiro, usualmente empregado no Brasil segundo o autor, e modelo digital do terreno com contornos equidistantes de 20 metros, apontou que as equações mais apropriadas entre as escolhidas foram na sequência George Ribeiro, Tulsa District e U.S. Corps of Engineers. Também relatou que os tempos de concentração estimados variaram em até 11% considerando informações entre diferentes planos de escala e até 52% considerando as variáveis calculadas a partir dos diferentes tempos de concentração das equações adotadas (SOUZA et al., 2018).

Silveira (2005) avaliou o desempenho de vinte e três equações para tempo de concentração em bacias urbanas e rurais com base em dois arquivos-teste, o primeiro com 29 bacias rurais e o segundo com 32 bacias urbanas. As equações foram classificadas de acordo com as condições dos locais que as originaram, podendo ser de parcela, urbanas e rurais. Entre as equações testadas, recomendou Ven Te Chow, Kirpich e U.S. Coprs of Enginerrrs para as bacias rurais devido aos melhores resultados apresentados. Já para bacias urbanas a equação que ofereceu maior representatividade foi a de Carter seguida de Schaake e Desbordes.

Segundo Silveira (2005), no Brasil, existe uma carência de indicadores para a escolha consciente da equação mais adequada para tempo de concentração, foi então que realizou uma análise de desempenho de algumas equações em seu estudo. Por meio das observações realizadas, concluiu que nem sempre as características da bacia que originou a equação são limitantes para a aplicabilidade delas, porém em alguns casos tornam-se necessários alguns ajustes finais.

Grimaldi et al. (2012), a partir de uma análise empírica, relataram em estudo para estimativa do tempo de concentração em quatro bacias hidrográficas na região do Texas, nos Estados Unidos, que amplas diferenças foram verificadas nos valores obtidos por diversas equações que adotam parâmetros fisiográficos de bacias hidrográficas. Neste estudo, os autores apontaram estimativas numéricas que diferiram em até 500% entre as equações testadas.

Mc Cuen et al. (1984) discorrem a relevância dos parâmetros de tempo de concentração e avaliação hidrológica em estudos hidráulicos. Afirmam que já existem

diferentes métodos de aplicação para estimar os diversos parâmetros de tempo hidrológico, tais como o tempo de concentração, o tempo de pico e o tempo de atraso. Porém, uma das dificuldades encontradas por hidrólogos é que boa parte das equações empíricas são apoiadas em dados limitados seja por falhas, por pouco tempo de estudo do ciclo hidrológico ou pelo pequeno número de bacias envolvidas no estudo. Dessa forma, as aplicabilidades desses métodos estão sujeitas a erros consideráveis devido às particularidades fisiográficas de cada bacia hidrográfica.

De acordo com Fang et al. (2008), o tempo de concentração é um parâmetro amplamente utilizado em projetos hidrológicos, por isso destacam a importância do tempo exato nas estimativas de concentração. Nesse estudo utilizaram cinco equações empíricas para estimar o tempo de concentração em 96 bacias na região central do Texas distribuídas em três conjuntos de parâmetros de bacias hidrográficas. Constataram variações relativas médias para estimativa do tempo de concentração entre as equações empíricas aplicadas, para um mesmo conjunto de parâmetros, de 38 a 207%.

Almeida et al. (2013), discorrendo sobre a relevância do tempo de concentração nos projetos de engenharia, relatam que muitas vezes projetistas ficam confusos por desconhecerem qual equação teria melhor aplicação em um projeto entre as inúmeras equações disponíveis na literatura. Também, em Campo Grande - MS, Almeida et al. (2016) desenvolveram um modelo para tempo de concentração com variáveis independentes utilizando uma matriz de correlação linear. Apontaram as variáveis tempo de base e tempo de retardo com maior correlação e geraram um modelo matemático que resultou em um coeficiente Nas-Sutcliff acima de 0,80.

Alguns estudos apontam que grande parte das equações empíricas utilizadas para estimar o tempo de concentração apresentam valores subestimados em relação à hidrogramas medidos, como cita Loukas e Quick (1996) e Silva et al. (2009). Por esse motivo, várias metodologias têm sido frequentemente testadas visando identificar a mais adequada para diferentes regiões de estudos.

4.5 Hidrograma

O hidrograma, por sua vez, é uma representação gráfica que relaciona o comportamento da vazão com a precipitação efetiva ao longo do tempo. Segundo Tucci et al. (2014), a distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e vazão na bacia hidrográfica.

Para determinar o tempo de concentração por meio do estudo de hidrogramas, é necessário entender a sua configuração. O hidrograma é caracterizado por três partes principais: região de ascensão, de pico e recessão. A região de ascensão está diretamente relacionada com a intensidade de precipitação pelo forte gradiente gerado. A região de pico abrange a área do valor máximo de vazão, marcada pelo final da fase de ascensão e início da fase de recessão. A região de recessão é decorrente da redução da precipitação, que é marcada por um ponto de inflexão C (Figura 1), tal ponto caracteriza o fim do escoamento superficial e início do escoamento subterrâneo. O tempo de concentração é definido como o tempo decorrente entre o fim da chuva efetiva e o fim do escoamento superficial.

A forma da bacia e sua condição de uso são fatores que influenciam o comportamento do hidrograma. Uma bacia do tipo radial concentra o escoamento antecipando e aumentando o pico da vazão máxima em relação a uma bacia alongada, que, por sua vez, apresenta escoamento predominante no canal principal com percurso mais longo até a seção de controle, o que proporciona um amortecimento das vazões e menores picos no hidrograma. Semelhantemente, essas configurações podem ser percebidas em bacias rurais e urbanas ao comparar as reações das hidrógrafas. Uma bacia rural que apresente cobertura vegetal tende a atrasar o escoamento e aumentar as perdas por infiltração e evapotranspiração. Em bacias urbanas, devido às alterações das áreas naturais em áreas impermeáveis junto às obras de drenagem pluvial, o escoamento de superfície é favorecido, refletindo maiores picos de vazões em menor tempo nos rios das cidades (TUCCI et al., 2014).

4.6 Equações empíricas para tempo de concentração

O tempo de concentração cotidianamente é estimado por meio de equações empíricas, denominadas método indireto, amplamente utilizadas em estudos hidrológicos (SOUZA et al., 2018). Tais métodos têm como característica a sua simplicidade de aplicação. Sua aplicabilidade é mais comum na ausência de dados hidrometeorológicos, pois diversas fórmulas experimentais exigem parâmetros fisiográficos que podem ser permanentes, como a área de drenagem, comprimento e declividade do talvegue, diferença de cotas entre a saída da bacia e o ponto mais alto do talvegue, rugosidade da superfície, uso e ocupação do solo, entre outros (MATA-LIMA et al., 2007). Por esta razão, a determinação do tempo de concentração por equações empíricas está sujeita a incertezas significativas que se devem às condições físicas de cada bacia a que a equação foi submetida.

É importante destacar que as equações para o tempo de concentração, por apresentarem uma natureza empírica e prática, muitas vezes são apresentadas em trabalhos técnicos e acadêmicos sem a menção de todas as suas configurações de origem e suas limitações de aplicação. Como destaca Silveira (2005), existem casos em que informações básicas sobre a origem e limites previstos para equações se perderam, por isso se tornou muito difícil acessar as publicações originais.

Uma das equações empíricas bem conhecidas e aplicadas em projetos hidráulicos no Brasil é a equação de Kirpich. Essa equação foi obtida para o estado do Tennessee (EUA) com base nos dados coletados em campo pelo engenheiro Charles Ernest Ramser, a partir do monitoramento de seis bacias hidrográficas rurais que apresentavam área entre 0,0051 e 0,4533 km². Após realizar alguns ajustes, a recomendação dessa equação por Kirpich (1940) é para aplicação em pequenas bacias rurais com áreas de até 0,8 km². Sua utilidade para bacias com extensões maiores daquelas utilizadas em sua formação é esperar valores para tempos de concentração menores que os reais, segundo Silveira (2005).

Em geral, os resultados apresentados com o emprego da equação de Kirpich demonstram-se subestimados (SILVA et al., 2008; McCUEN et al., 1984; LOUKA; QUICK, 1996 apud SILVEIRA, 2005; SILVEIRA, 2016, KOBİYAMA et al., 2006).

Mota e Kobiyama (2015) alegam que a proposta de Kirpich era a utilização de duas curvas de regressão com fator K_1 e K_2 que se diferenciavam pela declividade utilizada. Onde S_1 é a declividade do curso d'água e S_2 é a declividade média da bacia. Isso significa que S_1 é simplesmente H_1/L ; e $S_2 = H_2/A$, em que H_1 é o desnível da bacia e H_2 é a altura média da bacia acima da cota do exutório, em pés; A é a área da bacia em milhas terrestres e L é o comprimento do curso principal de drenagem, em milhas. A equação com o fator S_2 não se estabeleceu, certamente pela dificuldade em se obter H_2 .

As equações de Giandotti, Ventura e Pasini são equações de origem italiana. Apesar de não serem muito utilizadas no Brasil, na Europa são bem aplicadas. Giandotti, principalmente, tem apresentado resultados coerentes em estudos realizados para bacias italianas (MOTA, 2012). Durant (2016), avaliando quatro equações para tempo de concentração na bacia experimental do Glória - MG, apontou Giandotti como a equação de menor erro ao comparar com valor médio do tempo de concentração obtido a partir de hidrogramas da bacia.

A equação de Izzard foi desenvolvida com base em experimentos de laboratório a respeito de escoamento superficial em rodovias e gramados. Silveira (2005) relata que essa é uma equação de pequena escala, assim como as equações de Kerby-Hathaway e Onda

Cinemática, devido à dimensão dos seus experimentos. Em seu trabalho alega que as equações de pequena parcela de Izzard e Onda Cinemática conseguiram boas estimativas para tempo de concentração em bacias rurais de médio e grande porte. Mota (2012), avaliando 16 fórmulas de tempo de concentração, a partir de duas cartas cartográficas, na região norte de Santa Catarina, relata que a fórmula que mais aproximou do tempo de concentração real medido foi a de Izzard.

A equação para tempo de concentração de Doodge foi obtida com base em dados de dez bacias rurais na Irlanda com área variando entre 140 a 930 km². Para a fórmula FAA, pouco se tem informações, mas tudo indica que seu uso é mais adequado para áreas muito pequenas e de alta impermeabilização por ser desenvolvida para drenagem de aeroportos (MCCUEN et al., 1984).

Segundo Folmar et al. (2007), a equação SCS (Soil Conservation Service) – Lag teve origem com os estudos de Victor Mockus para cálculo do hidrograma de pico. Para isso utilizaram-se dados de 24 bacias em território norte-americano, com área entre 0,005 a 55km².

Para modelagem da fórmula de McCuen et al (1984), contou-se com dados de 48 bacias com área entre 16 e 0,4 km² e declividade máxima dos canais de drenagem de 3%. O tempo de concentração da fórmula é resultado de uma inspeção em campo e aplicação do método de velocidade do Soil Conservation Service - SCS descrito no relatório SCS-USD (1986). Kobiyama et al. (2006), ao realizarem uma análise comparativa da média do tempo de concentração obtido em cinco eventos de chuva com aqueles estimados por cinco fórmulas empíricas, concluíram que a equação de McCuen et. al (1984) foi a que proporcionou a melhor estimativa, enquanto a de Dooge, a pior, por superestimar o valor do tempo de concentração.

5 MATERIAL E MÉTODOS

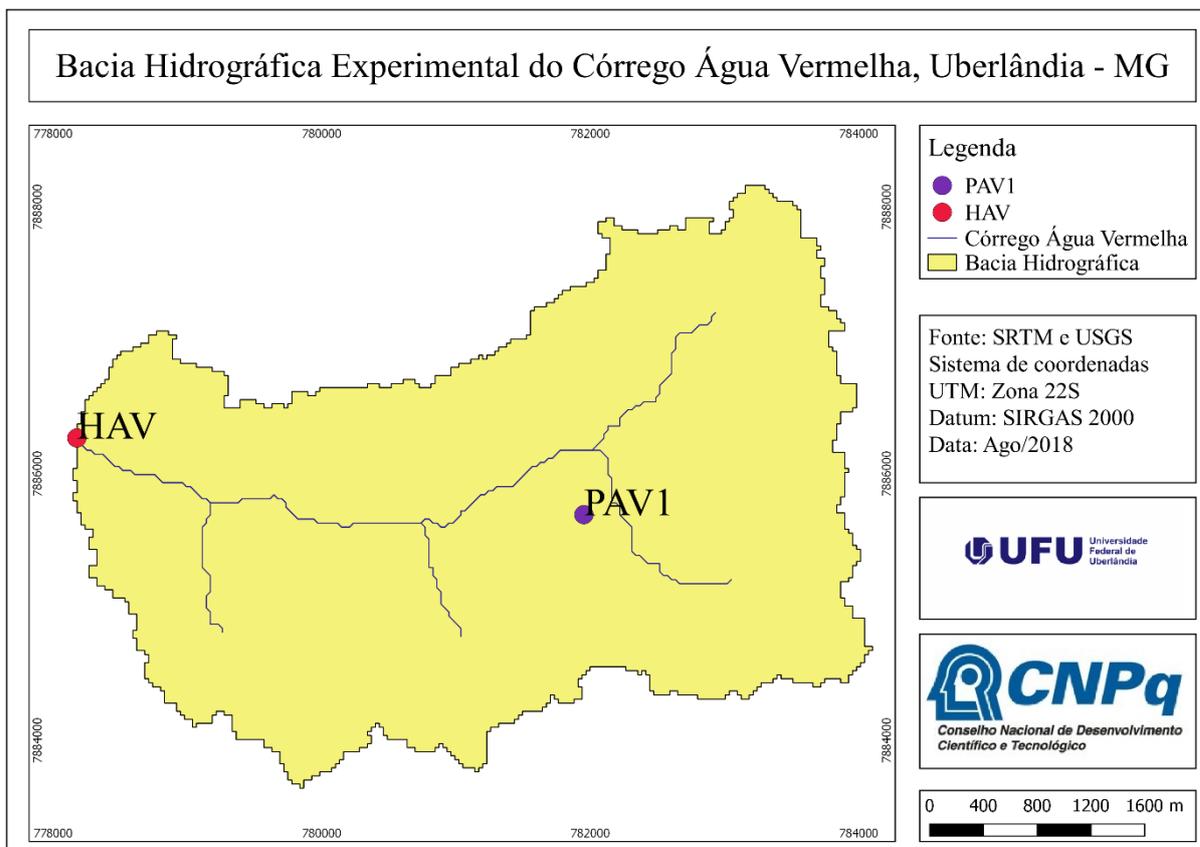
5.1 Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido em três pequenas bacias hidrográficas experimentais conforme detalhado nas Figuras 2, 3 e 4. Todas as bacias estão localizadas no município de Uberlândia, Minas Gerais, sendo duas delas ocupadas parcialmente pelo perímetro urbano.

5.1.2 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha –BHEAV (Figura 2) situa-se na região sudoeste de Uberlândia e possui cerca de 16,35 km² de área de drenagem. É caracterizada como uma pequena bacia rural, com seção de controle localizada geograficamente a 19°06'12'' S e 48°20'50'' W, próximo à Fazenda Experimental Água Limpa, da Universidade Federal de Uberlândia(UFU). O Córrego Água Vermelha é um dos tributários do Rio Tijuco, que é um dos principais afluentes do Rio Paranaíba. Esse córrego faz parte da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba (PN3), uma importante bacia do Estado de Minas Gerais.

Figura 2 – Mapa da BHEAV e suas estações de monitoramento hidrológico



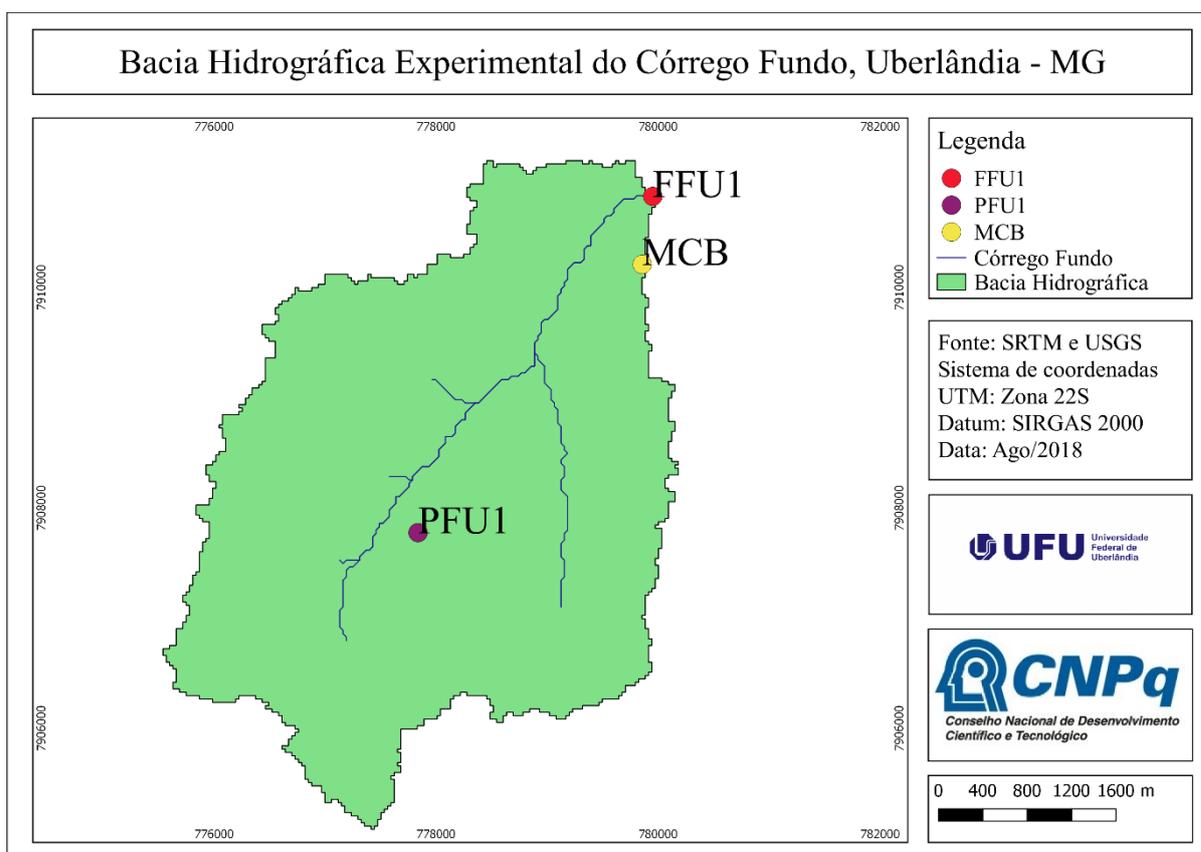
Fonte: O autor.

Nota - A notação PAV1 significa estação pluviométrica 1, da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha; HAV significa estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha

5.1.3 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo–BHEFU (Figura 3) está inserida na região noroeste do município de Uberlândia e apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 17,22 km². É uma bacia parcialmente urbanizada com área de 3,42km² e com uma seção de controle localizada geograficamente a 18°52'32'' S e 48°20'34'' W, próximo à Fazenda Experimental Capim Branco, da UFU. O Córrego Fundo também desemboca no Rio Uberabinha, o que permite classificá-lo como um dos tributários da rede hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari (PN2).

Figura 3 – Mapa da BHEFU e suas estações de monitoramento hidrológico



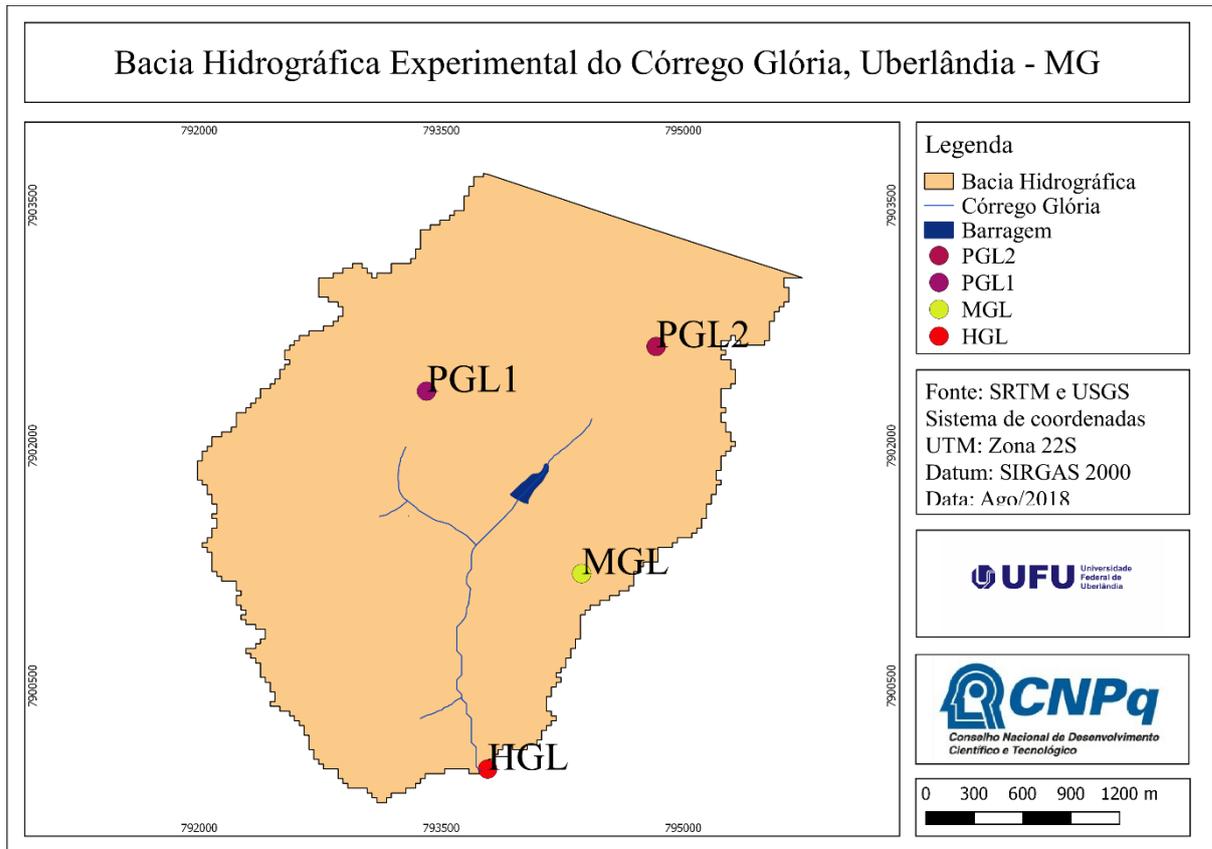
Fonte: O autor.

Nota - A notação FFU1 significa estação fluviométrica 1, da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo; PFU1 significa estação pluviométrica 1, da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo; MCB significa estação meteorológica da Fazenda Experimental Capim Branco

5.1.4 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória–BHEGL (Figura 4) encontra-se na região sudeste da cidade de Uberlândia e possui uma área de contribuição de 8,27 km². Sua área foi delimitada a partir da seção de controle, localizada geograficamente a 18°58'18" S e 48°12'36" W, até a linha ferroviária inaugurada pela Companhia Mogiana de Estradas de Ferro em 1895. Intervenção que explica o traçado linear na parte mais alta, na porção norte da bacia para sua delimitação. É uma bacia parcialmente urbanizada com área de 1,76 km² e possui em seu interior o Campus Glória, da UFU. O Córrego do Glória apresenta-se como um tributário da margem direita do Rio Uberabinha e este, por sua vez, é um dos principais cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari (PN2).

Figura 4 – Mapa da BHEGL e suas estações de monitoramento hidrológico

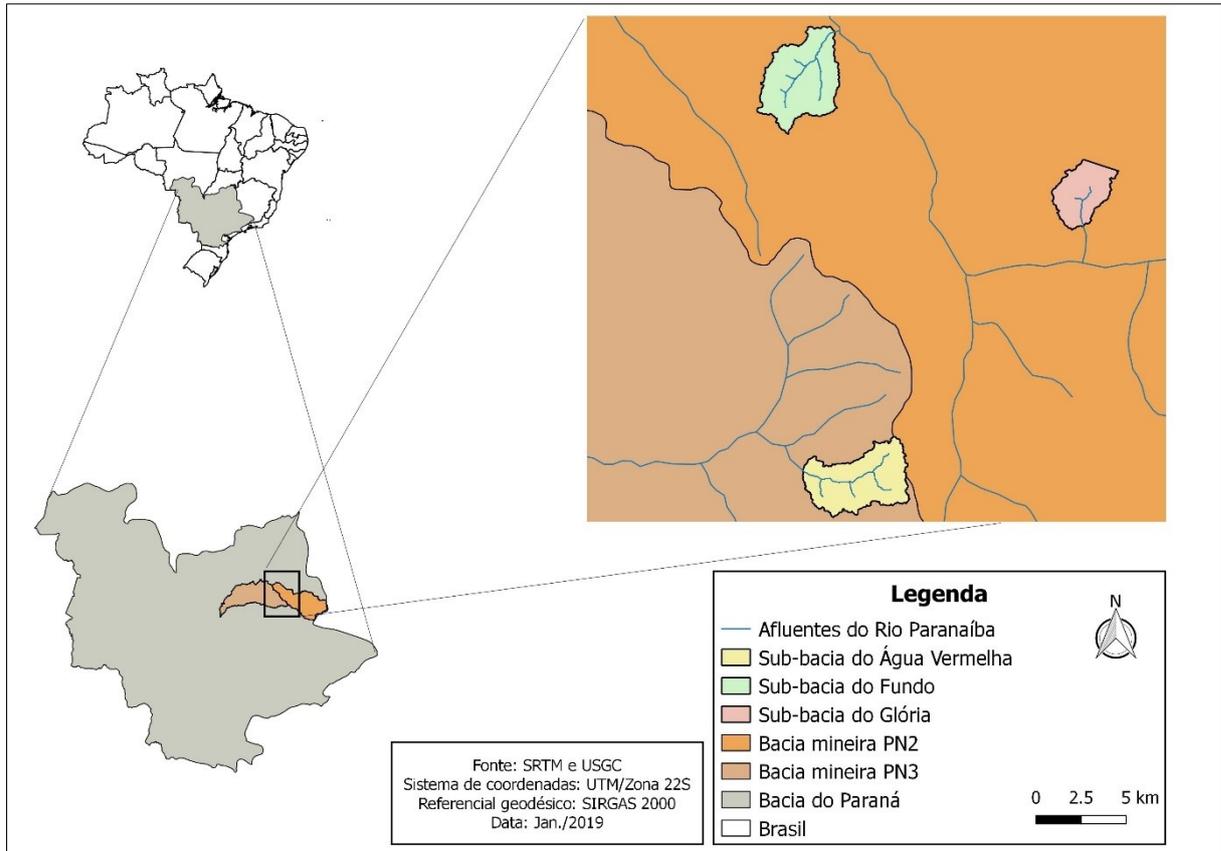


Fonte: O autor.

Nota - A notação PGL1 significa estação pluviométrica 1, da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória; PGL 2 significa estação pluviométrica 2, da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória; MGL significa estação meteorológica da Fazenda Experimental do Glória; HGL significa estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Na Figura 5 está representado um mapa de localização das bacias hidrográficas experimentais estudadas neste trabalho.

Figura 5 – Mapa de Localização das Bacias Hidrográficas Experimentais



Fonte: O autor.

5.2 Estações hidrometeorológicas monitoradas

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foi necessário o monitoramento de uma pequena rede hidrometeorológica, com suas localizações geográficas apresentadas na Tabela 1, que são coordenadas pelo Laboratório de Hidrologia (HIDRO), da Universidade Federal de Uberlândia. Nessa rede estão em operação duas estações hidrométricas para coleta de dados do nível da água e precipitação, uma estação fluviométrica para a obtenção do nível d'água, quatro estações pluviométricas para coleta de dados de precipitação e duas estações meteorológicas automatizadas, com o intuito de se obter dados meteorológicos. As estações hidrométricas e a fluviométrica, capazes de registrar níveis de água nas seções controle dos cursos hídrico principal, são compostas por um sensor de nível ultrassônico e um *datalogger* que registra os dados coletados em intervalos de 5 minutos. As demais estações pluviométricas e meteorológicas contribuem para as coletas de dados de precipitação incidentes nas bacias monitoradas.

Tabela 1 – Relação de estações da rede de monitoramento hidrológico do Laboratório de Hidrologia – HIDRO/UFU, com as respectivas localizações geográficas

Estação	Latitude	Longitude
Estação Hidrométrica Água Vermelha HAV1	19° 5'51.54"S	48°21'22.36"O
Estação Pluviométrica Água Vermelha PAV2	19° 6'8.32"S	48°19'12.93"O
Estação Meteorológica Glória MGL	18°57'38.00"S	48°12'16.80"O
Estação Hidrométrica Glória HGL1	18°58'17.98"S	48°12'36.07"O
Estação Pluviométrica Glória PGL2	18°57'1.50"S	48°12'50.30"O
Estação Pluviométrica Glória PGL3	18°56'51.70"S	48°12'1.80"O
Estação Meteorológica Capim Branco MCB	18°52'52.58"S	48°20'37.21"O
Estação Fluviométrica Fundo FFU1	18°52'32.48"S	48°20'34.25"O
Estação Pluviométrica Fundo PFU1	18°54'12.70"S	48°21'44.97"O

Fonte: O autor.

As estações hidrométricas são responsáveis por monitorar dados fluviométricos, pluviométricos, sedimentométricos e de qualidade da água. Atualmente as duas estações hidrométricas monitoradas pelo HIDRO, uma na seção de controle da BHEAV (Foto1 e 2) e outra na seção de controle BHEGL (Foto3), estão coletando somente dados de vazão e precipitação. Ambas são compostas por pluviômetros, modelos 260-0111 e 260-25001M-A, marca NovaLynx - para quantificação da chuva e sensores do tipo ultrassônico, modelo GUT740, marca *Xi'an Gavin Electronic Technology Co.* - para medição do nível da água e o *datalogger* para armazenamento e processamento de dados capturados pelo pluviômetro e o sensor de nível. É importante destacar que todos os equipamentos antes de serem instalados em campo foram testados e calibrados no HIDRO.

Foto 1 – Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha –BHEAV



Fonte: O autor.

Foto 2 – Sensor de nível ultrassônico da estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha – BHEAV



Fonte: O autor.

A estação hidrométrica do Glória (Foto 3) foi a primeira a ser instalada, por isso tem maior tempo de monitoramento. Sua operação teve início em outubro de 2015, o que possibilitou um arquivo de dados consistentes de aproximadamente dois anos e meio para este estudo. Em relação à estação hidrométrica da BHEAV, o seu funcionamento teve início em dezembro de 2016, oferecendo um arquivo de dados em torno de um ano e meio.

Foto 3 – Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória – BHEGL



Fonte: O autor.

A imagem contida nas Fotos 4 e 5 a seguir representa a seção de controle da BHEFU, próximo ao Rio Uberabinha. Nela estão os equipamentos destinados ao monitoramento dos dados do nível d'água e da chuva, que contribuem para os cálculos do escoamento superficial na bacia. O principal instrumento nessa estação é o sensor ultrassônico, modelo GUT740, marca *Xi'an Gavin Electronic Technology Co.* acoplado ao *datalogger*. O monitoramento da

estação fluviométrica do Córrego Fundo é o mais recente, seus equipamentos começaram a coletar dados do nível d'água e de chuva em setembro de 2017, mês em que a estação entrou em operação.

Foto 4 – Estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo–
BHEFU



Fonte: O autor.

Foto 5 – Sensor de nível ultrassônico da estação fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo – BHEFU



Fonte: O autor.

As outras quatro estações pluviométricas estão instaladas ao longo das três bacias experimentais, sendo duas na BHEGL, uma na BHEFU e uma na BHEAV. Nelas estão os equipamentos destinados ao levantamento de dados de chuva. Os sensores de precipitação são do tipo báscula, modelos 260-0111 e 260-25001M-A, marca Nova Lynx. Dessa forma, toda vez que ocorre uma precipitação o gradiente gerado faz com que a báscula desloque o seu eixo proporcionando um pulso de 0,25mm, que é registrado no *datalogger*. Os pluviômetros foram instalados com altura padrão de 1,5 m e distantes de obstáculos que possam afetar a captação da chuva.

As estações meteorológicas automatizadas apresentam vários sensores que registram continuamente os parâmetros meteorológicos, como a pressão atmosférica, temperatura e

umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outros. As estações meteorológicas estão localizadas na BHEGL e na BHEFU, sendo de interesse para esta pesquisa os dados de precipitação coletados em cada uma delas.

5.3 Levantamento cartográfico e SIG - sistema de informação geográfica

Para melhor detalhamento e obtenção de dados morfométricos das bacias hidrográficas em estudo, utilizaram-se dois modelos digitais de elevação em imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com definição espacial de 30 metros, disponíveis gratuitamente pela NASA na plataforma USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos <<https://ers.cr.usgs.gov/register/>>). O sistema de coordenadas utilizado foi o Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 22S, com referencial geodésico SIRGAS 2000 e código EPSG 31982.

Com auxílio do *software* livre de sistema de informação geográfica Qgis, versão 2.18.19 (Las Palmas), e complementos da ferramenta Taudem 5.1.2 (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), foi possível extrair as informações fisiográficas das três bacias experimentais. Esse complemento consiste em um conjunto de ferramentas para levantamento de análises hidrológicas com base no Modelo Digital de Elevação (MDE). Além disso, usou-se também o complemento Open Layers Plugin, que possibilita acesso às imagens do Google Satélite. Dessa forma, foi possível delimitar de modo preciso, em cada bacia, a área de drenagem, o comprimento do talvegue principal, a declividade do canal de drenagem e o uso e ocupação do solo. A fim de obter informações mais atualizadas do uso e ocupação do solo, foram realizadas visitas às bacias com intuito de obter verdades de campo que confirmaram as informações obtidas por meio das imagens orbitais.

5.4 Aquisição da curva-chave de vazão para cada bacia experimental

Para obter os pontos da curva chave, relação nível-vazão na seção de controle, foi utilizado um micromolinete fluviométrico, modelo MCN-1, e um contador de pulsos digital, fornecidos pela empresa de comércio e tecnologia JCTM. Os levantamentos de vazão e cota foram realizados mensalmente. Nesse procedimento foram obtidos dados de velocidade e profundidade em intervalos de 0,2 metros ao longo da largura do córrego. Para cada intervalo,

foram realizadas duas medidas de velocidades em posições diferentes, uma a 20% e outra a 80% da profundidade, adotando como referência a superfície da água.

A velocidade da água em cada trecho foi calculada por meio da equação do micromolinete (Equação 1), fornecida pelo fabricante do equipamento, envolvendo a média do número de rotações de três repetições de 30 segundos medido pelo contador de pulsos.

$$V_i = 0,02290369 + 0,06409488 * N \quad \text{Equação 1}$$

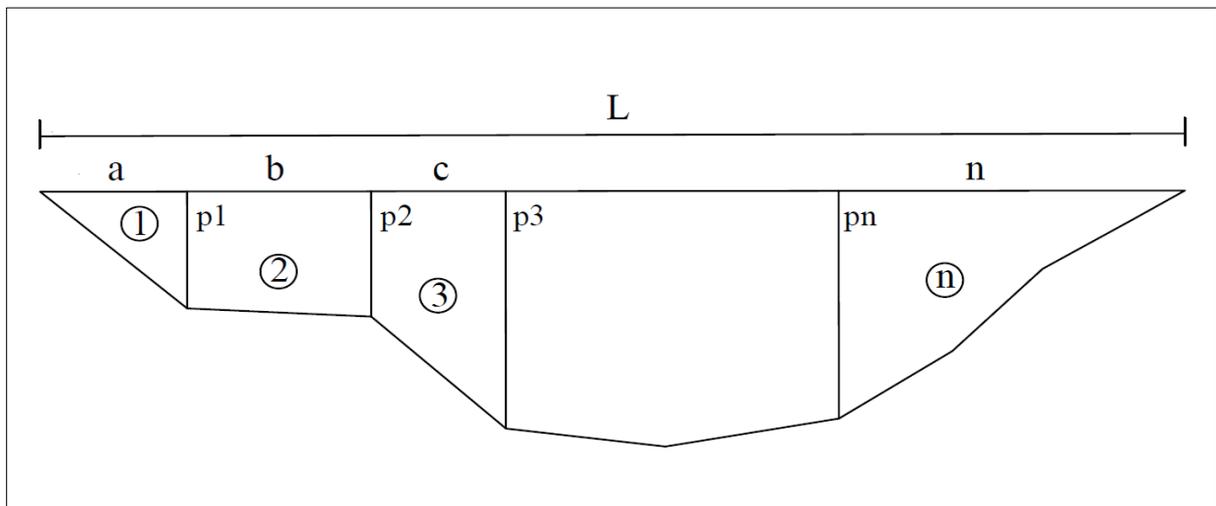
Em que:

V_i = velocidade média da água, em m/s;

N = média do número de rotações, em rps (rotações por segundo).

A área de cada seção do córrego foi obtida pela metodologia de Simpson ilustrada na Figura 6, que possibilita o cálculo de cada setor com largura de 0,20 m delimitado por diferentes profundidades.

Figura 6 – Método de Simpson para cálculo da área de cada seção de interesse



Fonte: O autor.

Dessa forma, por meio da Equação 2, foi possível estimar a área de cada trecho do corpo hídrico, a partir dos intervalos de largura e das profundidades verticais.

$$A_1 = \frac{p_1}{2} a; A_2 = \frac{(p_1+p_2)}{2} b; A_3 = \frac{(p_2+p_3)}{2} c; \dots ; A_n = \frac{p_n}{2} n \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

$A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ = área de cada trecho do corpo hídrico, em m^2 ;

$p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ = profundidade das verticais, em m;

$a, b, c \dots n$ = intervalos do corpo hídrico, em m.

O volume de água por tempo que escoa pela seção de controle foi determinado pelo somatório do produto entre a velocidade média e a área de cada trecho (equação da continuidade). Dessa forma, a vazão líquida total de cada córrego foi definida pela Equação 3.

$$Q_t = \frac{p_1 a}{2} \times \frac{V_{m1}}{2} + \frac{(p_1 + p_2) b}{2} \times \frac{(V_{m1} + V_{m2})}{2} + \frac{(p_2 + p_3) c}{2} \times \frac{(V_{m2} + V_{m3})}{2} + \dots \frac{p_n n}{2} \times \frac{V_{mn}}{2} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

Q_t = vazão líquida total do córrego, em $m^3 s^{-1}$;

V_m = velocidade média em cada trecho do córrego, em $m s^{-1}$.

Após obtidas a vazão na seção de controle e a cota do nível d'água embaixo do sensor, foi necessário correlacionar esses valores para gerar a curva chave. A equação da curva chave foi construída no *software* Sigma Plot[®] 12.0. Por meio deste aplicativo estatístico também foi verificado o ajuste da equação do erro padrão da estimativa (EPE), do teste F da equação de regressão ao nível de 5% de probabilidade, o teste t dos coeficientes da equação ao nível de 5% de probabilidade e a normalidade dos resíduos, avaliado pelo teste de Shapiro Wilk, também ao nível de 5% de probabilidade.

O levantamento dos pontos para construção da curva chave no Córrego Glória iniciou-se em outubro de 2015 e perdurou-se até maio de 2018, somando-se ao todo 27 pares de cota x vazão. No Córrego Água vermelha, iniciou-se o levantamento em fevereiro de 2017 e seguiu-se até junho de 2016, obtendo-se 16 pares de cota x vazão. Já no Córrego Fundo a primeira coleta se deu em janeiro de 2018 e estendeu até junho de 2018, possibilitando um total de 6 pares de cota x vazão. O pequeno número de pontos levantados na bacia do Córrego Fundo justifica-se pelo pouco tempo de monitoramento hidrológico nessa bacia. Vale ressaltar também que as seções transversais dos córregos nas áreas de monitoramento foram mantidas praticamente iguais durante todo período de coleta.

5.5 Método para o cálculo do Escoamento Superficial Direto

Para obtenção do escoamento superficial direto, foi necessário, inicialmente, separá-lo do escoamento subterrâneo. A Figura 7 ilustra a forma de determinação do escoamento superficial direto utilizado neste trabalho, a qual está descrita em Mello e Silva (2013).

Analisando a Figura 7 nota-se o ponto de inflexão A, o qual pode ser determinado visualmente com facilidade a partir do aumento abrupto dos valores de vazão ao longo do tempo. Por outro lado, o ponto de inflexão C foi determinado considerando o final do escoamento superficial, na porção final do hidrograma. A constante que representa esse comportamento foi denominada neste trabalho “K”, e sua determinação está parametrizada na Equação 4.

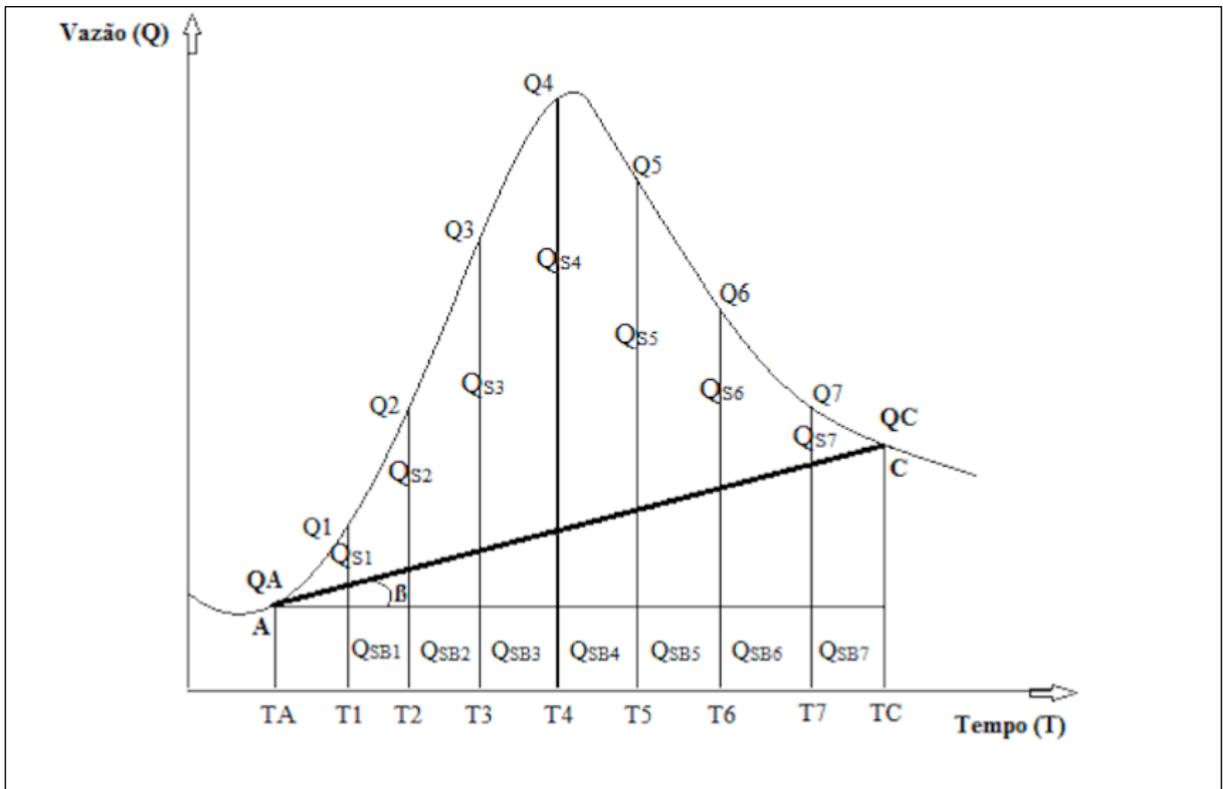
$$\frac{Q_f}{Q_i} = K \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

K = coeficiente constante que representa o quociente da divisão da vazão final Q_f e da inicial Q_i , adimensional;

Para cada hidrograma, no intuito de determinar o ponto C, a constante K é determinada fazendo-se a divisão entre as vazões superficiais Q_2/Q_1 , Q_3/Q_2 ... (Figura 7) até que a divisão resulte em um valor muito diferente, o qual representa a inflexão do hidrograma, também conhecido como ponto C ou o fim do escoamento superficial direto.

Figura 7 – Imagem ilustrativa do procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013)



Fonte: Adaptada de Mello e Silva (2013).

A separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo foi obtida de acordo com a metodologia descrita em Mello e Silva (2013). Este procedimento considera linear o comportamento do escoamento de base entre os pontos A e C, com alterações proporcionais à inclinação da reta AC, para um evento isolado de precipitação efetiva. Para calcular a inclinação da reta AC, foi utilizada a Equação 5.

$$m = \text{tg}(\beta) = \left(\frac{Q_C - Q_A}{T_C - T_A} \right)$$

Equação 5

Em que:

m = inclinação da reta AC, em $L s^{-2}$;

Q_C = vazão superficial medida no ponto C, em $L s^{-1}$;

Q_A = vazão superficial medida no ponto A, em $L s^{-1}$;

T_C = tempo no ponto C, em segundos;

T_A = tempo no ponto A, em segundos.

Após isso, foi necessário calcular o incremento das vazões do escoamento de base a partir de Q_A , conforme parametrizado na Equação 6.

$$J = m \cdot \Delta t \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

J = valor a ser incrementado às vazões do escoamento de base a partir de Q_A , em $L s^{-1}$;

Δt = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, em segundos.

Após a obtenção do valor a ser incrementado a partir do escoamento em Q_A , foram determinadas as vazões subterrâneas (Q_{SB}), por meio da Equação 7.

$$Q_{SB1} = Q_A + J; Q_{SB2} = Q_{SB1} + J; Q_{SB3} = Q_{SB2} + J \dots \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$Q_{SB1,2,\dots}$ = vazão subterrânea, $L s^{-1}$.

Dessa forma, a soma da última vazão antecedente ao ponto de inflexão C, acrescido do incremento J , será equivalente a Q_C . Após a obtenção das vazões subterrâneas, foram obtidas as vazões do escoamento superficial direto, por meio da diferença entre a vazão total e a respectiva vazão subterrânea, conforme Equação 8.

$$Q_{S1} = Q_1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q_2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q_3 - Q_{SB3} \dots \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

$Q_{S1,2,\dots}$ = vazão superficial direta no ponto 1, no ponto 2... da hidrógrafa, em $L s^{-1}$;

$Q_{1,2,\dots}$ = vazão medida pelo linígrafo referente ao ponto 1, no ponto 2... da hidrógrafa, em $L s^{-1}$.

Por fim, por meio do método numérico da regra dos trapézios, o escoamento superficial direto, que equivale à precipitação efetiva, foi obtido conforme parametrizado na Equação 9.

$$ESD = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{S_i} \cdot \Delta t)}{A_{BH}} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

ESD = volume do escoamento superficial direto, em mm;

A_{BH} = área da bacia hidrográfica, em m^2 ;

Q_{Si} = vazão referente ao escoamento superficial direto no momento i , em $L s^{-1}$;

n = número de vazões que compõe o escoamento superficial direto;

i = representa a i -ésima medida de vazão.

5.6 Método para estimativa da precipitação efetiva

A precipitação efetiva representa uma parcela da chuva total que incide na bacia hidrográfica, capaz de gerar escoamento superficial, que, conseqüentemente, irá contribuir no aumento da vazão do rio principal dessa bacia. Neste trabalho, a precipitação efetiva foi estimada pelo método do índice ϕ , de acordo com Tucci et al. (2014) (Equação 10). Segundo esses autores, os métodos de estimativa da precipitação efetiva por meio de índices adotam um fator constante para a separação do escoamento.

No índice ϕ , estão consideradas implicitamente as perdas provocadas pela interceptação vegetal, armazenamento nas depressões/rugosidades da superfície do solo, infiltração e evapotranspiração.

$$\phi = \frac{PT - ESD}{N_0} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

ϕ = taxa de retenção média no solo da bacia hidrográfica, em mm;

PT = precipitação total do evento de chuva na bacia hidrográfica, em mm;

ESD = escoamento superficial direto gerado na bacia hidrográfica, em mm;

N_0 = número de ocorrências em cada evento de chuva.

Pressupondo que a parcela de absorção máxima do solo é igual ao valor ϕ , qualquer precipitação em determinado intervalo de tempo, que gerar um volume maior que o valor ϕ , irá contribuir para o escoamento superficial na bacia. Caso o volume de água seja menor que o valor ϕ no intervalo de tempo subsequente, supõe-se que essa quantia de água não absorvida poderá ser infiltrada no intervalo de tempo posterior.

Para encontrar o momento em que a precipitação efetiva ocorreu, foi utilizada a metodologia descrita em Silveira (2016). Para melhor compreensão, o método foi parametrizado em quatro etapas.

A primeira etapa consiste em calcular o valor entre a diferença da precipitação total e o índice ϕ , fazendo, $P_t - \phi$. Feito isso, os tempos que possuem excesso são aqueles em que $P_t - \phi > 0$, onde se pode inferir que nesse intervalo a precipitação é maior que a capacidade de absorção de água pelo solo e, por esse motivo, ocorreu o escoamento. Tal procedimento está representado na Equação 11.

$$EP = P_{t_i} - \phi, \quad \text{se } P_t - \phi > 0 \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

EP = excesso da precipitação, em mm;

P_{t_i} = precipitação total no intervalo de tempo i, em mm.

Ainda na primeira etapa considerou-se um bônus de absorção de água no solo, dado pela precipitação que não gerou escoamento. Entende-se que nesse intervalo de tempo a chuva foi menor que a capacidade de absorção e que toda água precipitada na bacia foi infiltrada no solo. A Equação 12 representa matematicamente esse processo.

$$Bo = P_{t_i} - \phi, \quad \text{se } P_{t_i} - \phi < 0 \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

Bo = bônus de absorção de água no solo, em mm;

Na segunda etapa, calculou-se o bônus médio de acordo com o número de excessos da precipitação. Para isso, somaram-se os bônus e dividiu-se o valor obtido pelo número de eventos onde ocorreram os excessos de precipitação. Esta etapa está representada na Equação 13.

$$BO_m = \frac{\sum BO}{N_{EP}} \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

B_{0m} = bônus médio de absorção de água pelo solo, em mm;

N_{EP} = número de excessos da precipitação.

Na terceira etapa, foram distribuídos os bônus médios de absorção de água pelo solo, para aqueles eventos que apresentaram excessos de precipitação.

Na quarta e última etapa, repetem-se os procedimentos das etapas 2 e 3 continuamente até que se acabem os bônus. Ao final do processo, a somatória dos excessos foi considerada como a precipitação efetiva.

5.7 Tempo de concentração (t_c) a partir de hidrogramas

Após determinar a precipitação efetiva pelo índice ϕ e estabelecido o ponto de inflexão C, nos hidrogramas selecionados pela separação do escoamento superficial direto descrita na metodologia de Mello e Silva (2013), foi possível determinar um intervalo de tempo entre o fim da precipitação efetiva e o fim do escoamento superficial (ponto C), o qual é caracterizado como o tempo de concentração da bacia (t_c).

Para a obtenção do ponto C, optou-se por extrair o logaritmo dos dados de vazão coletados nas estações. Em seguida, o valor de vazão no tempo seguinte foi dividido pelo valor anterior ($\log Q_{i+1}/\log Q_i$), dando origem a um fator k (CHOW, 1964). Quando esse fator atingiu valor de 0,999 ou superior, o valor de vazão correspondente foi considerado como ponto C.

5.8 Tempo de concentração (t_c) a partir de equações empíricas

Existem muitas fórmulas empíricas capazes de fornecerem o t_c para uma bacia hidrográfica. Normalmente, essas equações levam em conta as características fisiográficas inerentes das bacias ou condições onde foram desenvolvidas. Por isso, é relevante avaliá-las e entender que os resultados de tempo de concentração serão mais coerentes se as condições da bacia investigada forem semelhantes ou próximas daquelas condições consideradas na elaboração de cada equação. As equações empíricas avaliadas neste trabalho foram obtidas no estudo de Silveira (2005) e estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações empíricas para estimativa do tempo de concentração utilizadas neste trabalho. Fonte: Silveira (2005)

Nome da equação	Formulação matemática
Carter	$tc = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$
Corps Engineers	$tc = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19}$
Desbordes	$tc = 0,0869 \cdot A^{0,3039} \cdot S^{-0,3832} \cdot A_{imp}^{-0,4523}$
DNOS	$tc = 0,419 \cdot K^{-1} \cdot A^{0,3} \cdot L^{0,2} \cdot S^{-0,4}$
Dooge	$tc = 0,365 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17}$
Eagleson	$tc = 0,274 \cdot n \cdot R^{-0,67} \cdot L \cdot S^{-0,5}$
Espey-Winslow	$tc = 0,343 \cdot \varphi \cdot L^{0,29} \cdot S^{-0,145} \cdot A_{imp}^{-0,6}$
FAA	$tc = 0,37 \cdot (1,1 - C_m) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,333}$
George Ribeiro	$tc = 0,222 \cdot (1,05 - 0,2 \cdot p)^{-1} \cdot L \cdot S^{-0,04}$
Giandotti	$tc = 0,0559 \cdot (4 \cdot A^{0,5} + 1,5 \cdot L) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,5}$
Izzard	$tc = 85,5 \cdot \left(\frac{i}{36286} + Cr \right) \cdot i^{-0,667} \cdot L^{0,33} \cdot S^{-0,333}$
Johnstone	$tc = 0,462 \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,25}$
Kerby-Hathaway	$tc = 0,619 \cdot N^{0,47} \cdot L^{0,47} \cdot S^{-0,235}$
Kirpich	$tc = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$
McCuen	$tc = 2,25 \cdot i^{-0,7164} \cdot L^{0,5552} \cdot S^{-0,2070}$
Onda Cinemática	$tc = 7,35 \cdot n^{0,6} \cdot i^{-0,4} \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3}$
Pasini	$tc = 0,107 \cdot A^{0,333} \cdot L^{0,333} \cdot S^{-0,5}$
Picking	$tc = 0,0883 \cdot L^{0,667} \cdot S^{-0,333}$
Schaake et al.	$tc = 0,0828 \cdot L^{0,24} \cdot S^{-0,16} \cdot A_{imp}^{-0,26}$
SCSLag	$tc = 0,057 \cdot \left(\frac{1000}{CN_m - 9} \right) \cdot 0,7 \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5}$
Simas-Hawkins	$tc = 0,322 \cdot A^{0,594} \cdot L^{-0,594} \cdot S^{-0,150} \cdot S_{SCS}^{0,313}$
Ven te Chow	$tc = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32}$
Ventura	$tc = 0,127 \cdot A^{0,5} \cdot S^{-0,5}$

Fonte: O autor.

Em que:

A = área da bacia hidrográfica, em km²;

A_{imp} = fração de área impermeável, adimensional;

C_m = coeficiente de escoamento superficial médio, adimensional;

C_{Nm} = curva número médio da bacia hidrográfica, adimensional;

C_r = coeficiente que considera a superfície da bacia, adimensional;

ϕ = fator de condutância, adimensional;

i = intensidade da chuva na bacia hidrográfica, em mm h^{-1} ;

K = índice que representa as características do terreno da bacia, adimensional;

L = comprimento do curso d'água principal, em km;

n 'Manning = representa a rugosidade do curso d'água principal, em $\text{s m}^{-1/3}$;

N = característica da superfície, adimensional;

p = fração da área da bacia hidrográfica com mata, adimensional;

R = raio hidráulico do curso d'água principal, em m;

S = declividade medida pela razão entre o desnível máximo e o comprimento L do percurso, em mm^{-1} ;

S_{SCS} = armazenamento de água no solo pelo método do Soil Conservation Service (SCS, 1986), em mm.

t_c = tempo de concentração, em horas.

5.8.1 Parâmetros utilizados nas equações empíricas

As diversas fórmulas de tempo de concentração citadas na Tabela 2 apresentam muitas variáveis que são descritas pelos autores. Boa parte dessas variáveis apresenta valores tabelados, que serão utilizadas de acordo com as características de cada bacia hidrográfica em estudo.

As propriedades C_r , K , N , R e ϕ são magnitudes de valores tabelados em Silveira (2005), os quais estão descritos nas Tabelas 3, 4 e 5. A variável C_r da equação de Izzard foi adotada neste trabalho como sendo 0,053, o que representa um valor médio entre aqueles indicados para gramado aparado e leivas de grama densa. Para o parâmetro K da equação de DNOS, adotou-se a magnitude 3 para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha e magnitude 4 para as Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Fundo. Essa magnitude foi adotada de acordo com a descrição do solo de cada bacia. A variável N da equação de Kerby-Hathaway foi adotada como sendo 0,35 para BHEAV e 0,2 para BHEFU e BHEGL. O primeiro valor corresponde à média entre cobertura de grama rala e cobertura de grama média, pois se trata de uma bacia rural. Já o segundo valor refere-se à

média entre pavimento alisado e a cobertura com grama por se tratar de duas bacias parcialmente urbanizadas.

As variáveis R e ϕ foram obtidas pela média dos índices apresentados em áreas rurais e urbanas para as bacias parcialmente urbanizadas e pelo índice em áreas rurais para a bacia estritamente rural. Dessa forma, as variáveis ficaram respectivamente 0,11 e 0,65 para as bacias parcialmente urbanizadas (BHEGL; BHEFU) e 0,2 e 1 para BHEAV.

O coeficiente de Manning (n), foi adotado como sendo 0,035 para as bacias do Glória e Fundo e 0,045 para a bacia do Água Vermelha. Estes valores foram obtidos levando-se em consideração as características dos canais de drenagem das bacias hidrográficas, conforme recomendado em Azevedo Netto et. al (1998).

Os parâmetros A_{imp} e p foram considerados como sendo 0,5 para as três bacias. Este é um valor intermediário entre o valor 1 (cobertura com mata) e o zero (área urbana, impermeável) como cita Silveira (2016). A variável intensidade da chuva (i) é a precipitação por unidade de tempo, expressa normalmente em $mm\ h^{-1}$. Seu cálculo foi realizado pela razão entre o somatório de um evento chuvoso e a duração desse mesmo evento.

Em relação às variáveis A , S e L , foram obtidas por meio do *software* de sistema de informação geográfica Q gis versão 2.18.19 (Las Palmas), com auxílio da ferramenta Taudem 5.1.2. Nesse estudo, A representa a área da bacia em km^2 e o comprimento L refere-se à distância em km do talvegue principal que vai desde a cabeceira do rio até sua seção de controle. A sua declividade S é dada em mm^{-1} e calculada pela razão entre o desnível máximo, que vai da cabeceira até o exutório, dividido pelo parâmetro L .

O número CN é uma das principais características do método Curva Número, pois ele retrata as condições de uma bacia quanto ao escoamento, à infiltração e ao tipo de uso e ocupação do solo. Os valores de CN para cada tipo de ocupação e grupo hidrológico variam de 1 a 100 e foram obtidos no documento *Urban Hydrology for Small Watersheds* (USDA, 1986). Para as bacias em estudo foi considerado o solo da BHEAV com características mais próximas ao do grupo hidrológico B e para BHEFU e BHEGL solos com traços mais próximos ao do grupo hidrológico C. O número da curva médio (CNm) de cada bacia foi estimado por meio da Equação 14.

$$CNm = \frac{\sum_{i=1}^N CN_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

CNm= curva número médio da bacia hidrográfica, adimensional;

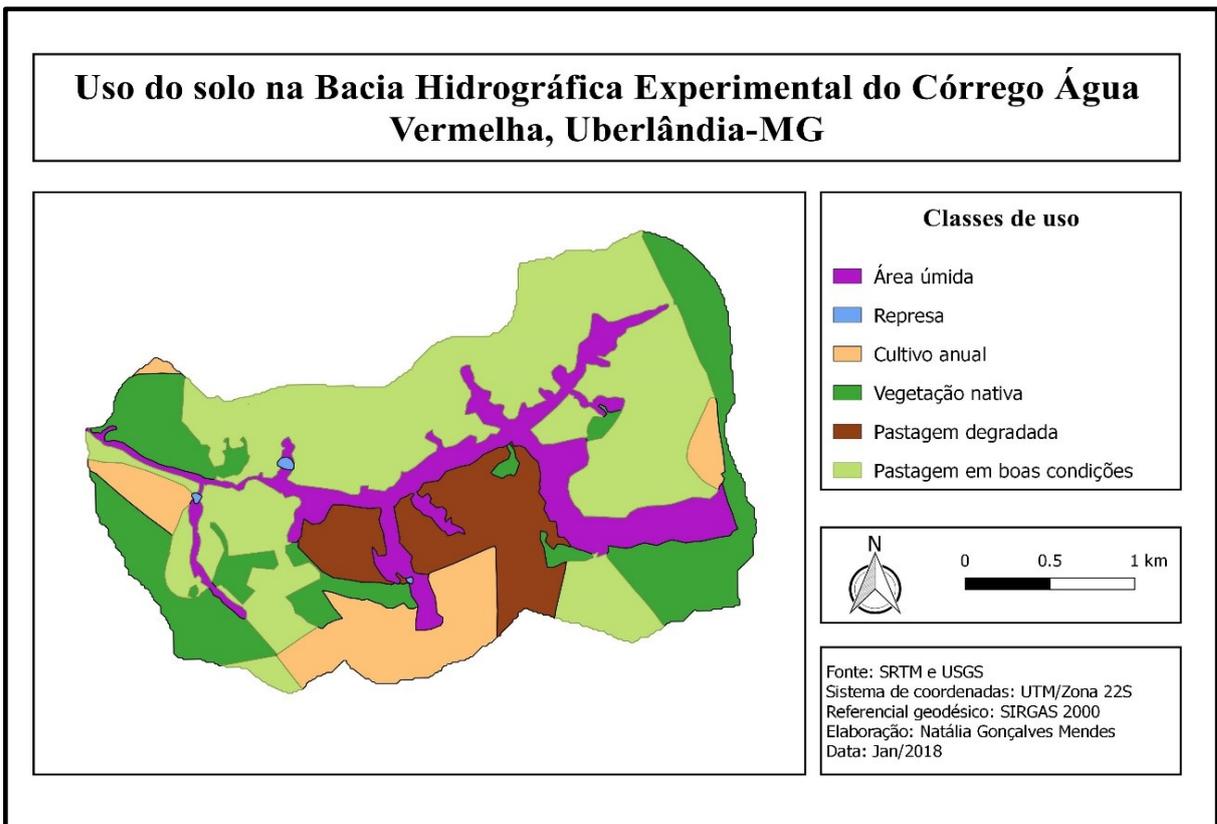
CN_i= curva número do tipo de solo i, adimensional;

A_i= área ocupada com o tipo de solo i, km²;

N e i= grandezas de posição da somatória.

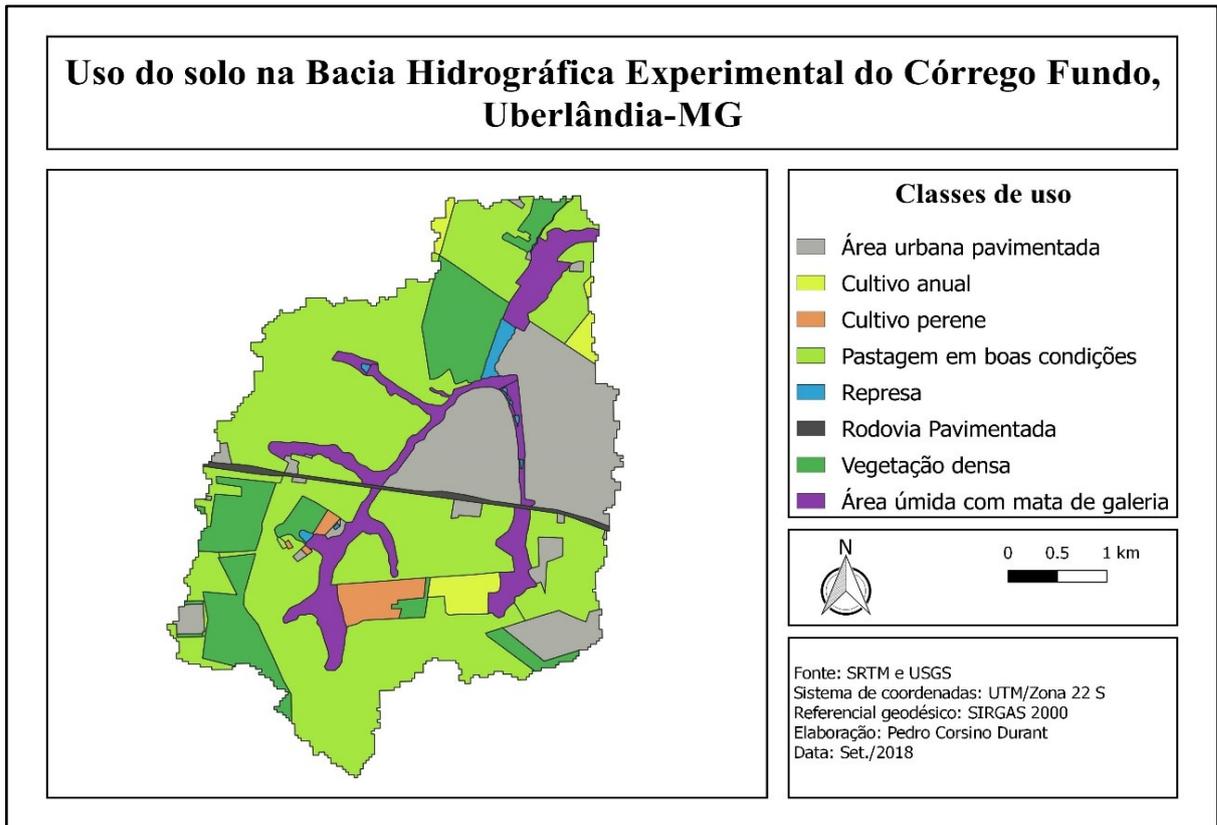
No cálculo da área de ocupação utilizou-se o *software* de sistema de informação geográfica Qgis com auxílio da imagem satélite pelo complemento Open Layers Plugin. As classes de uso do solo para as bacias foram determinadas de acordo com a classificação descrita no documento *Urban Hydrology for Small Watersheds* (USDA, 1986). Para melhor representação da realidade, foram coletadas verdades de campo que reforçassem o enquadramento de determinadas áreas nas classes a elas atribuídas. As representações do uso de cada bacia experimental estão detalhadas nas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 – Uso do solo BHEAV



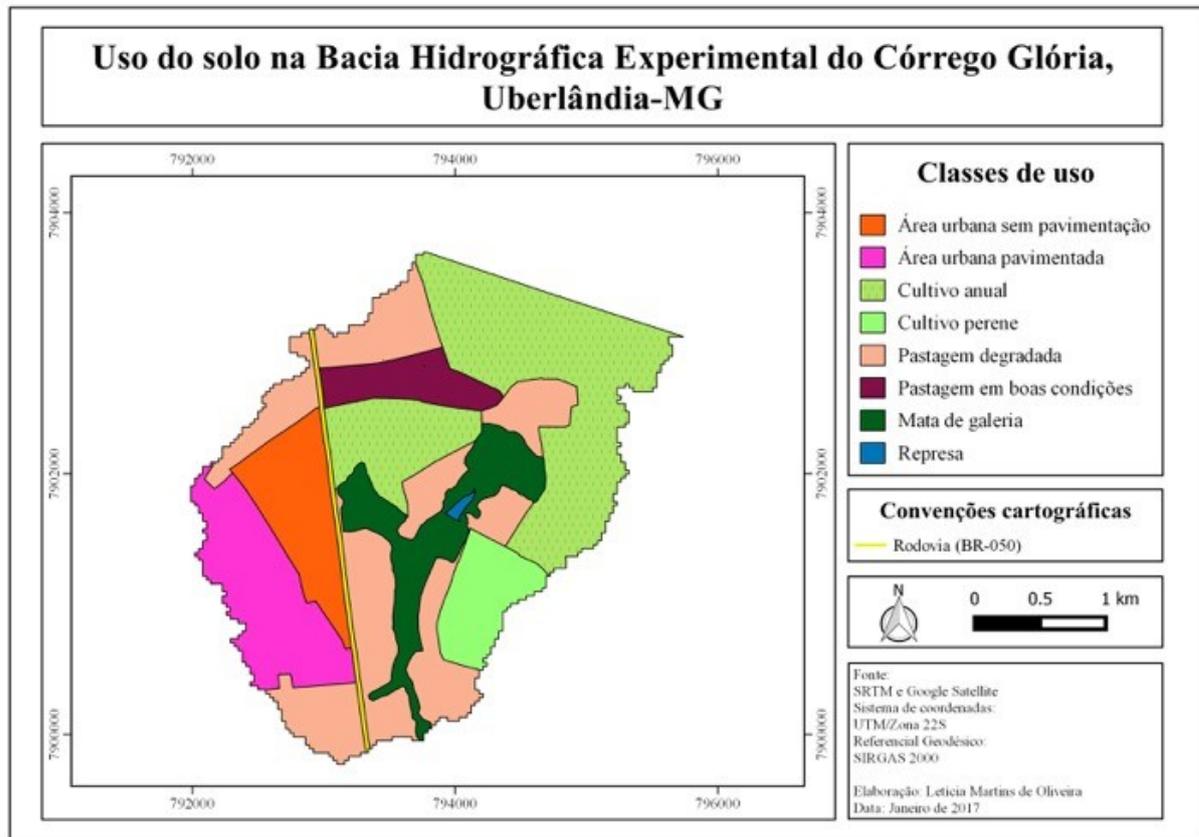
Fonte: Adaptada Mendes (2018).

Figura 9 – Uso do solo BHEFU



Fonte: O autor.

Figura 10 – Uso do solo BHEGL



Fonte: Oliveira (2019).

O parâmetro S_{scs} foi calculado por meio da Equação 15, descrita pelo Soil Conservation Service (SCS, 1986).

$$S_{scs} = \frac{25400}{CNm} - 254 \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

S_{scs} = armazenamento de água no solo pelo método SCS, (1986), em mm.

O coeficiente de escoamento superficial médio (C_m) da bacia foi estimado por meio da Equação 16, conforme o tipo de cobertura e declividade do solo, considerando um tempo de retorno de 2 anos, conforme explicitado por Genovez apud Mello e Silva (2013). O autor fornece um valor C para cada condição de superfície e declividade do solo.

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

C_m = coeficiente de escoamento superficial médio da bacia hidrográfica, adimensional;

C_i = coeficiente de escoamento superficial da área i , adimensional;

A_i = área i , km²;

N e i = grandezas de posição da somatória.

5.9 Modelagem matemática do tempo de concentração para pequenas bacias hidrográficas experimentais na região de Uberlândia, Minas Gerais

A partir das informações do tempo de concentração e das características fisiográficas de cada bacia experimental, foi construída uma matriz de correlação entre as variáveis: tempo de concentração (t_c), área da bacia (A), comprimento do talvegue principal (L), declividade do canal de drenagem (S) e intensidade média da chuva (i). O teste de correlação do tipo Pearson foi realizado por meio do *software* SigmaPlot[®] 12.0. O resultado da correlação permite expressar o grau de dependência entre duas ou mais variáveis quantitativas avaliadas em estudo.

Após realizar a correlação entre as variáveis, tomou-se o tempo de concentração como variável dependente e área da bacia, comprimento do talvegue principal, declividade do canal de drenagem e intensidade média da chuva como variáveis independentes. Feito isso, escolheu-se o modelo matemático que melhor ajuste alcançou, considerando os testes estatísticos F , para avaliação da regressão; o teste t , para avaliação das constantes do modelo de regressão; e o teste de Shapiro-Wilk, para avaliação da normalidade dos resíduos da regressão. Além desses parâmetros estatísticos, também foram considerados o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão de estimativa (EPE).

5.9.1 Teste estatístico de Nash-Sutcliffe para validação do modelo matemático de regressão comparado com tempo de concentração estimados por hidrogramas

O coeficiente de Nash-Sutcliffe- C_{NS} (Equação 17) irá indicar o grau de eficiência do modelo matemático obtido. Neste estudo, aplicou-se a classificação de eficiência de modelos proposto por Moriasi et al (2007) que determina a seguinte representação de valores: 0,75

$C_{NS} \leq 1,0$ muito bom; $0,65 < C_{NS} < 0,75$ bom; $0,50 < C_{NS} < 0,65$ satisfatório; e $C_{NS} < 0,50$ não satisfatório.

A classificação de Gotschalk; Motoviloc (2000), citado por Collischonn (2001) e Viola (2008), designa a seguinte performance para valores do coeficiente Nash-Sutcliffe: $C_{NS} = 1$ compreende como ajuste perfeito do modelo; $C_{NS} > 0,75$ demonstra ajuste bom/adequado; e $0,36 < C_{NS} < 0,75$ considera-se ajustes aceitáveis. Santhi et al. (2001), em um estudo de validação do modelo de SWAT para uma grande bacia rural no estado do Texas, apontaram que valores de C_{NS} maiores do que 0,65 são capazes de classificar um modelo como sendo muito bom.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (tc_{obs_i} - tc_{est})^2}{\sum_{i=1}^N (tc_{obs_i} - \overline{tc_{obs}})^2} \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

C_{NS} = Coeficiente de Nash-Sutcliffe, adimensional;

tc_{obs_i} = Tempo de concentração no hidrograma observado na posição i, em min;

$\overline{tc_{obs}}$ = Tempo de concentração médio dos hidrogramas observados, em min;

tc_{est} = Tempo de concentração estimado por meio do modelo matemático, em min.

5.10 Avaliação estatística do desempenho das equações empíricas para tempo de concentração

O desempenho estatístico de cada equação empírica foi realizado por meio da comparação do tempo de concentração obtido em cada hidrograma encontrado nas bacias hidrográficas em estudo. A metodologia utilizada para essa comparação foi a dos erros absoluto e relativo. O erro absoluto é dado pela subtração entre o tempo de concentração calculado por meio das equações e o tempo de concentração real observado em cada um dos hidrogramas (Equação 18). O erro relativo é a razão do erro absoluto pelo tempo de concentração observado de cada um dos hidrogramas, expresso em porcentagem (Equação 19).

$$EA = tc_{calc} - \overline{tc_{obs}} \quad \text{Equação 18}$$

$$ER = \frac{EA}{\overline{tc}_{obs}} \cdot 100$$

Equação 19

Em que:

EA = erro absoluto, em minuto;

ER = erro relativo, em porcentagem;

tc_{calc} = tempo de concentração estimado por equação empírica, em minuto;

\overline{tc}_{obs} = tempo de concentração de cada hidrogama observado, em minuto.

Como a maioria das equações empíricas depende somente de dados físicos das bacias hidrográficas, os valores para o tempo de concentração estimado por cada fórmula serão o mesmo para todos os eventos chuvosos selecionados, com exceção das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática que levam em consideração a intensidade da chuva, por isso, para cada evento selecionado, terá um tempo de concentração estimado.

Na intenção de se obter um valor que melhor representasse os erros estatísticos de desempenho das equações, foi adotada a metodologia que propõe aplicar a média aos erros absolutos e relativos referente ao conjunto amostral dos eventos chuvosos que cada bacia proporcionou. Portanto os erros destacados foram calculados pelas Equações 20 e 21.

$$\overline{EA} = \frac{\sum_{i=1}^n EA}{n}$$

Equação 20

$$\overline{ER} = \frac{\sum_{i=1}^n ER}{n}$$

Equação 21

Em que:

\overline{EA} = Erro médio absoluto, em min;

\overline{ER} = Erro médio relativo, em porcentagem.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Parâmetros obtidos para determinação do tempo de concentração por equações empíricas

Os parâmetros necessários para aplicação das 23 equações empíricas nas três bacias experimentais em estudo foram calculados e obtidos de acordo com a metodologia descrita neste trabalho. Esses valores estão retratados nas Tabelas 3, 4 e 5 conforme as características peculiares que cada bacia hidrográfica experimental apresentou.

Tabela 3 – Parâmetros fixos para BHEAV, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Área da bacia (A)	km ²	16,35	BHEAV
Comprimento do rio (L)	km	6,33	BHEAV
Declividade (S)	mm ⁻¹	0,01	BHEAV
Altitude nascente	m	840	BHEAV
Altitude seção controle	m	774	BHEAV
n (coeficiente Manning)	-	0,045	Azevedo Netto et al. (1998)
K	-	3	Silveira (2005)
N	-	0,35	Silveira (2005)
R	-	0,2	Silveira (2005)
φ	-	1	Silveira (2005)
Cr	-	0,053	Silveira (2005)
P	-	0,5	Silveira (2005)
Aimp	-	0,5	Silveira (2005)
i*	mm h ⁻¹	14,5	BHEAV
Sscs	mm	119,5	SCS (1986)
CNm	-	68	SCS (1986)
Cm	-	0,36	Genovezapud Mello e Silva (2013)

Fonte: O autor.

Nota: *Intensidade da chuva obtida pela média de todas as intensidades estimadas nos eventos que geraram os hidrogramas para BHEAV

Tabela 4 – Parâmetros fixos para BHEFU, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Área da bacia (A)	km ²	17,8	BHEFU
Comprimento do rio (L)	km	5,73	BHEFU
Declividade (S)	mm ⁻¹	0,02	BHEFU
Altitude nascente	m	842	BHEFU
Altitude seção controle	m	744	BHEFU
n (coeficiente Manning)	-	0,035	Azevedo Netto et al. (1998)
K	-	4	Silveira (2005)
N	-	0,21	Silveira (2005)
R	-	0,11	Silveira (2005)
φ	-	0,65	Silveira (2005)
Cr	-	0,053	Silveira (2005)
P	-	0,5	Silveira (2005)
Aimp	-	0,5	Silveira (2005)
i*	mm h ⁻¹	7,9	BHEFU
Sscs	mm	74,8	SCS (1986)
CNm	-	77	SCS (1986)
Cm	-	0,41	Genovezapud Mello e Silva (2013)

Fonte: O autor.

Nota: *Intensidade da chuva obtida pela média de todas as intensidades estimadas nos eventos que geraram os hidrogramas para BHEFU

Tabela 5 – Parâmetros fixos para BHEGL, suas unidades, magnitudes e local/forma de obtenção

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Área da bacia (A)	km ²	8,27	BHEGL
Comprimento do rio (L)	km	2,65	BHEGL
Declividade (S)	mm ⁻¹	0,03	BHEGL
Altitude nascente	m	912	BHEGL
Altitude seção controle	m	839	BHEGL
n (coeficiente Manning)	-	0,035	Azevedo Netto et al. (1998)
K	-	4	Silveira (2005)
N	-	0,21	Silveira (2005)
R	-	0,11	Silveira (2005)
φ	-	0,65	Silveira (2005)
Cr	-	0,053	Silveira (2005)
P	-	0,5	Silveira (2005)
Aimp	-	0,5	Silveira (2005)
i*	mm h ⁻¹	9,5	BHEGL
Sscs	mm	48,4	SCS (1986)
CNm	-	84	SCS (1986)
Cm	-	0,39	Genovezapud Mello e Silva (2013)

Fonte: O autor.

Nota: *Intensidade da chuva obtida pela média de todas as intensidades estimadas nos eventos que geraram os hidrogramas para BHEGL

Por mais que as bacias experimentais estejam localizadas em regiões próximas entre si, ainda assim é possível perceber algumas diferenças fisiográficas que podem justificar a distinção nos valores do tempo de concentração ao aplicar a mesma equação empírica para cada bacia. As condições de formação geográficas e hidrográficas dependem dos fenômenos naturais, que, ao ocorrerem sucessivas vezes, oferecem características específicas a cada bacia.

O levantamento de parâmetros como área da bacia, comprimento e declividade do rio é essencial para o entendimento do funcionamento de uma bacia e, principalmente, para o

conhecimento do tempo de concentração a partir de fórmulas empíricas, uma vez que a maioria das equações para esse fim exigirá, no mínimo, um desses parâmetros.

A BEHAV, caracterizada como uma bacia rural, apresentou uma declividade um pouco menor em relação às outras duas bacias. Isso se deve à característica geográfica mais plana da região, representada pela baixa amplitude das altitudes, que vai da cabeceira do rio até seu exutório. Outro fator que influencia essa questão é o maior comprimento do rio, comum em regiões mais planas, devido à formação de meandros, que são curvas acentuadas na formação da calha de drenagem, o que amplia a extensão do seu comprimento.

Os valores de CN_m, capaz de retratar as condições de cada bacia quanto ao escoamento, à infiltração e ao tipo de uso do solo, foram bem coerentes quanto às atividades de ocupação desempenhada em cada uma delas. As bacias experimentais do Fundo e do Glória apresentaram CN_m maiores, como já era esperado, devido ao maior número de áreas construídas e pavimentadas nessas regiões, o que caracteriza essas duas bacias como sendo parcialmente urbanizadas. Tal raciocínio também se repete para o coeficiente de escoamento superficial médio (C_m), estimado conforme o tipo de cobertura e declividade do solo de cada uma das bacias.

6.2 Hidrogramas obtidos nas três bacias experimentais em estudo

Ao todo foram levantados 62 hidrogramas, na região de Uberlândia – MG, para avaliação do tempo de concentração nas bacias experimentais em estudo. Todos foram analisados e escolhidos a partir da distinção clara das importantes fases de ascensão, pico e recessão presentes em um hidrograma característico. Em cada um deles foi possível estimar o período de concentração, dado pelo tempo transcorrido entre o fim da precipitação efetiva e o final da fase de recessão. Todos os hidrogramas estão representados graficamente nos Apêndices A, B e C deste trabalho.

A partir dos diversos hidrogramas obtidos, foram selecionados aleatoriamente 32 hidrogramas para gerar um modelo matemático capaz de estimar o tempo de concentração para as três bacias hidrográficas experimentais em estudo (calibração). Os 30 hidrogramas restantes foram utilizados para realizar o teste de Nash-Sutcliffe – CNS, responsável por indicar o grau de eficiência do modelo matemático proposto (validação).

Cada bacia apresentou resposta diferente quanto ao tempo de concentração obtido a partir dos hidrogramas conforme detalhado nas Tabelas 6, 7 e 8, o que justifica as inúmeras

particularidades que uma bacia hidrográfica pode apresentar, mesmo estando em regiões próximas.

6.2.1 Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha

Para a Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha, foram selecionados 26 hidrogramas (Apêndice A). O tempo de concentração foi estimado individualmente para cada hidrograma e posteriormente calculada uma média entre todos os hidrogramas selecionados.

A representação gráfica dos hidrogramas obtidos na bacia do Córrego Água Vermelha apresentou tempos de respostas prolongados em relação aos eventos de chuva, assim como vazões de pico, frequentemente, abaixo de 180 L s^{-1} . Essa condição é esperada em bacias com baixa declividade e solo arenoso, o que facilita a infiltração da água e diminui o escoamento superficial direto. Bacias com capacidade de infiltração elevada contribuem para o retardamento do escoamento, pois fatores como cobertura vegetal e condições planas do terreno funcionam como agentes potencializadores de infiltração e resistência ao escoamento (CHAVECA, 1999; RAMINHOS, 2002).

Como resultados dessas combinações, os hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha apresentaram curvas mais suavizadas, o que leva maior tempo para uma onda de chuva atingir o pico e as vazões máximas no canal de drenagem, como também maior tempo para retornar as condições normais do fluxo de água do córrego (predominância do fluxo de base).

Além disso, a ausência de áreas urbanizadas também influenciou o tempo médio de concentração obtido na BHEAV, a qual apresentou duração maior em relação às outras bacias experimentais, com um tempo médio de 10 horas e 15 minutos (Tabela 6). As datas e os respectivos valores do fim da precipitação efetiva, fim do escoamento superficial (ponto C) e tempo de concentração da BHEAV estão reunidos na tabela abaixo.

Tabela 6 – Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEAV

(continua)

Data do Hidrograma	Tempo (h min)		
	Fim da chuva efetiva	Ponto C	tc
26/12/2016	16h 40min	1h 05min	8h 25min
29/12/2016	0h 25mi	11h 50min	11h 25min
09/01/2017	10h 00min	21h 00min	11h 00min
11/01/2017	17h 40min	1h 35min	7h 55min
12/01/2017	21h 05min	8h 25min	11h 20min
15/01/2017	13h 45min	0h 00min	10h 15min
19/01/2017	20h 00min	5h 20min	9h 20min
31/01/2017	19h 30min	5h 25min	9h 55min
04/02/2017	21h 20mi	7h 15min	9h 55min
22/02/2017	15h 55min	2h 45min	9h 50min
27/02/2017	6h 15min	17h 40min	11h 25min
01/03/2017	10h 15min	20h 10min	9h 55min
05/03/2017	3h 10min	12h 50min	9h 40min
06/04/2017	10h 20min	21h 55min	11h 35min
08/04/2017	18h 15min	3h 20min	9h 05min
13/04/2017	16h 25min	1h 55min	9h 30min
16/05/2017	3h 40min	15h 10min	11h 30min
22/05/2017	20h 05min	7h 10min	11h 05min
16/10/2017	18h 15min	6h 40min	12h 25min
30/12/2017	5h 30min	15h 50min	10h 20min
13/01/2018	15h 55min	1h 40min	9h 45min
12/02/2018	19h 40min	4h 35min	8h 55min

(conclusão)			
17/03/2018	13h 00min	23h 40min	10h 40min
03/04/2018	11h 55min	22h 15min	10h 20min
19/05/2018	6h 15min	16h 25min	10h 10min
15/06/2018	15h 10min	2h 20min	11h 10min
Média	10h 15min

Fonte: O autor.

6.2.2 Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Fundo

Na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo, foram selecionados 11 hidrogramas com tempo de ascensão, de pico e de recessão bem delineados (Apêndice B). Nessa bacia foi possível observar uma resposta mais rápida no tempo de concentração quanto aos eventos de chuva.

Alguns fatores característicos da região podem ter contribuído para os resultados dessa rápida resposta. No terço inferior da bacia, próxima à seção de controle do Córrego Fundo, onde estão instalados o equipamento fluviométrico e um dos sensores de precipitação, observa-se uma formação geográfica mais acidentada do solo com material de origem basáltica, solo raso e textura argilosa. Essas condições favorecem a formação de enxurradas que são direcionadas rapidamente como escoamento superficial direto até a calha do rio. Essa situação contrasta com o verificado nos terços superior e médio da bacia, onde há solos de textura argilo-arenosos, profundos e planos. Como reflexo dessa conjuntura, na BHEFU (Tabela 7), foi encontrado um tempo de concentração médio de 55 minutos. Araújo (2011) destaca que a declividade é um fator que interfere na velocidade do escoamento e que, quanto mais íngreme for a região, mais rápido será o escoamento superficial, maiores serão os picos de enchentes e menor será o tempo de concentração. Os resultados do tempo de concentração para cada hidrograma selecionado no Córrego Fundo estão compilados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEFU

Data do Hidrograma	Tempo (h min)		
	Fim da chuva efetiva	Ponto C	tc
24/10/2017	22h 40min	23h 35min	0h 55min
28/10/2017	20h 50min	21h 25min	0h 35min
04/11/2017	5h 10min	6h 10min	1h 00min
17/11/2017	15h 30min	15h 50mi	0h 20min
04/12/2017	3h 20min	4h 30min	1h 10min
22/12/2017	1h 30min	3h 20min	1h 50min
25/12/2017	5h 30min	6h 20min	0h 50min
24/01/2018	15h 30min	16h 05min	0h 35min
13/02/2018	20h 50min	21h 40min	0h 50min
19/02/2018	23h 30min	1h 20min	1h 50min
29/03/2018	22h 20min	22h 55min	0h 35min
12/04/2018	21h 00min	21h 40min	0h 40min
Média	0h 55min

Fonte: O autor.

6.2.3 Hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Glória

Na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, foi possível selecionar 25 hidrogramas de melhor resposta aos eventos de chuva. Avaliando os resultados do tempo de concentração obtido em cada hidrograma dessa bacia (Tabela 8), é possível perceber alguns com valores mais elevados (acima de 7h). Essas condições podem estar associadas à característica da chuva que gerou o hidrograma e também a variabilidade espacial da precipitação distribuída ao longo da bacia hidrográfica.

Hidrogramas com picos mais expressivos na bacia do Glória podem ser reflexos da influência da região urbanizada presente na bacia. Essa condição favorece a impermeabilização do terreno, o que gera maiores escoamentos superficiais devido à menor

capacidade de infiltração da água no solo. Além disso, averiguou, *in loco*, que boa parte da água pluvial escoada na região urbanizada e no trecho da rodovia que corta a bacia é direcionada diretamente por um bueiro até um pequeno tributário da bacia que posteriormente deságua no córrego Glória. Nesse caso, toda vez que ocorrer uma chuva convectiva nessa porção da bacia os reflexos na vazão do córrego serão mais rápidos com picos acentuados.

Vale ressaltar que na bacia do Glória também existe uma represa próxima da cabeceira do córrego que, de alguma forma, pode contribuir para um suposto retardo nos tempos de pico, porém acredita-se que a colaboração dessa represa no retardamento do escoamento superficial é pequena, uma vez que o vertedouro, por não ser projetado regularmente, verte uma quantidade considerável de água durante todo o ano, ou seja, essa represa permanece cheia durante todo o ano.

Tabela 8 – Tempos característicos dos hidrogramas obtidos na BHEGL

(continua)

Data do Hidrograma	Tempo (h min)		
	Fim da chuva efetiva	Ponto C	tc
31/10/2015	12h 20mi	13h 50min	1h 30min
03/11/2015	1h 50min	5h 50min	4h 00min
07/11/2015	14h 55min	16h 35min	1h 40min
06/12/2015	1h 15min	8h 55min	7h 40min
18/12/2015	15h 40min	19h 40min	4h 00h
20/12/2015	15h 10min	22h 15min	7h 05min
26/12/2015	13h 10min	18h 10min	5h 00min
28/12/2015	15h 20min	19h 40min	4h 20min
04/01/2016	5h 10min	9h 25min	4h 15min
19/01/2016	1h 15min	6h 20min	5h 05min
09/02/2016	19h 50min	22h 50min	3h 00min
29/02/2016	12h 55min	15h 40min	2h 45min

(conclusão)			
01/03/2016	17h 30min	21h 15min	3h 45min
12/03/2016	20h 50min	1h 55min	5h 05min
25/03/2016	9h 55min	15h 15min	5h 20min
16/05/2016	7h 45min	10h 35min	2h 50min
03/06/2016	17h 35min	21h 10min	3h 35min
20/01/2017	12h 30min	15h 20min	2h 50min
17/10/2017	19h 15min	20h 50min	1h 35min
01/11/2017	17h 05min	19h 15min	2h 10min
06/11/2017	22h 00min	0h 20min	2h 20min
13/01/2018	17h 20min	19h 45min	2h 25min
31/01/2018	19h 00min	20h 35min	1h 35min
04/02/2018	15h 25min	17h 35min	2h 10min
02/03/2018	11h 05min	14h 05min	3h 00min
Média	3h 35min

Fonte: O autor.

6.3 Resultados comparativos entre o tempo de concentração obtido por hidrogramas com aqueles estimados pelas equações empíricas

Os resultados de tempo de concentração obtidos por meio das 23 equações empíricas testadas encontram-se compilados nas Tabelas 9, 10 e 11, para as diferentes bacias estudadas. Nessas tabelas encontram-se também os erros quantificados entre o tempo de concentração estimado por essas equações e aqueles obtidos nos hidrogramas das bacias. Analisando os dados contidos nessas tabelas, nota-se que os resultados do tempo de concentração entre as equações empíricas, para uma mesma bacia, forneceram valores muito discrepantes entre si.

Essas diferenças são atribuídas às peculiaridades do escoamento superficial a que cada bacia está sujeita. Por isso, as características intrínsecas das bacias que originaram tais fórmulas podem se tornar limitantes quando a sua aplicação for em regiões bem divergentes

das que foram geradas, o que torna necessário, em alguns casos, desenvolver ajustes finais nas equações para obtenção de melhores resultados.

Sampaio (2016), ao aplicar 11 fórmulas empíricas em 37 bacias de grande porte no Estado do Ceará, concluiu que os resultados obtidos com as diferentes fórmulas apresentaram uma alta variabilidade de valores para o tempo de concentração em uma mesma bacia. O autor relata que isso pode estar relacionado com as condições iniciais para qual cada fórmula foi determinada e com as variáveis específicas que algumas fórmulas necessitam para serem aplicadas.

Por outro lado, pode-se afirmar que aquelas equações que revelaram valores mais próximos aos dos hidrogramas levantados são as que melhores se assemelham à representação real do índice tempo de concentração na bacia, por isso apresentaram menores erros estatísticos.

Tabela 9 – Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEAV

(continua)

Equação	Tc (min)	Erros ¹	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Carter	70	546	89
Corps Engineers	111	505	82
Desbordes	96	520	84
DNOS	174	442	71
Dooge	150	466	75
Eagleson	135	481	78
Espey-Winslow	103	513	82
FAA	188	427	69
George Ribeiro	107	509	83
Giandotti	335	281	45

			(conclusão)
Izzard	387	215	35
Johnstone	218	397	64
Kerby-Hathaway	158	458	74
Kirpich	96	520	84
McCuen	143	419	68
Onda Cinemática	280	291	47
Pasini	295	321	52
Picking	83	533	86
Schaake et al.	19	597	97
SCSLag	1064	448	75
Simas-Hawkins	301	315	51
Ven te Chow	135	481	78
Ventura	302	314	50

Fonte: O autor.

Nota: ¹Os erros estatísticos foram calculados a partir da média de todos os erros gerados da comparação do tempo de concentração de cada equação empírica com o tempo de concentração de cada um dos 26 hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha.

De acordo com os erros estatísticos obtidos pela comparação dos valores de tempo de concentração das equações empíricas com os valores gerados por hidrogramas na BHEAV (Tabela 9), observou-se um melhor desempenho das equações de Izzard, Giandotti, Onda cinemática e Ventura. O erro relativo para cada equação foi respectivamente 35%,45%,47% e 50%.

As equações de Izzard e Onda Cinemática levam em consideração a intensidade da chuva observada no evento, dividida pela média das intensidades que geraram os hidrogramas. A presença dessa variável pode ser um dos fatores que levaram essas equações a exibirem resultados positivos em relação às outras, uma vez que, das 23 equações utilizadas, apenas três apresentam essa variável.

Apesar de serem equações desenvolvidas por experimentos laboratoriais em superfícies planas e pequenas, as fórmulas de Izzard e Onda Cinemática apresentaram resultados satisfatórios para a bacia experimental do Córrego Água Vermelha, o que permite recomendá-las para o cálculo do tempo de concentração nessa bacia. Silveira (2005), após avaliar diversas fórmulas usuais na literatura técnica brasileira, relatou que essas duas equações apresentaram bons resultados para estimativa de tempo de concentração em bacias rurais de médio e grande porte.

As equações de Ventura e Giandotti também apresentaram bons resultados para bacia experimental do Córrego Água Vermelha. O grande diferencial é que essas duas equações utilizam a variável área em vez de intensidade. Esse fator é um motivador importante na escolha da equação, pois, assim como o comprimento e a declividade do curso de água principal, a área da bacia é uma variável simples e fácil de se obter.

Ainda em relação à Tabela 9, é possível perceber que as equações de Carter, Corps Engineers, George Ribeiro, Espey-Winslow, Kirpich, Picking e Schaake et al. apresentaram erros relativos acima de 80%. Sendo assim essas fórmulas não são recomendadas para o cálculo do tempo BEHAV.

Na Bacia Experimental do Córrego Fundo (Tabela 10), as equações que apresentaram melhores resultados em comparação com os valores obtidos por hidrogramas foram Carter, Espey-Winslow, Picking e Kirpich com erro relativo respectivamente de 32%, 37%, 41% e 51%. Apesar das equações de Carter e Espey-Winslow serem desenvolvidas em bacias urbanas americanas de pequeno e médio porte, foram as que apresentaram melhores resultados para bacia parcialmente urbanizada do Córrego Fundo.

Tabela 10 – Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEFU

(continua)

Equação	Tc (min)	Erros ¹	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Carter	54	19	32
Corps Engineers	91	39	87

			(conclusão)
Desbordes	77	30	64
DNOS	101	45	103
Dooge	139	80	176
Eagleson	102	46	105
Espey-Winslow	59	21	37
FAA	136	77	170
George Ribeiro	94	41	92
Giandotti	252	193	399
Izzard	476	593	1160
Johnstone	176	117	249
Kerby-Hathaway	102	46	105
Kirpich	69	25	51
McCuen	188	208	416
Onda Cinemática	250	235	473
Pasini	212	153	320
Picking	62	22	41
Schaake et al.	17	42	66
SCSLag	639	580	1167
Simas-Hawkins	263	204	421
Vente Chow	103	46	106
Ventura	227	168	350

Fonte: O autor.

Nota: ¹Os erros estatísticos foram calculados a partir da média de todos os erros gerados da comparação do tempo de concentração de cada equação empírica com o tempo de concentração de cada um dos 11 hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Água Fundo.

Silveira (2005) aponta uma coerência no uso da fórmula de Carter para bacias urbanas com área de até 21 km². Afirma também que a equação de Kirpich possui desempenho semelhante à de Carter, porém com a vantagem de ser utilizada em áreas com limite de área um pouco maior, até 26 km². Um outro estudo realizado em Florianópolis, para uma bacia urbana, demonstrou que as equações de Carter e Kirpich revelaram resultados moderadamente bons, ao serem testadas em cinco hidrogramas (KOBİYAMA et al., 2006).

Em relação à equação de Picking, houve dificuldade para encontrar fontes primárias que demonstrassem sua originalidade. A referência mais citada no Brasil parece ser a de Pinto et al (1976). No entanto, assim como verificado nas equações de Carter e Kirpich, a equação de Picking necessita apenas da declividade e comprimento do curso de água principal, os quais são de fácil obtenção. Essa condição favorece o seu uso na bacia do Córrego Fundo, em detrimento da equação de Espey-Winslow, que também apresentou bom desempenho nesse local. Por outro lado, equações como a de Izzard e SCSlag apresentaram erros bem acima da média e valores de tempo de concentração superestimados. Tal resultado pode estar associado aos valores do coeficiente Cr adotado para Izzard e CN para SCSlag.

Apesar disso, é importante destacar também que essa bacia possui pouco tempo de monitoramento fluviométrico. Tal condição afeta diretamente a curva chave da estação, o que influi nos valores de vazão obtidos e conseqüentemente nos hidrogramas gerados.

Ademais, na Tabela 10 é possível perceber também algumas discrepâncias quanto aos erros gerados entre as fórmulas empíricas aplicadas. Isso reforça mais uma vez as incertezas e o cuidado que se deve ter ao utilizar essas equações para uma dada bacia. Grimaldi et al. (2012), ao avaliar o tempo de concentração em quatro bacias hidrográficas no Texas, Estados Unidos, verificou amplas diferenças nos valores obtidos por diversas fórmulas que adotam parâmetros fisiográficos de bacias hidrográficas. Neste estudo, os autores apontaram diferenças de até 500% entre as equações testadas.

Na Tabela 11 estão reunidos os tempos de concentração e respectivos erros das 23 equações testadas para a Bacia Experimental do Córrego Glória. Nesse local verificou-se melhor desempenho nas equações de Ventura, Giandotti, Jhonstone e Pasini com erros relativos de 38%, 40%, 42% e 43%, respectivamente.

Tabela 11 – Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas citadas na Tabela 2 e respectivos erros em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas da BHEGL

(continua)

Equação	Tc (min)	$\overline{\text{Erros}}^1$	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Carter	31	184	82
Corps Engineers	48	167	73
Desbordes	54	161	69
DNOS	61	154	65
Dooge	98	118	46
Eagleson	40	175	77
Espey-Winslow	45	170	74
FAA	85	130	52
George Ribeiro	43	172	76
Giandotti	195	77	40
Izzard	278	232	154
Johnstone	111	109	42
Kerby-Hathaway	66	149	63
Kirpich	34	181	81
McCuen	97	141	68
Onda Cinemática	127	108	48
Pasini	110	110	43
Picking	34	181	81
Schaake et al.	13	202	92
SCSLag	275	97	66

			(conclusão)
Simas-Hawkins	225	79	47
Vente Chow	57	158	68
Ventura	135	94	38

Fonte: O autor.

Nota: ¹Os erros estatísticos foram calculados a partir da média de todos os erros gerados da comparação do tempo de concentração de cada equação empírica com o tempo de concentração de cada um dos 25 hidrogramas obtidos na Bacia Experimental do Córrego Água Glória.

Ventura, Giandotti e Pasini são fórmulas de origem italiana. No entanto, mesmo nas publicações italianas que as empregam, é difícil encontrar referências das bibliografias originais. Por esse motivo, as condições onde foram obtidas ainda representam uma incógnita. A partir de alguns estudos hidrológicos desenvolvidos na Itália, associados ao tamanho das bacias e suas conformações geográficas, pode-se inferir que essas fórmulas são indicadas para pequenas a médias bacias rurais (SILVEIRA, 2005). Essa condição explica em parte o bom desempenho dessas fórmulas na Bacia Experimental do Córrego Glória, a qual apresenta área de 8,27 km². Por outro lado, essa bacia é parcialmente urbanizada, indicando que o tempo de concentração pode ser mais sensível à área da bacia do que ao uso do solo da mesma.

A equação de Jhonstone encontrada no boletim técnico do United States (1973) foi gerada a partir do estudo de 19 bacias americanas rurais com tamanho de 65 a 4.200 km². Levando em consideração a bacia do Córrego do Glória como pequena, pode-se afirmar que os valores de Jhonstone só não foram melhores devido aos valores das áreas serem muito discrepantes em relação àqueles originalmente usados na geração da equação. Mesmo assim, essa equação proporcionou um dos menores erros para a bacia do Córrego do Glória.

Em Campo Grande – MS, Almeida et al. (2013), ao avaliar o desempenho de dez equações empíricas e compará-las com os valores de hidrogramas decorrentes do monitoramento hidrológico do Córrego Guariroba, apontaram Jhonstone e Giandotti com a menor diferença percentual entre as equações testadas, sendo esta última a que mais se destacou. Segundo Silveira (2016), ao avaliar diversas equações para tempo de concentração na Bacia Experimental do Glória, em Minas Gerais, apontou que Giandotti, Ventura, Jhonstone, Pasini e SCSLag apresentaram bons resultados para aplicação na bacia em relação às demais equações testadas.

Algumas equações apresentadas na Tabela 11 não apresentaram resultados satisfatórios, como no caso de Izzard, Kirpich, Carter, CorpsEginers, Eagleson, George Ribeiro, Schaake et al. Todas elas apresentaram um erro relativo alto, por isso não são recomendadas para o uso na Bacia Experimental do Glória, como já apontava Silveira (2016) em seu trabalho.

6.4 Modelagem de uma equação para estimativa do tempo de concentração em pequenas bacias hidrográfica na região de Uberlândia, Minas gerais

O presente trabalho tem como um dos objetivos desenvolver um modelo matemático propício que estime o tempo de concentração para as três Bacias Hidrográficas Experimentais situadas na região de Uberlândia – MG. Para gerar o modelo matemático, foi realizada a correlação de Pearson entre as variáveis área (A), comprimento do talvegue principal (L), declividade média do curso principal (S) e intensidade de precipitação (i), obtidos nas três bacias em estudo. A correlação permitiu conhecer o grau de dependência entre duas ou mais variáveis quantitativas que estão sendo avaliadas. Os resultados para esse teste estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tabela de correlação entre o tempo de concentração e as variáveis independentes área (A), comprimento do talvegue principal (L), declividade média do curso principal (S) e intensidade de precipitação (i), nas bacias experimentais dos córregos Água Vermelha, Fundo e Glória

Correlação de Pearson¹	tc	A	L	S	i
tc	1	0,40	0,604	-0,80	0,19
A		1	0,969	-0,861	0,033
L			1	-0,959	0,109
S				1	-0,188
i					1

Fonte: O autor.

Nota: ¹Correlação de Pearson entre as variáveis A e L, A e S e L e S apresentaram p-valores abaixo de 0,05, já as demais interações revelaram p-valores maiores que 5%

Quanto mais próximo de 1 for a interação entre as variáveis, mais forte é a correlação e mais elas se assemelham. Por outro lado, tal condição infere que elas estão expressando as mesmas condições. Nesse caso, como as variáveis A e L revelaram uma forte correlação entre elas (0,969), optou-se por descartar a variável L no processo de modelagem. Já a variável i apresentou baixa correlação com a área e com a declividade, por esse motivo não foi utilizada na modelagem. Em relação às variáveis A e S, devido à boa correlação com o tempo de concentração, elas foram escolhidas para a construção do modelo matemático. Vale destacar que as correlações entre o tempo de concentração *versus* A, L e S apresentaram significância a 5% de probabilidade com p-valores abaixo de 0,05.

O modelo matemático para a estimativa do tempo de concentração originou-se de 32 hidrogramas obtidos nas bacias hidrográficas em estudo e suas principais variáveis fisiográficas apontadas na correlação. Esses valores foram manipulados no *software* SigmaPlot 12.0 com a intenção de encontrar o melhor modelo de regressão matemática capaz de estimar o tempo de concentração para as três bacias hidrográficas experimentais. Várias combinações foram testadas e avaliadas sistematicamente, no entanto a regressão linear múltipla que melhor representou o modelo matemático a partir dos testes estatísticos exigidos neste trabalho está indicada na Equação 21.

$$tc_{\text{modelado}} = 35,71 - (1,66 \cdot A) - (792,461 \cdot S) \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

tc_{modelado} = tempo de concentração estimado por modelo de regressão ajustado para três bacias hidrográficas na região de Uberlândia – MG, em horas;

A = área da bacia hidrográfica, em km²;

S = declividade média do curso principal mm⁻¹.

Os resultados estatísticos da Equação 21 estão descritos na Tabela 13. Analisando os resultados contidos nessa tabela, nota-se que o modelo passou no teste de normalidade de Shapiro-Wilk, a nível de 5% de probabilidade, resultando valor da estatística W de 0,64. Ademais, essa equação apresentou p-valor menor que 0,001 para o teste t, que avaliou as constantes do modelo e teste F, que aferiu estatisticamente a regressão, com nível de significância a 5%. Além disso, o modelo obteve um coeficiente de determinação (R²) de 0,93, que indica o modelo de regressão como útil ao considerar as variáveis A e S e o

universo amostral como sendo 32 hidrogramas. O fator de variância de inflação (FIV) também forneceu um resultado favorável de 3,888, o que indica a ausência de colinearidade.

Tabela 13 – Resultados estatísticos do modelo matemático para tempo de concentração ajustado para as três bacias hidrográficas experimentais em estudo

Fonte de Variação	Coef.	t	p-valor t	FIV	F*	p-valor F	W**	R ²	EPE*** (min)
Constante	35,71	17,37	0,001						
A	1,66	-11,43	0,001	3,888	198,63	0,001	0,64	0,93	67,81
S	-792,46	-18,13	0,001	3,888					

Fonte: O autor.

Nota: *F significa o resultado do teste F da regressão; **W é o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5 % de probabilidade; ***EPE significa erro padrão de estimativa, em minutos. Valores de W acima de 0,05 indicam que os resíduos da regressão foram aprovados no teste de normalidade de Shapiro-Wilk

A atual equação matemática modelada para o cálculo do tempo de concentração nas três bacias em estudo também foi submetida ao teste de Nash-Sutcliffe-C_{NS} (Tabela 14). O coeficiente C_{NS} indica o grau de eficiência do modelo de regressão matemática proposto. Para realizá-lo, foram escolhidos 30 hidrogramas aleatoriamente e diferentes daqueles utilizados para gerar o modelo matemático.

Tabela 14 – Tempos de concentração observados (t_{cobs}) em 30 hidrogramas e tempos de concentração estimados (t_{c_{est}}) a partir da equação matemática modelada para as três bacias hidrográficas

(continua)

Data do Hidrograma	t _{cobs} (min)	t _{c_{est}} (min)
29/12/2016	685	602
11/01/2017	475	602
15/01/2017	615	602
31/01/2017	595	602
22/02/2017	590	602
01/03/2017	595	602
06/04/2017	695	602

		(conclusão)
13/04/2017	570	602
22/05/2017	665	602
30/12/2017	620	602
12/02/2018	535	602
03/04/2018	620	602
15/06/2018	670	602
03/11/2015	240	282
06/12/2015	460	282
20/12/2015	425	282
28/12/2015	260	282
19/01/2016	305	282
29/02/2016	165	282
12/03/2016	305	282
16/05/2016	170	282
20/01/2017	170	282
01/11/2017	130	282
13/01/2018	180	282
04/02/2018	130	282
28/10/2017	35	53
22/12/2017	110	53
24/01/2018	35	53
19/02/2018	110	53
12/04/2018	40	53
$\sum_{i=1}^n (\mathbf{tc}_{\text{obs}_i} - \mathbf{tc}_{\text{est}})^2$		205390
$\sum_{i=1}^n (\mathbf{tc}_{\text{obs}_i} - \overline{\mathbf{tc}_{\text{obs}}})^2$		1584917
C_{NS}		0,87

Ao aplicar o teste de Nash-Sutcliffe, o resultado do coeficiente C_{NS} para o modelo elaborado foi de 0,87. Considerando a determinação de Moriasi et al (2007), que designa os valores de C_{NS} como sendo muito bom para $0,75 < C_{NS} \leq 1,0$, a partir do $C_{NS}0,87$ obtido, pode-se afirmar que o modelo matemático de regressão desenvolvido para o cálculo do tempo de concentração para as três bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais, é considerado muito bom.

7 CONCLUSÕES

O tempo de concentração observado a partir dos hidrogramas monitorados nas Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Água Vermelha, Fundo e Glória foi respectivamente em média de 615 minutos, 55 minutos e 215 minutos. Esses valores reforçam de forma imediata as primeiras impressões identificadas em cada bacia em relação aos arranjos fisiográficos. Constatou-se que as bacias com maiores declividades no curso principal, textura mais argilosa do solo e com a presença de áreas parcialmente urbanizadas proporcionaram hidrogramas com tempos de concentração menores e picos de vazões mais acentuados.

Ao comparar o desempenho de 23 equações empíricas em relação ao tempo de concentração dos hidrogramas obtidos nas bacias avaliadas, verificou-se que para as Bacias do Córrego Água Vermelha e Córrego Glória as equações de Giandotti e Ventura se repetiram entre as equações de melhor desempenho, apontando erros próximos a 40%. As equações de Izzard e Onda Cinemática também obtiveram bons resultados para a Bacia do Córrego Água Vermelha com erros respectivamente de 35% e 47%. Assim como também as equações de Jhonstone e Pasini tiveram bom destaque para a Bacia do Córrego Glória com erros de 42% e 43%, respectivamente.

Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, as equações que sobressaíram com melhor desempenho foram de Carter, Espey-Winslow e Picking com erros seguidos de 32%, 37% e 41%. Diferentemente das demais bacias, para o Córrego Fundo, destacaram as equações de tempo de concentração que apresentam somente as variáveis declividade e comprimento do talvegue principal. Essa diferença no desempenho das equações entre as bacias pode estar condicionada às características geográficas, físicas e dinâmicas do uso e ocupação, como também ao pouco tempo de monitoramento hidrológico na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Fundo.

A equação matemática modelada para estimativa do tempo de concentração em pequenas bacias hidrográficas na região de Uberlândia, Minas Gerais, mostrou-se consistente. O modelo obteve um bom desempenho com as variáveis área da bacia (A) e declividade média do curso principal (S). Seu delineamento apresentou-se da seguinte forma para aplicação: $tc_{\text{modelado}} = 35,71 - (1,66 \cdot A) - (792,461 \cdot S)$ com $R^2 = 0,93$ e $C_{NS} = 0,87$.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Inventário das estações fluviométricas**. 2. ed. Brasília: ANA/SGH, 2009. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/InventariodasEstacoesPluviometricas.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

ALMEIDA, I. K. et al. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2013. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/4d7148aa9edae933b500b44e0d3f297d_57b96c400aecfb3306d6091d909da389.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2018.

ALMEIDA, I. K. et al. Model for estimating the time of concentration in watersheds. **Water Resources Management**, [S.l.], v. 30. n. 12, p. 4083-4096, jun. 2016.

ARAÚJO, B. A. M. et al. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias urbanas. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Maceió, Alagoas, nov. 2011 - ABRH.

BRASIL. Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm> Acesso em: 25 jul. 2018.

CHAVECA, C. S. Resistência ao escoamento sobre o terreno. Efeitos da macrorrugosidade e vegetação. 1999. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos) - Lisboa, 1999.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1998. 572 p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA. **CBH Paranaíba**. Itumbiara-GO, 2013. Disponível em: <<http://cbhparanaiba.org.br/index.php>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização Hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 173-183, 2010. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n3.p173-183>

DE BIAGGI, M. L. S. et al. Fator de inflação da variância e regressões auxiliares para diagnóstico do problema de multicolinearidade nos modelos de regressão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIA, 19., 2017, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: COBREAP, 2017. Disponível em: <<https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2017/08/025.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

FANG, X. et al. Time of concentration estimate using watershed parameters determined by automated and manual methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.l.], v. 134, n. 2, p. 202-211, abr. 2008.

FARIAS JÚNIORS, J. E. F.; BOTELHO, R. G. M. Análise Comparativa do tempo de concentração: Um estudo de caso na bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2011. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/0b4c20f7e82170db2ceff1aa8a6a52ac_5a57d8c9a287545a525d05397b7d1450.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2018.

FARRELL, D. Experimental watersheds: A historical perspective. **Journal Soil Water Conservation**, [S.l.], v. 50, n. 5, p. 432-437, 1995.

FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. Tests of two physically based filters for base flow separation. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 39, n. 10, p. 1-11, 2003.

GIESBRECHT, R. M. **Estações Ferroviárias do Brasil**. 13 de jul. 2018. Disponível em: <http://www.estacoesferroviarias.com.br/mogiana_triangulo/uberlandia.htm>. Acesso em: 12 set. 2018.

GONZALES, A. L.; NONNER, J.; HEIJKERS, J.; UHLENBROOK, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [S.l.], v. 6, p. 3483-3515, 2009.

GOTTSCHALK, L. et al. Regional/Macroscale Hydrological Modelling: a Scandinavian Experience. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 46, n. 6, p. 963-982, Dec, 2001.

GRIMALDI, S. et al. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 217-228, 2012. Disponível em:<<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626667.2011.644244>>. Acesso em: 29 maio 2018.

HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K. G. In Defense of Experimental Watersheds. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 5, p. 306-316, Fev. 1969.

HUANG, M.; ZHANG, L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. **Hydrological Processes**, [S.l.], v. 18, p. 1885-1898, 2004.

KIBLER, D. F. Desk-top methods for urban storm water calculation. Urban storm water hydrology, American Geophysical Union, **Water Resources Monograph**, [S.l.], v. 7, p. 87-135, 1982.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds: the original source for the Kirpich equation. **Civil Engineering**, Texas, v.10, n. 6, p. 362, 1940.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.F.; SILVA, R.V. Time of concentration in the UFSC Campus catchment, Florianópolis-SC (Brazil), calculated with morphometric and hydrological methods. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E REGIONAL CONFERNECE ON GEOMORPHOLOGY. Goiânia: UFG, Anais, 2006, p. 1-11.

LINSLEY Jr., R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for engineers**. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1975.

LOUKAS, A.; QUICK, M. C. Physically-based estimation o flag time for forested mountainous watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 119, 1996.

NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK HYDROLOGY. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 2016. Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

NETTO, A. J. M. et al. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1998.

MARTINS, L. C. **Vazão Máxima em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MATA-LIMA, et al. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p. 525-536, jul./set. 2007.

MC CUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S.l.], v.110, n. 7, p. 887-904, July 1984.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia**: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. 1. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2013.

MENDES, N. G. **Hidrogramas de cheia em duas bacias hidrográficas no cerrado mineiro**. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MIRANDA, A. C. R. et al. Métodos de Separação dos Escoamentos Superficial Direto e Subterrâneo: Estudo de Caso para a Bacia do Rio das Velhas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 169-181, abr./jun. 2014.

MOHAMOUD, Y.M.; EWING, L.K.; BOAST, C.W. Small plot hydrology: I. Rainfall infiltration and depression storage determination. **Transaction softhe ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 4, p. 1121-1131. 1990.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watersheds imulations. **Transactions ASABE**, [S.l], v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOTA, A. A. **Tempo de Concentração em Pequena Bacia Experimental**. f. 131. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

MOTA, A. A.; KOBİYAMA, M. Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n.1, p. 55-59, jan. /mar. 2015.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2016. 628 p.

PETTYJOHN, W. A.; HENNING, R. **Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related stream flow and water quality in Ohio**. Ohio: State University. Water Resources Center, 1979. 323 p.

PINTO, N. S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgar Blücher, 1976. 278 p.

RAMINHOS, C. **Experimentação e análise de resistência ao escoamento com macrorugosidades**. Évora: Universidade de Évora, 2002. (Relatório técnico).

SAMPAIO, A. S. et al. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 2016, Bento Gonçalves. **Anais...** Aracajú: ABRH, 2016. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/srhne/detalhes-86_analise-do-tempo-de-concentracao-em-funcao-das-caracteristicas-fisiograficas-em-bacias-rurais>. Acesso em: 10 jul. 2018.

SAMPAIO, S. C. et al. Estudo da precipitação efetiva para o município de lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 210-213, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000200013>

SANTHI, C. et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, [S.l], v. 37, p. 1169-1188, 2001.

SILVA, P. M. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300006>

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

SILVEIRA, L. B. P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado

em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

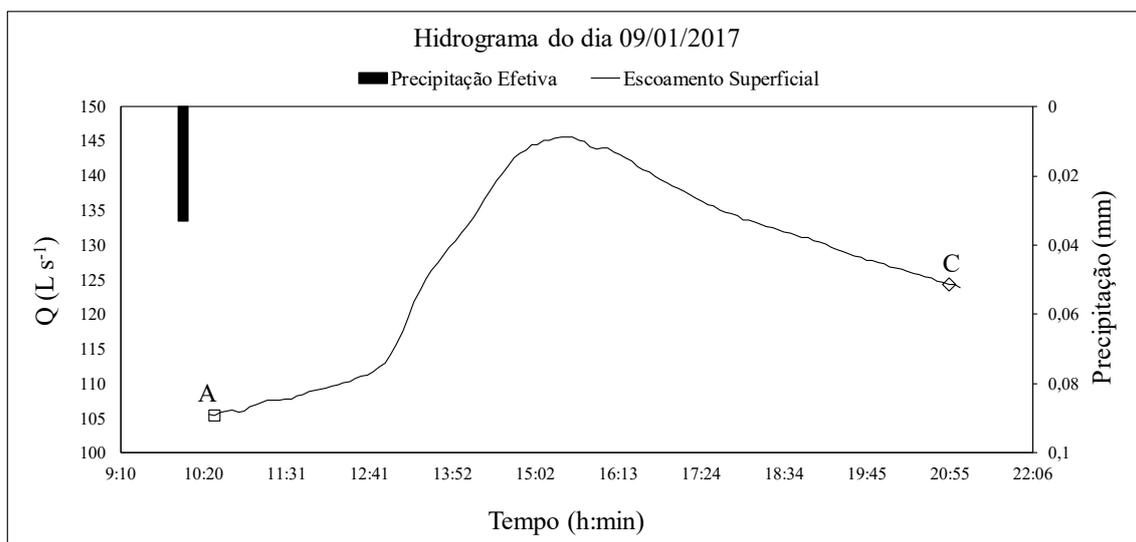
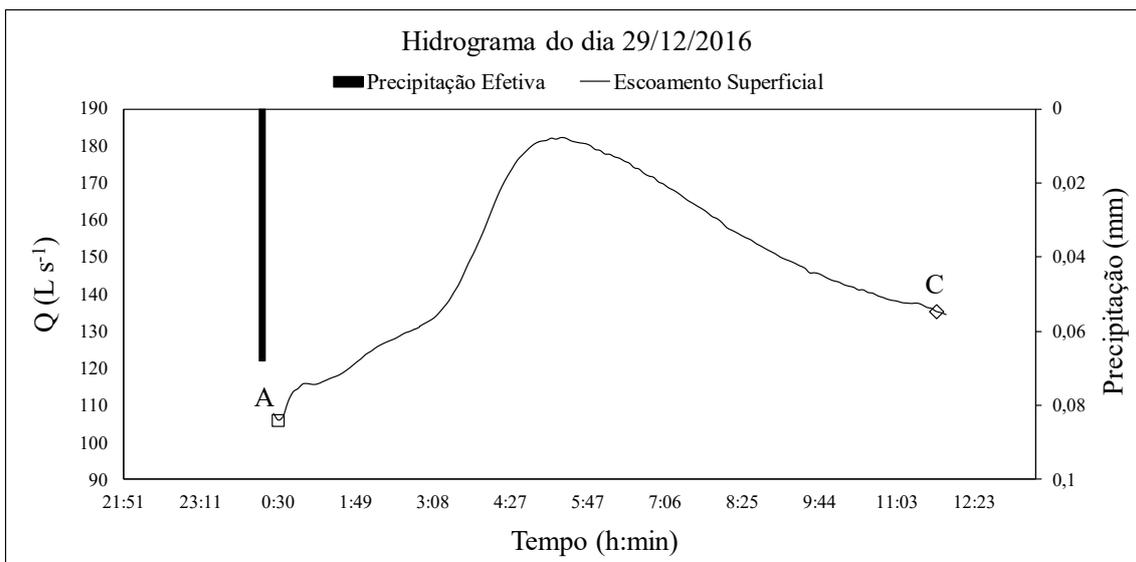
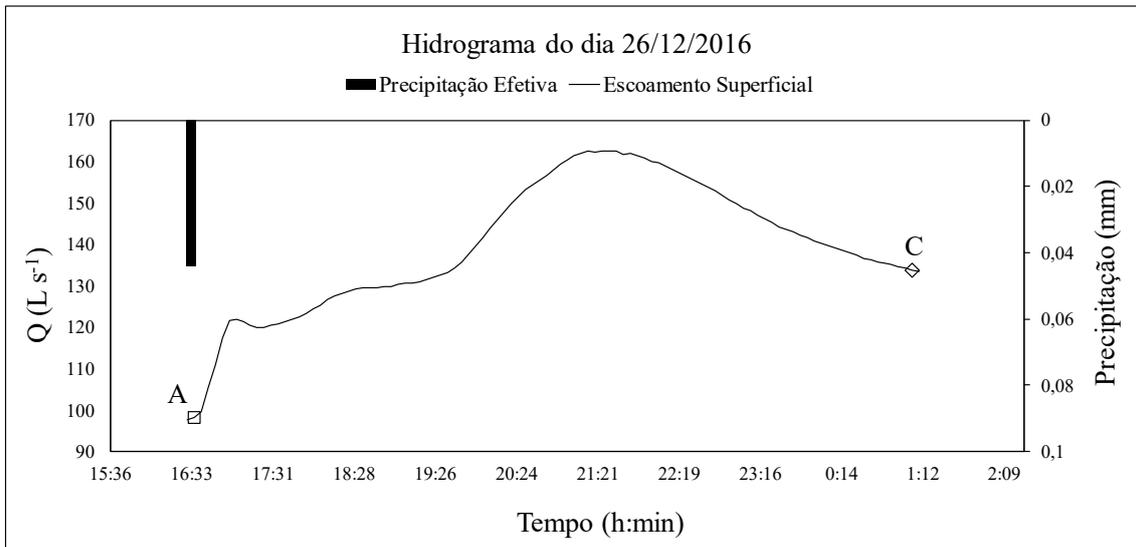
SOUZA, J. C. et al. Importance of adequate appropriation of physiographic information for concentration times determination. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 13, n. 4, p. 1-13, 2018.

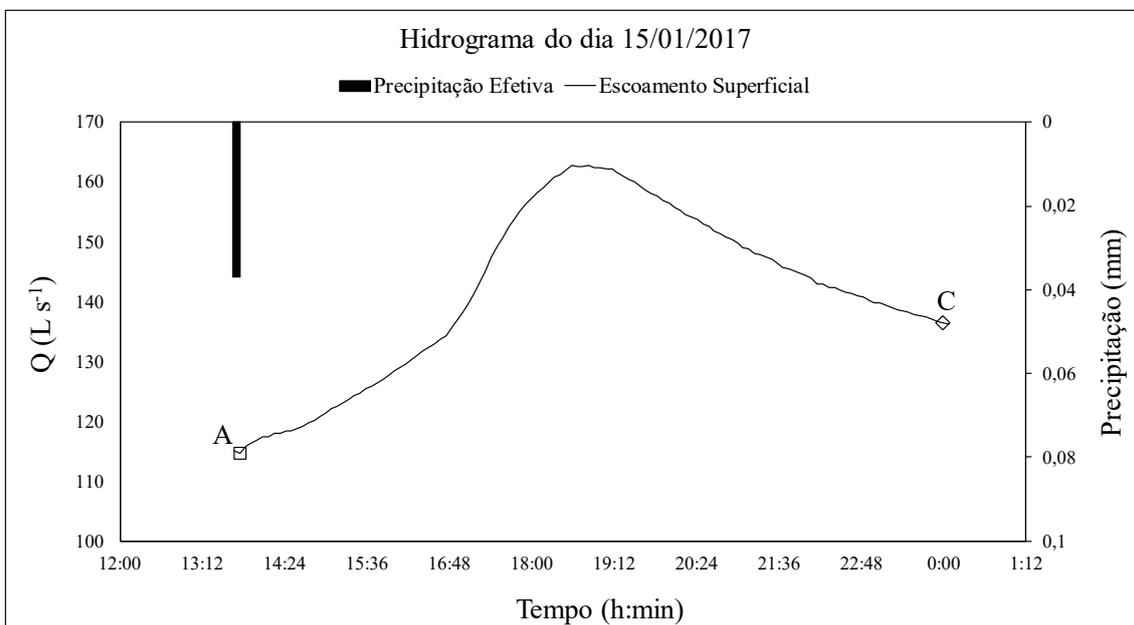
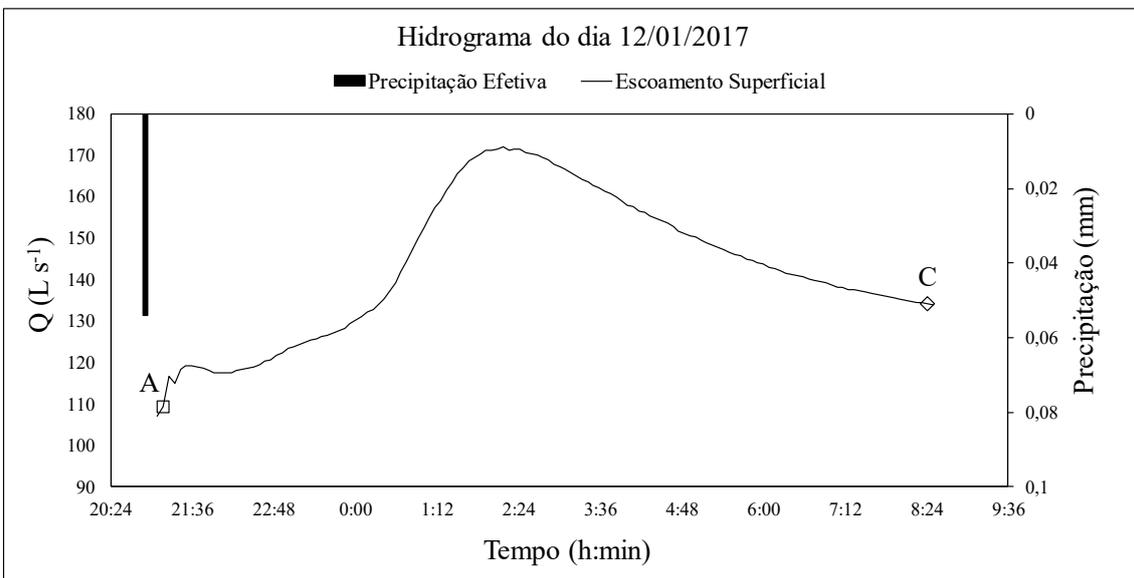
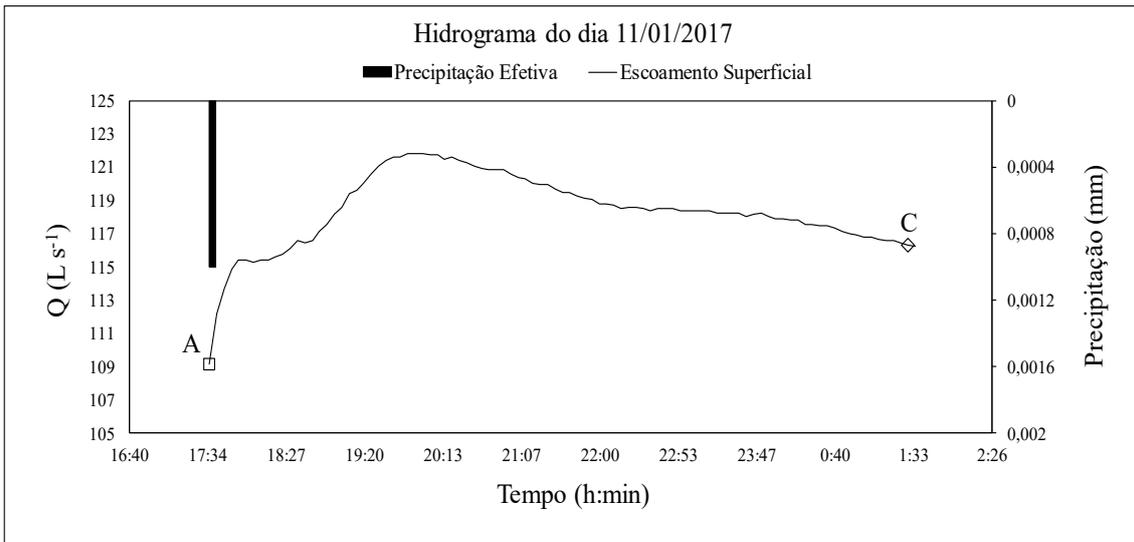
TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2014.

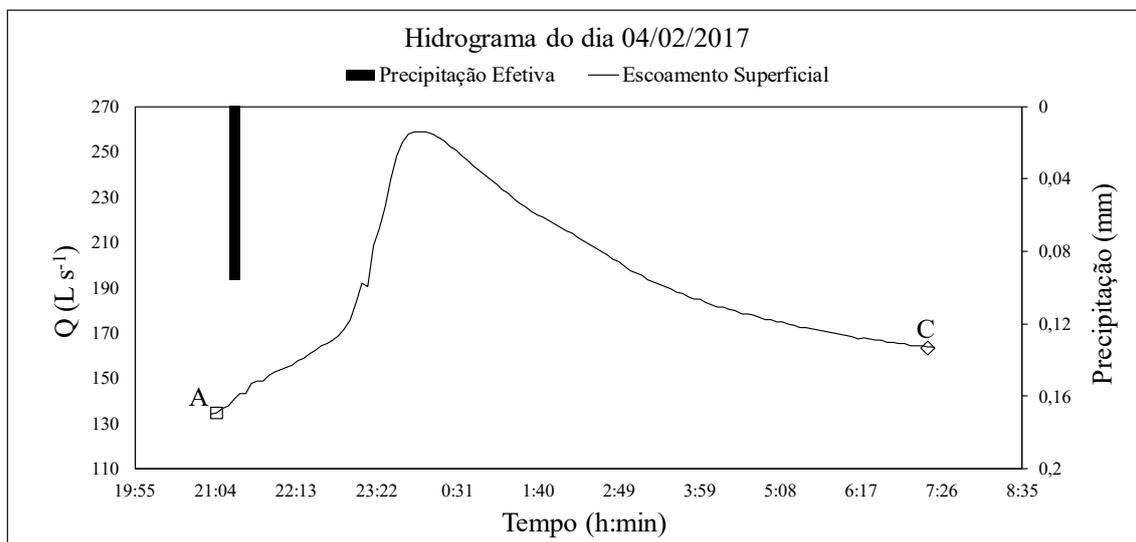
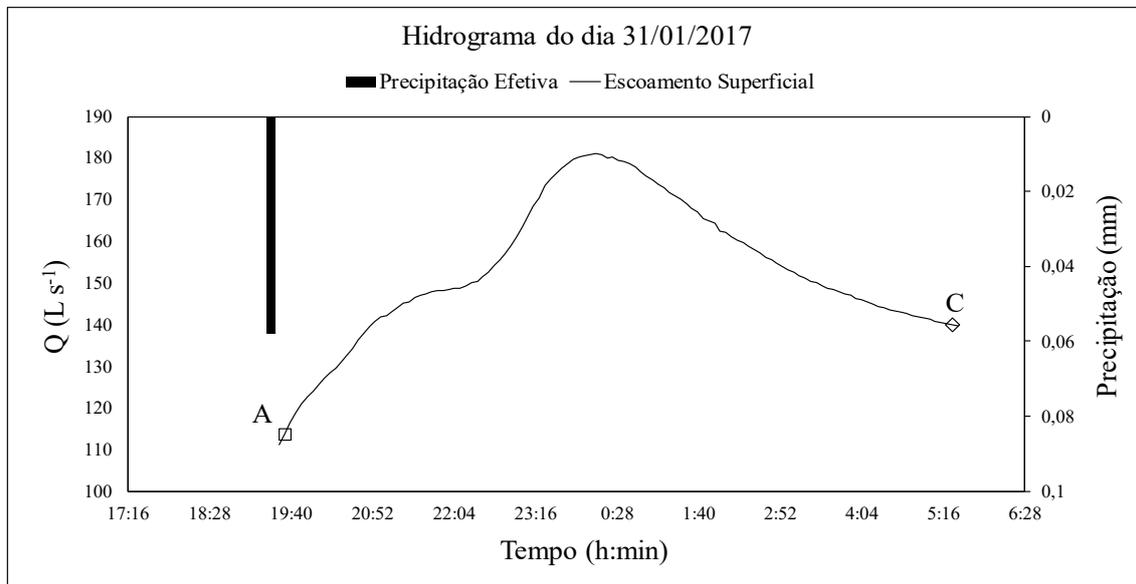
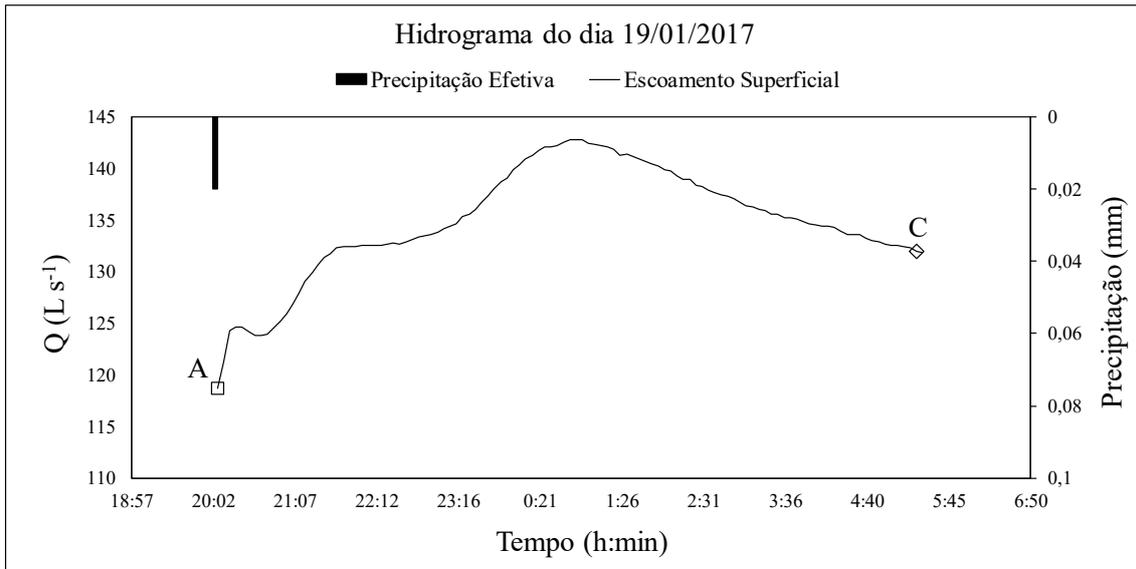
UNITED STATES. Department of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington D.C.: USDA, 1986.

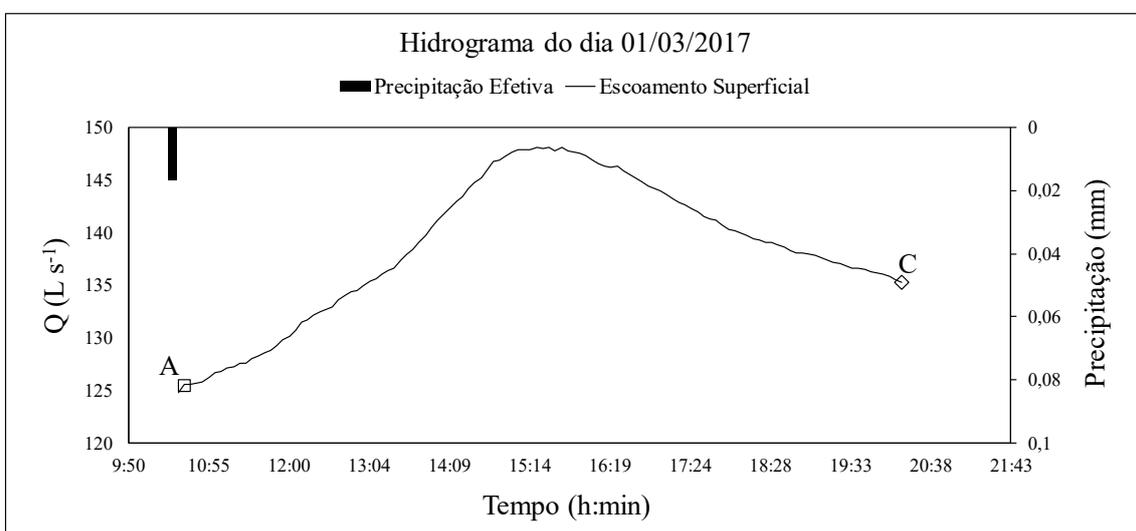
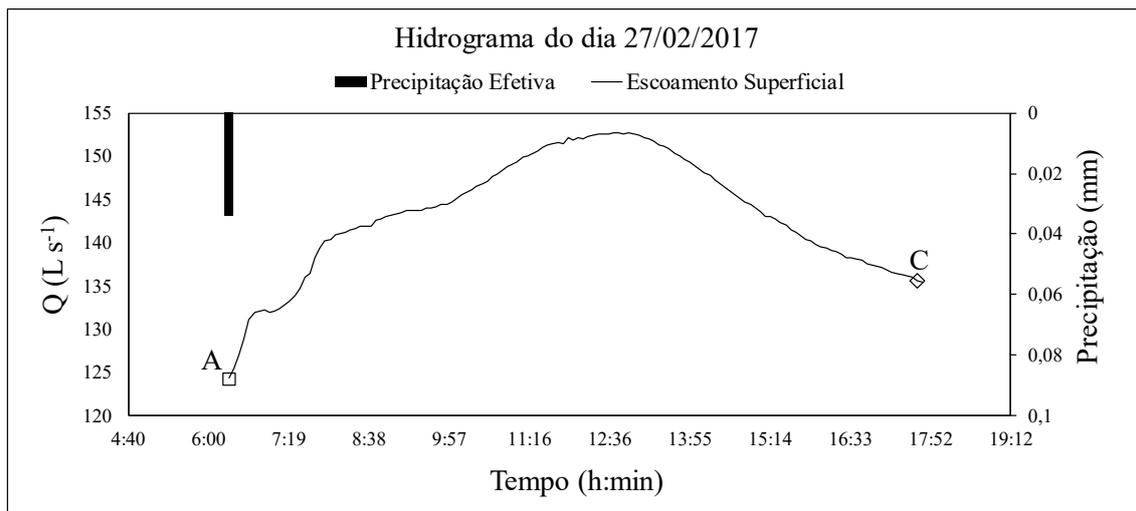
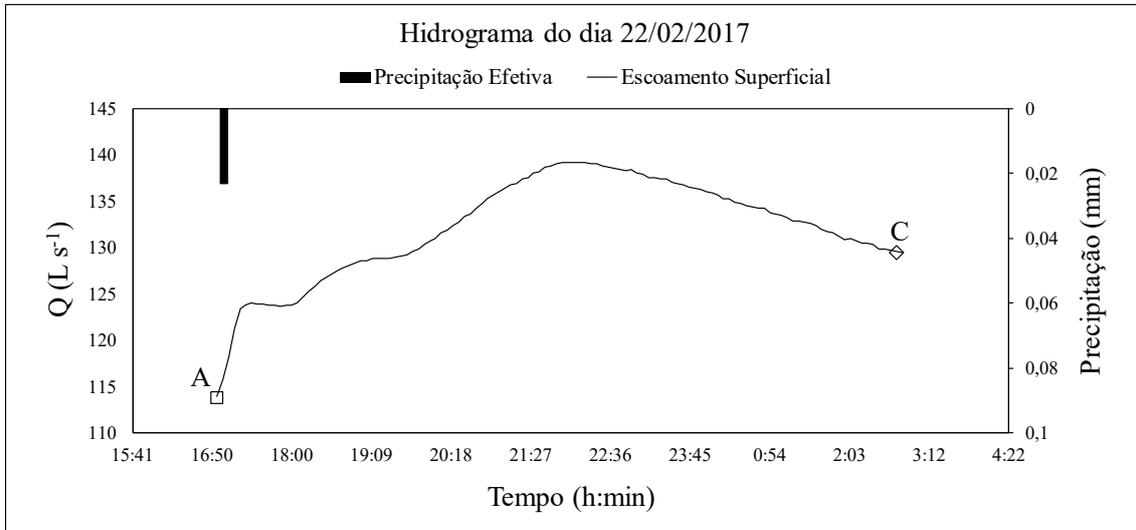
VIOLA, M. R. **Simulação Hidrológica na Região Alto Rio Grande a Montante de Reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

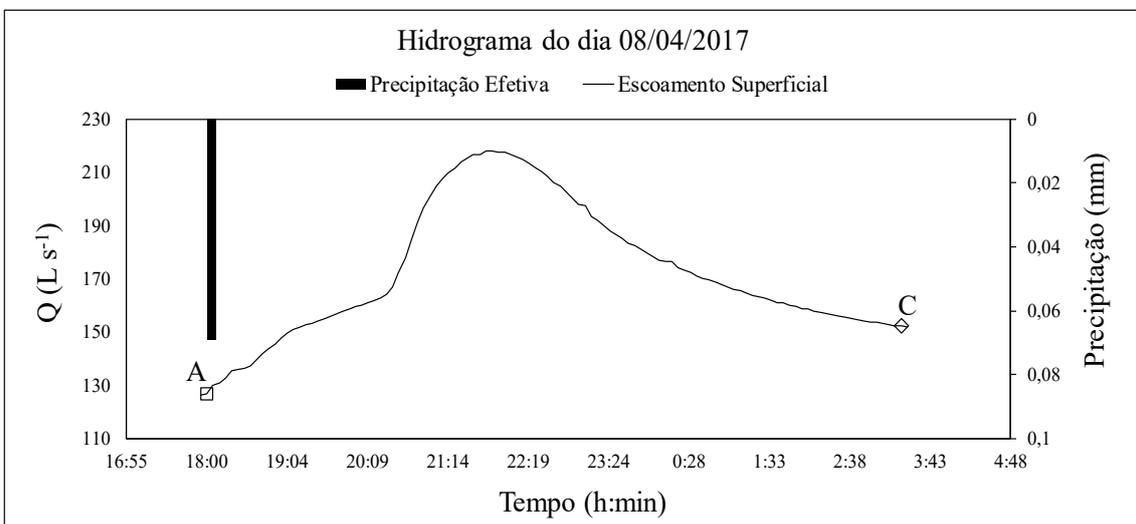
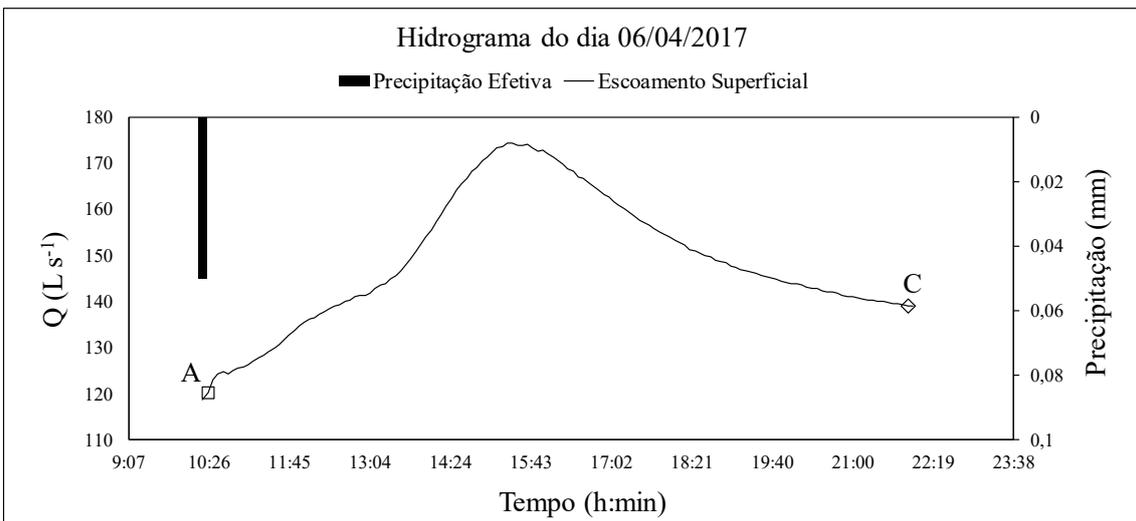
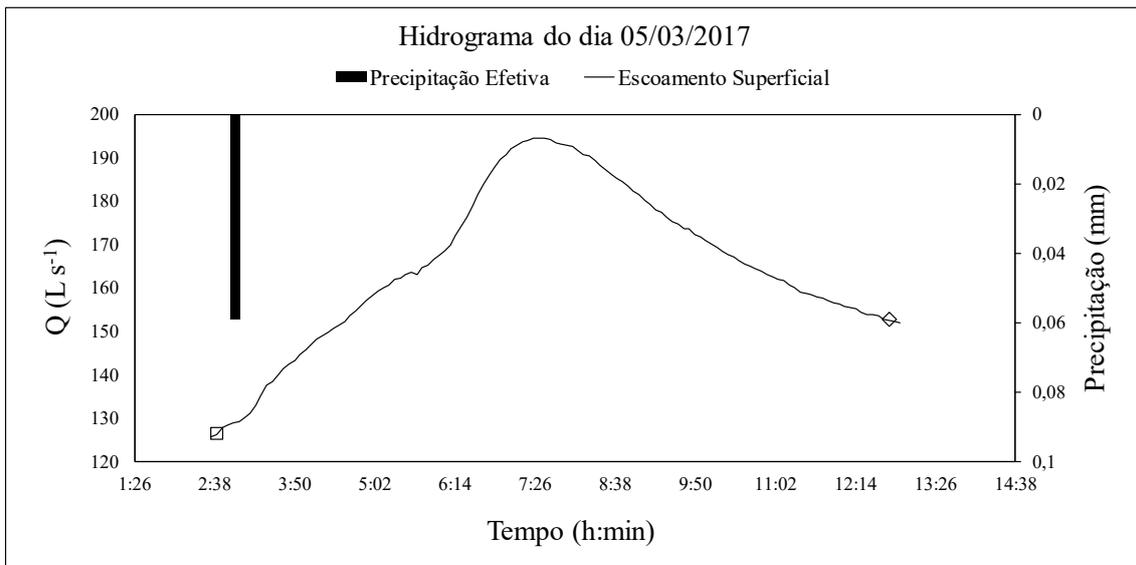
APÊNDICE A – HIDROGRAMAS BHEAV

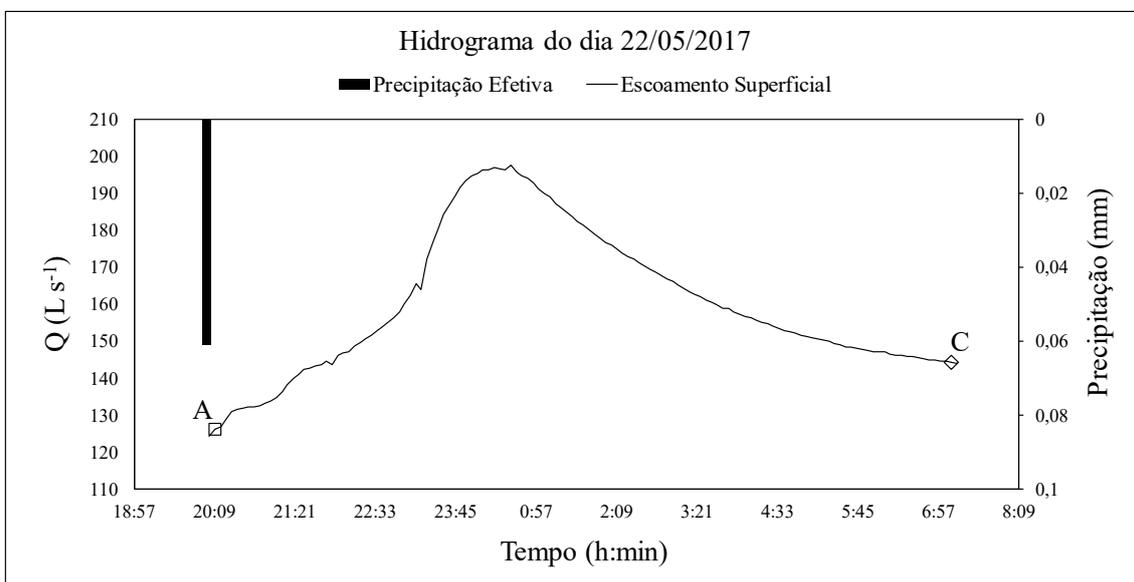
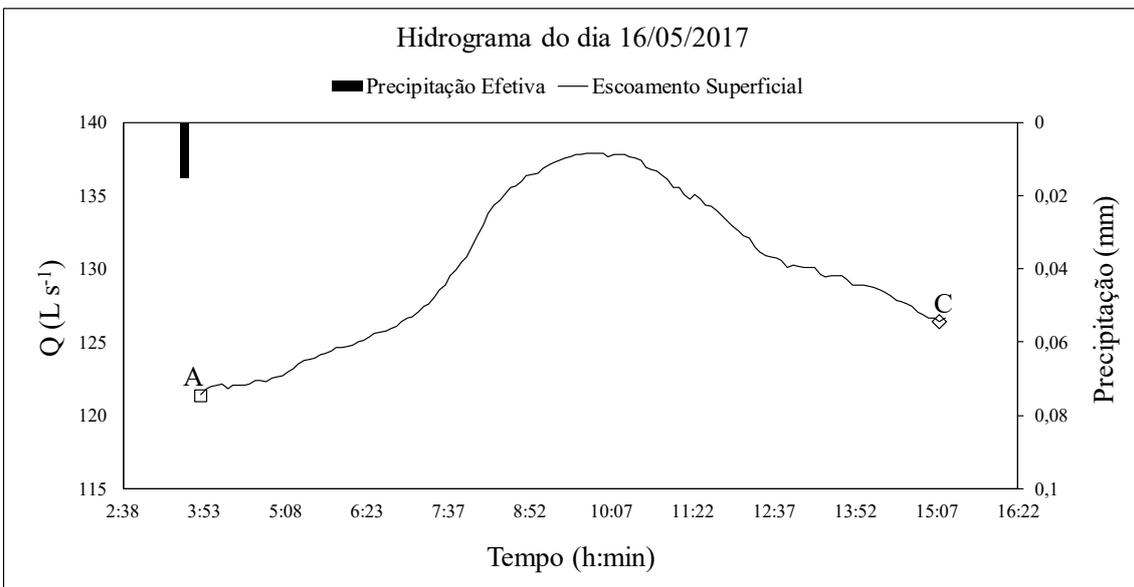
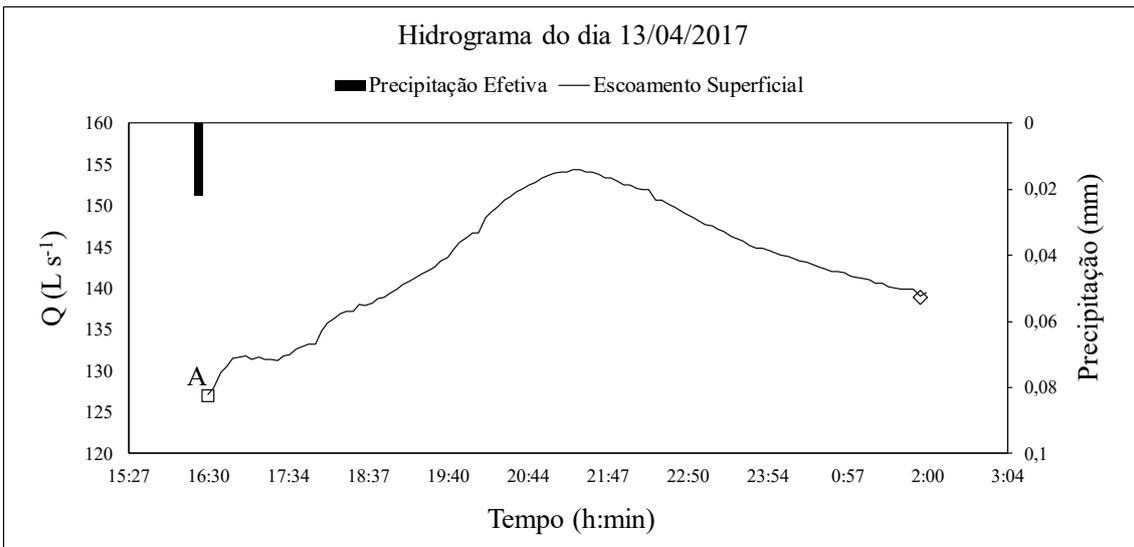


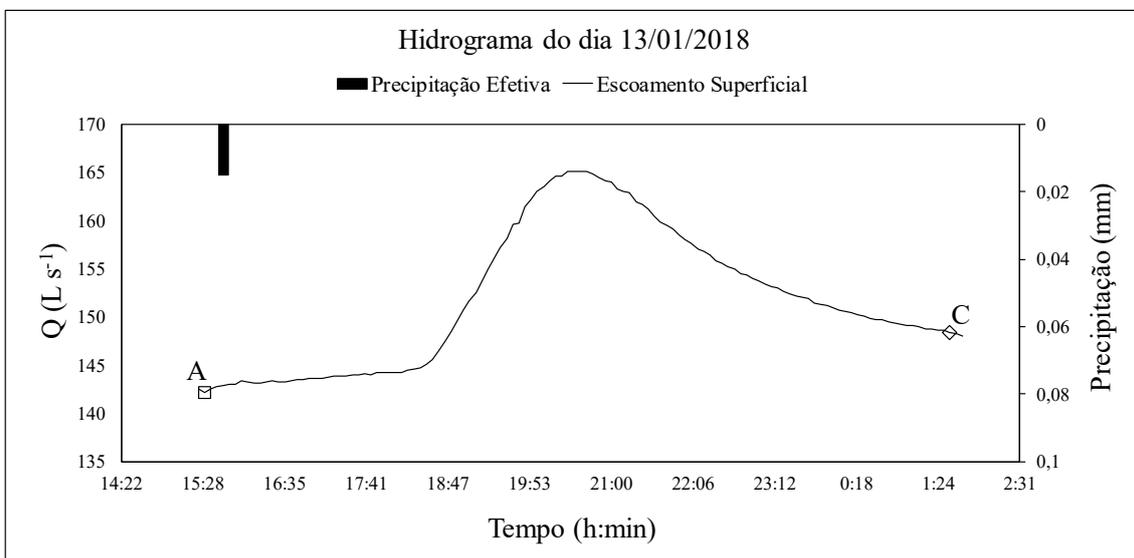
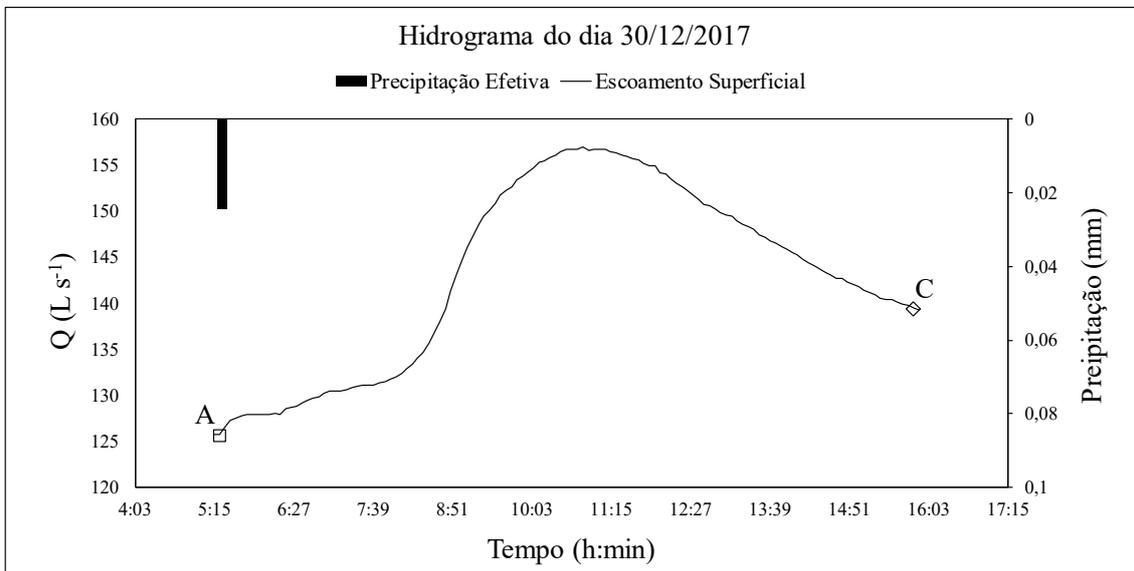
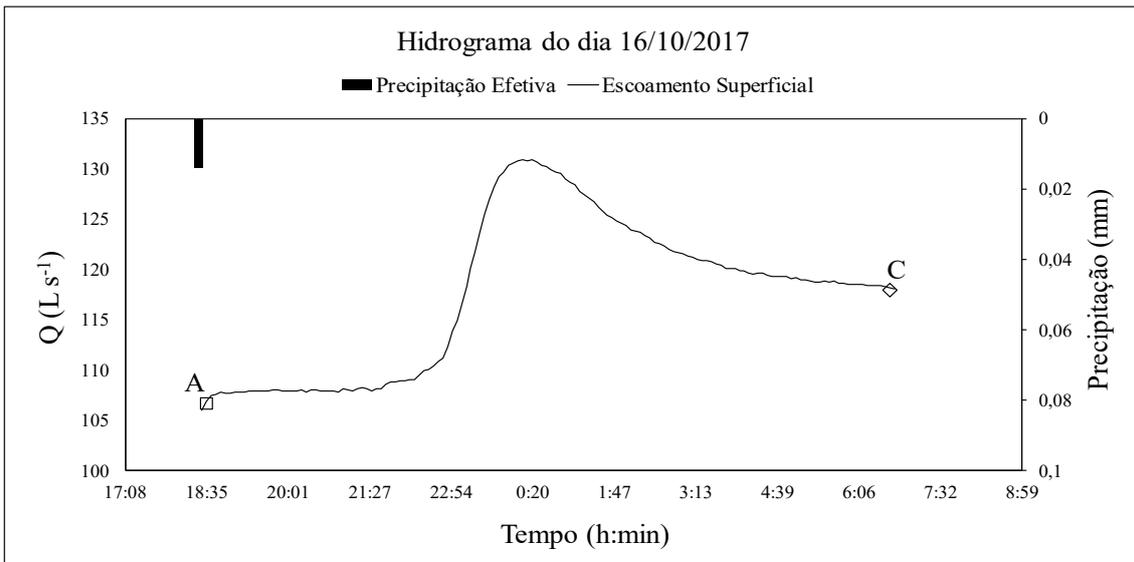


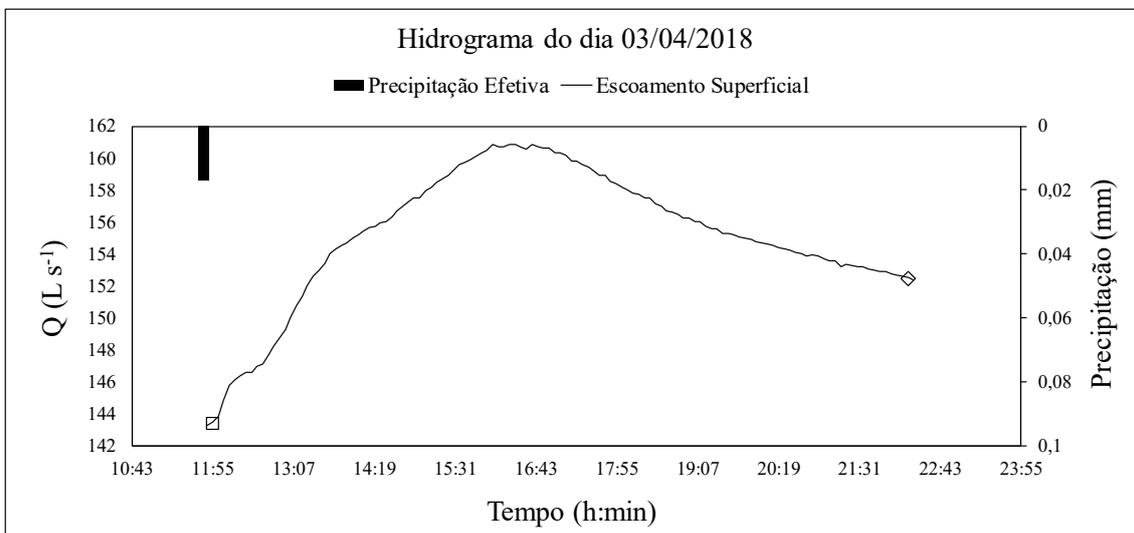
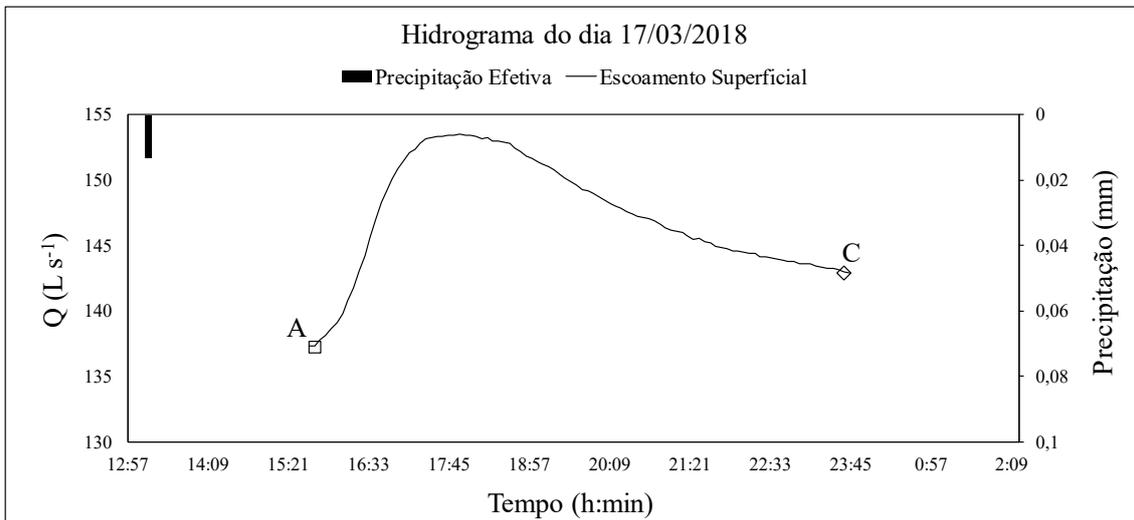
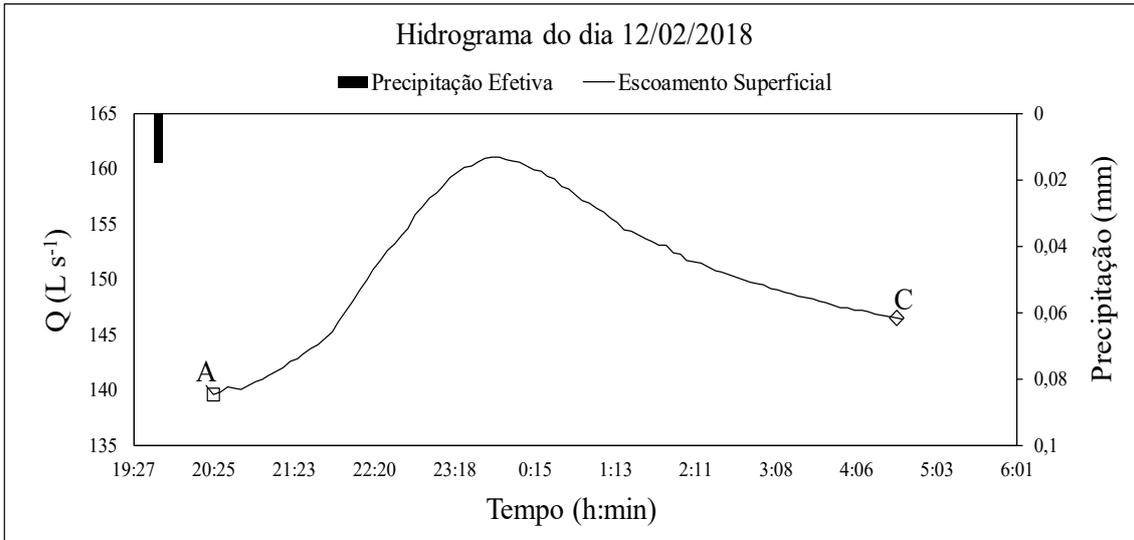


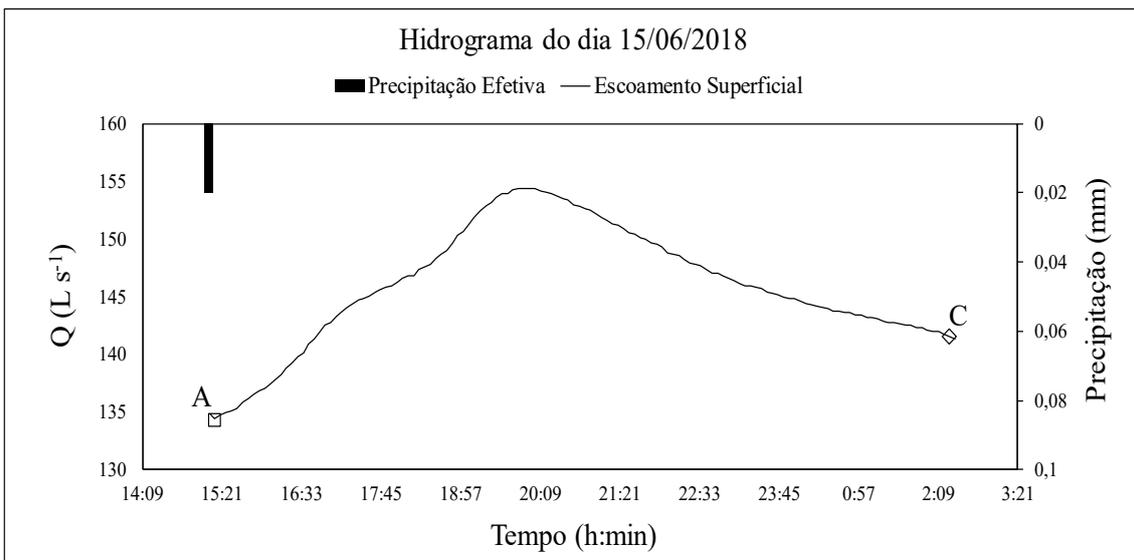
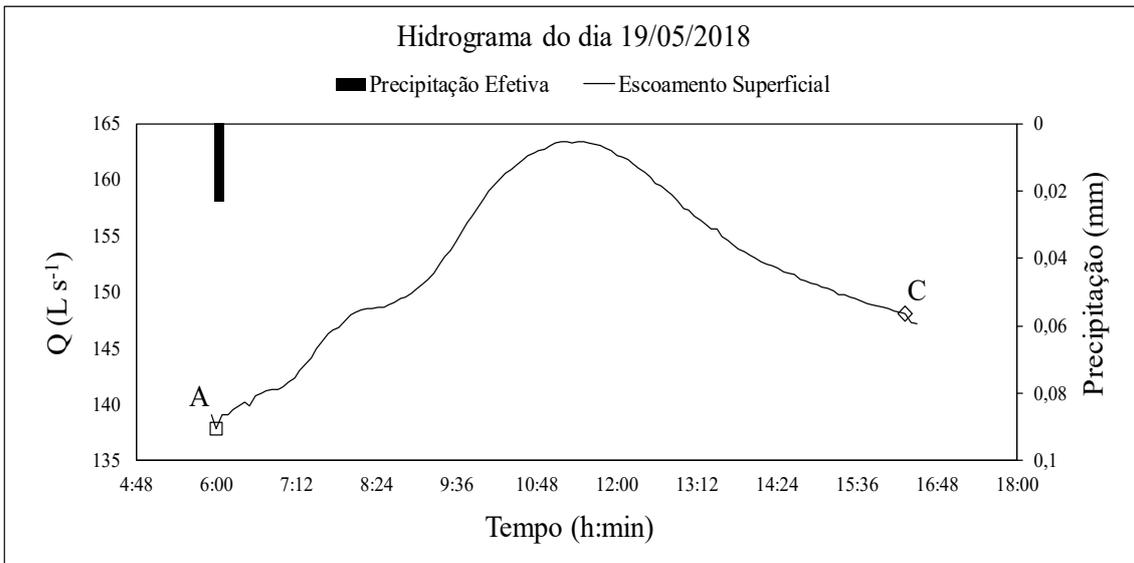




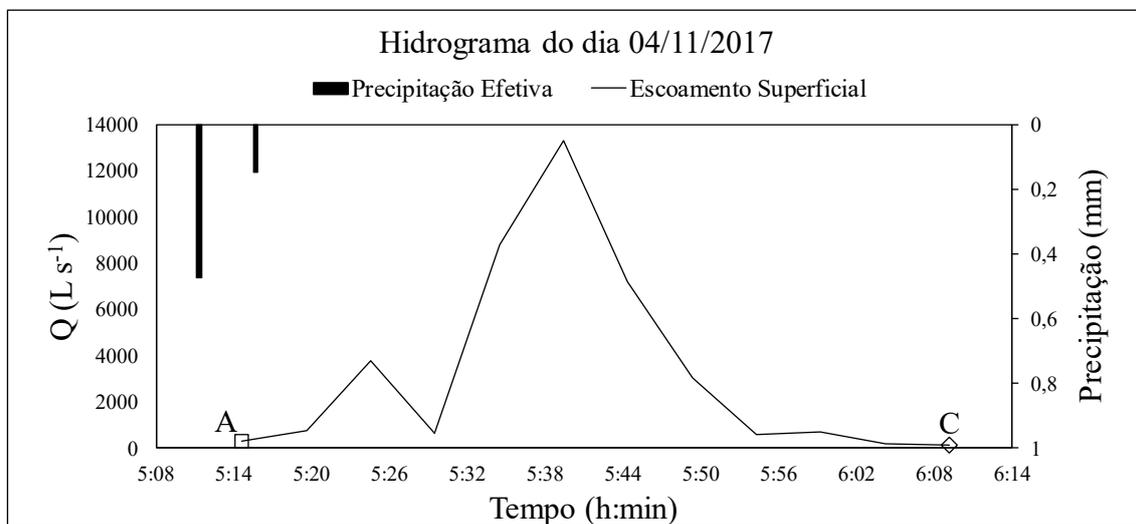
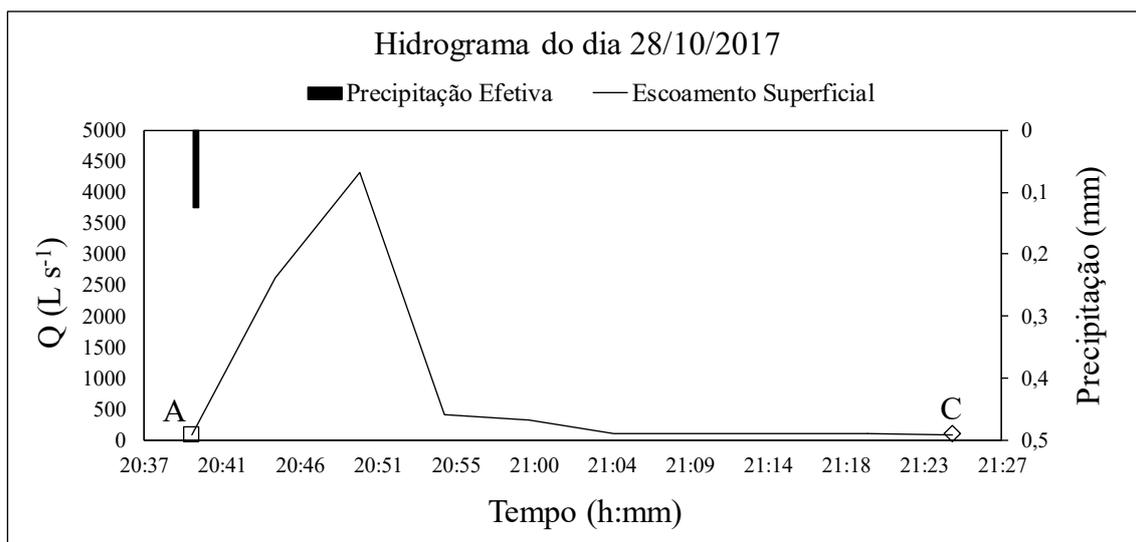
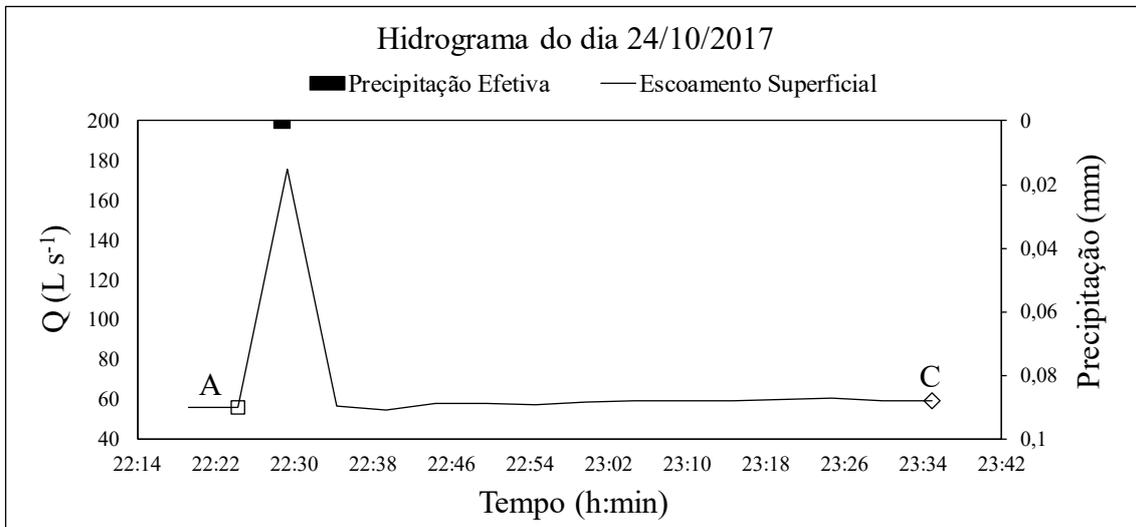


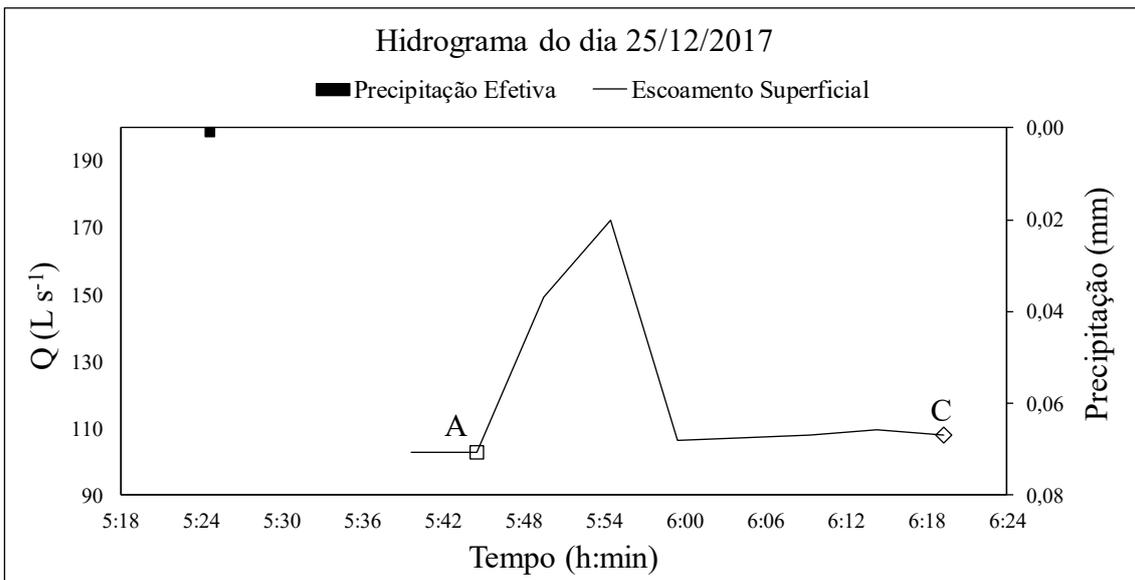
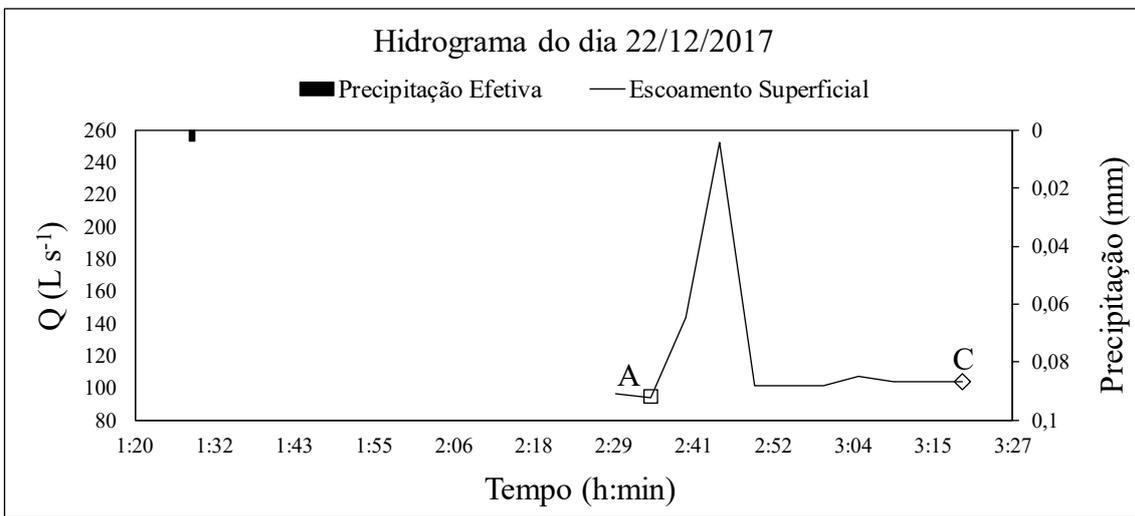
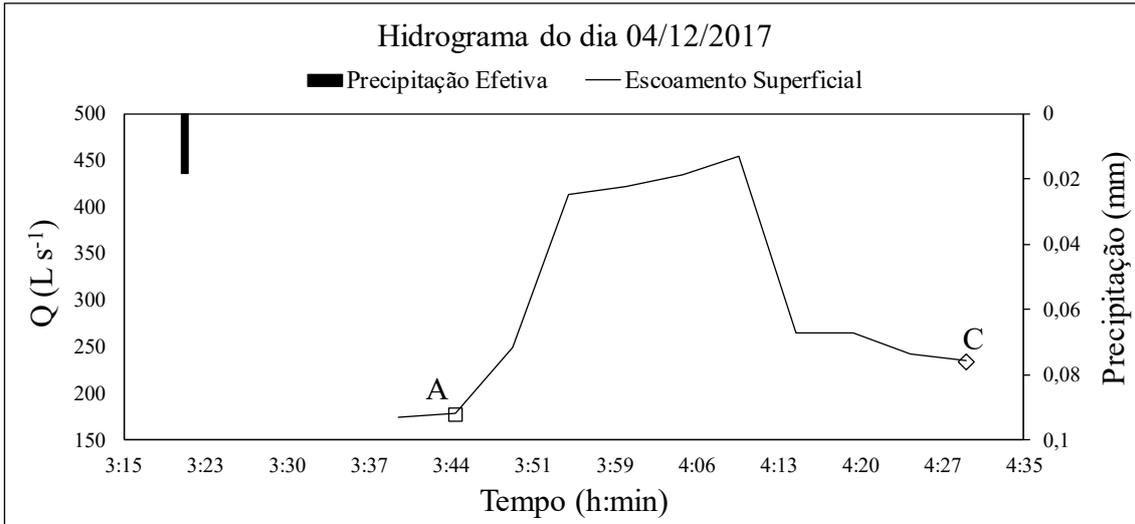


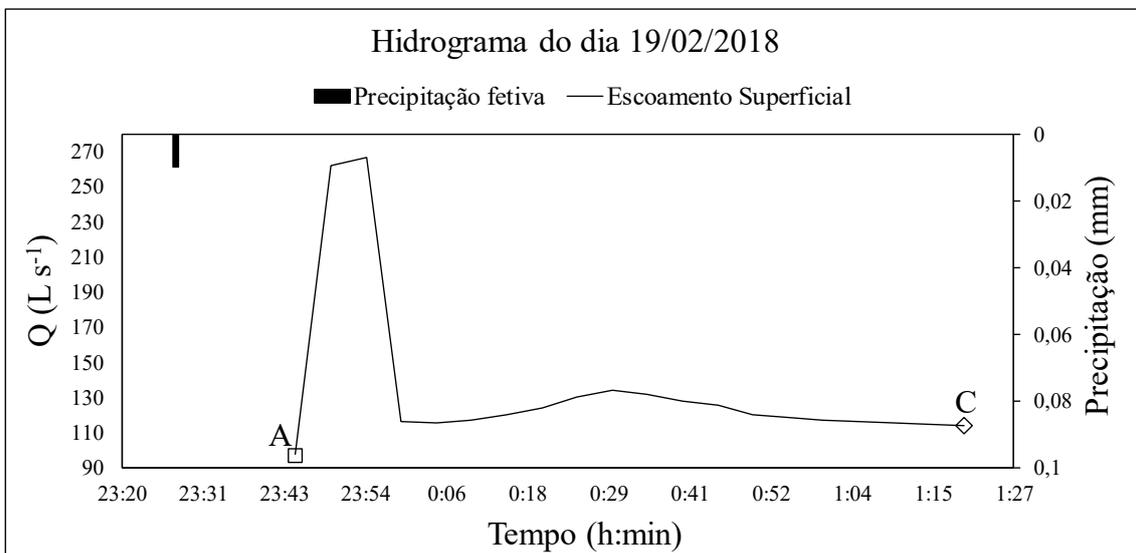
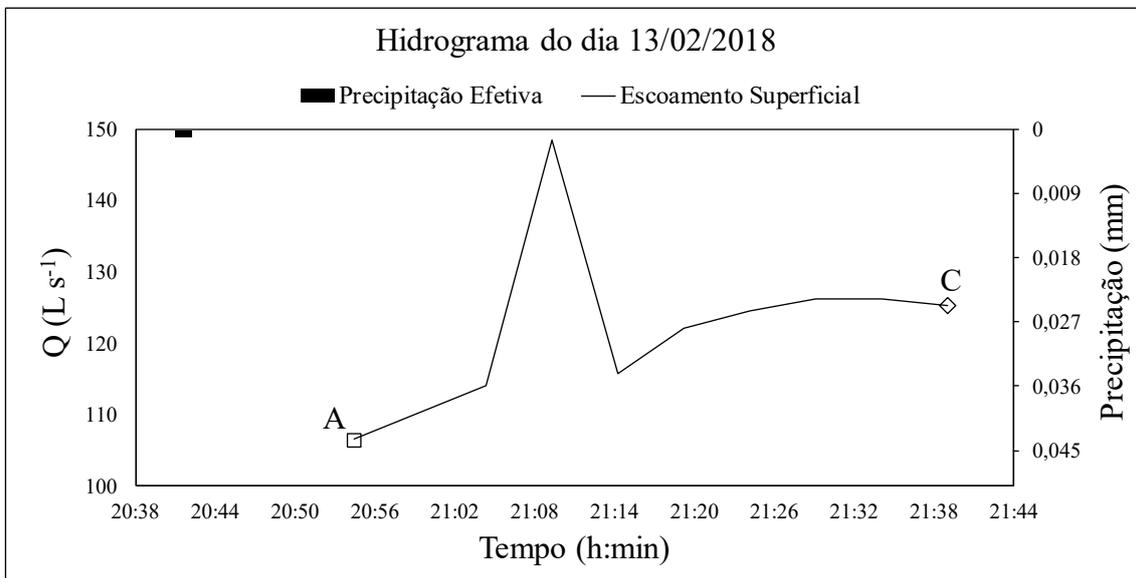
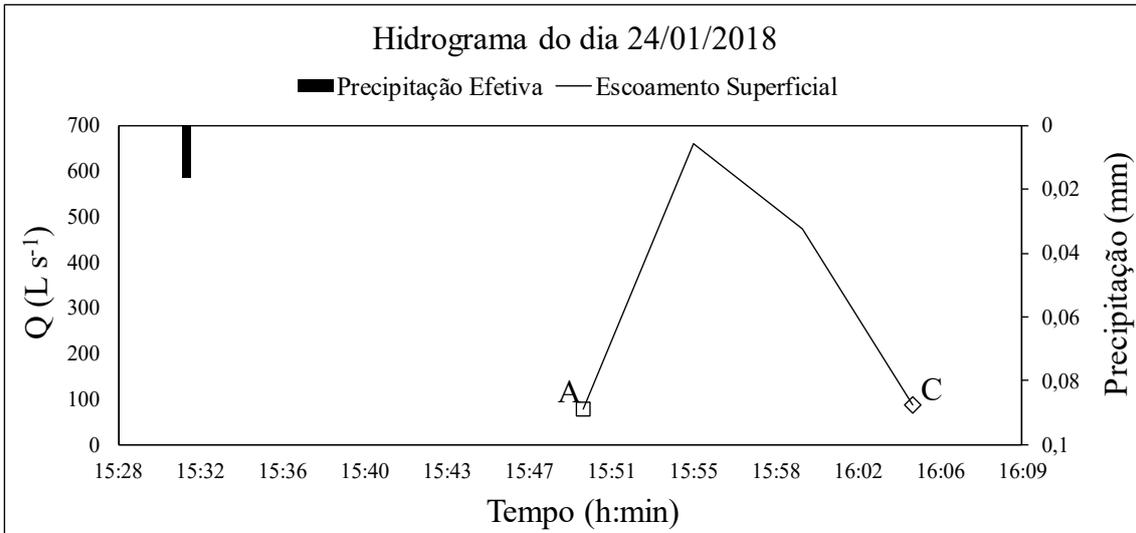


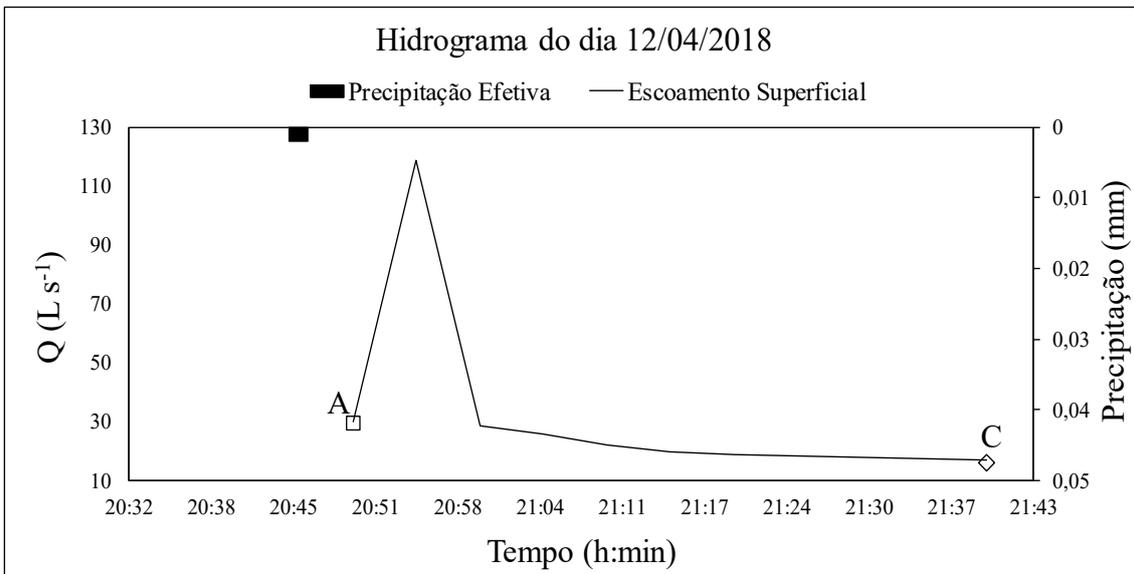
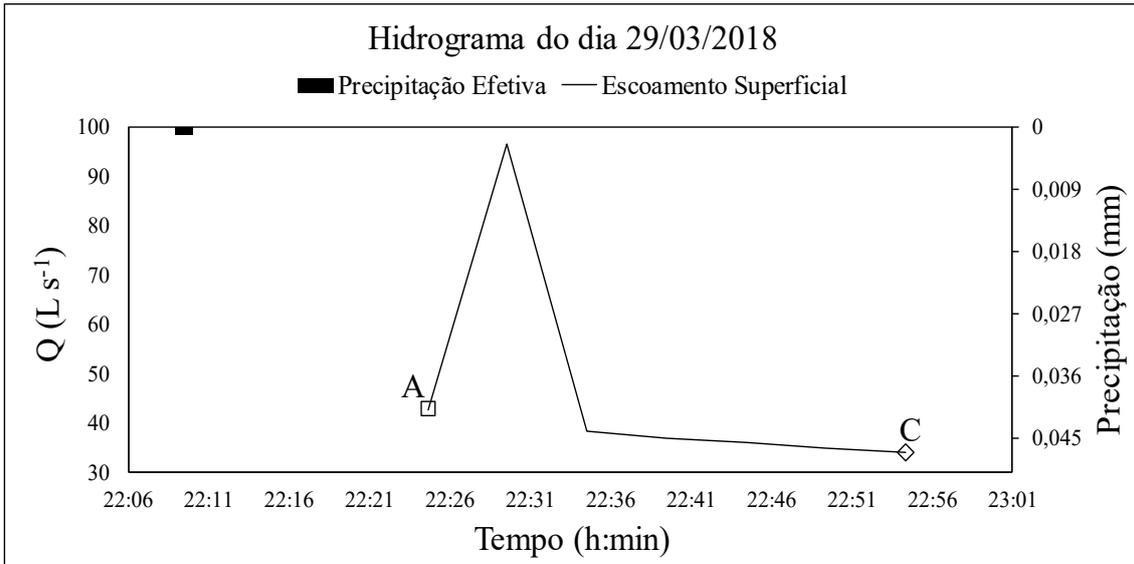


APÊNDICE B – HIDROGRAMAS BHEFU









APÊNDICE C – HIDROGRAMAS BHEGL

