

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

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA  
PARCIALMENTE URBANIZADA EM UBERLÂNDIA - MG

LILIANA BATISTA PARREIRA SILVEIRA

UBERLÂNDIA-MG

2016

LILIANA BATISTA PARREIRA SILVEIRA

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA  
PARCIALMENTE URBANIZADA EM UBERLÂNDIA - MG

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  
MINAS GERAIS – BRASIL

2016

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

---

S587t  
2016      Silveira, Liliana Batista Parreira, 1992  
            Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente  
            urbanizada em Uberlândia - MG / Liliana Batista Parreira Silveira. -  
            2016.  
            86 f. : il.

            Orientador: Hudson de Paula Carvalho.  
            Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
            Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.  
            Inclui bibliografia.

            1. Qualidade ambiental - Teses. 2. Escoamento superficial - Teses. 3.  
            Bacias hidrográficas - Teses. 4. Ciclo hidrológico - Teses. I. Carvalho,  
            Hudson de Paula. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de  
            Pós-Graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 574

---

LILIANA BATISTA PARREIRA SILVEIRA

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA  
PARCIALMENTE URBANIZADA EM UBERLÂNDIA - MG

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 18 de novembro de 2016.

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi

UFU

Prof. Dr. Júlio César Neves dos Santos

IFTM

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho

(Orientador)

UBERLÂNDIA

MINAS GERAIS – BRASIL

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Hudson de Paula Carvalho, pela sua orientação, apoio, disponibilidade, pelo saber que transmitiu, pelas opiniões e críticas, colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho e por todas as palavras de incentivo.

A Márcia Batistela, por toda colaboração no trabalho em campo e no laboratório, pela disponibilidade, simpatia e conselhos.

Aos meus colegas do laboratório que participaram diretamente deste trabalho e me ajudaram em todos os momentos.

Aos meus pais, pelo carinho, paciência e incentivo, vocês me darem força em tudo que precisei.

A minha irmã, por todo o apoio, conselhos e por sempre acreditar em mim.

Aos amigos que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

A secretária do Programa de Pós-graduação Marília, pela disponibilidade em resolver os problemas.

Ao meu namorado, ouvinte atento de algumas dúvidas, inquietações, desânimos e sucessos, pelo apoio, confiança e compreensão.

A minha amiga Evelise, pelo apoio e amizade, que mesmo distante sempre esteve ao meu lado.

As amigas Léia, Carol, Bia e Mirian, que sempre incentivaram e apoiaram nos momentos difíceis.

A todos que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Bacias hidrográficas.....	4
2.2 Precipitação da bacia hidrográfica .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3 Escoamento superficial .....	6
2.4 Vazão da bacia hidrográfica .....	8
2.5 Tempo de concentração em bacias hidrográficas .....	9
2.5.1 Avaliações das equações .....	12
2.6 Hidrograma unitário.....	13
2.7 SCS - Soil Conservation Service .....	14
2.8 Coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) .....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Área de estudo .....	17
3.2 Material cartográfico e imagem de satélite.....	18
3.3 Calibração do sensor de medida do nível de água do Córrego Glória.....	19
3.4 Instalação do sensor de nível de água na seção de controle .....	20
3.5 Obtenção da curva chave na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	23
3.6 Dados pluviométricos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	24
3.7 Estimativa do escoamento superficial.....	25
3.8 Determinação da precipitação efetiva.....	28
3.9 Estimativa do tempo de concentração por meio de hidrogramas .....	30
3.10 Equações empíricas para estimativa do tempo de concentração.....	31
3.10.1 Equação de Carter.....	31
3.10.2 Equação de Corps Engineers .....	31
3.10.3 Equação de Desbordes.....	32
3.10.4 Equação de DNOS.....	32
3.10.5 Equação de Dooge.....	32
3.10.6 Equação de Eagleson .....	33

3.10.7	Equação de FAA.....	33
3.10.8	Equação de George Ribeiro.....	33
3.10.9	Equação de Giandotti.....	34
3.10.10	Equação de Izzard.....	34
3.10.11	Equação de Johnstone.....	34
3.10.12	Equação de Kerby-Hathaway.....	35
3.10.13	Equação de Kirpich.....	35
3.10.14	Equação de McCuen.....	35
3.10.15	Equação de Onda Cinemática.....	35
3.10.16	Equação de Pasini.....	36
3.10.17	Equação de Picking.....	36
3.10.18	Equação de Schaaake et al.....	36
3.10.19	Equação de SCS Lag.....	37
3.10.20	Equação de Simas-Hawkins.....	37
3.10.21	Equação de Ven te Chow.....	37
3.10.22	Equação de Ventura.....	38
3.11	Parâmetros utilizados nas equações empíricas.....	38
3.12	Análise estatística.....	42
3.13	Equação empírica para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Curva chave do Córrego Glória.....	45
4.2	Hidrogramas obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	46
4.3	Resultados do tempo de concentração utilizando hidrogramas.....	54
4.4	Resultados do tempo de concentração utilizando as equações empíricas.....	56
4.5	Ajuste de uma equação para estimativa do tc na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	62
5	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, com as estações pluviométrica e fluviométrica .....	17
Figura 2 - Mapa ilustrando o uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, no ano de 2015.....	18
Figura 3 - Sensor utilizado no monitoramento do nível de água do Córrego Glória .....	19
Figura 4 - Figura A: representa o simulador de nível de água. Figura B: detalhe da régua linimétrica. Figura C: detalhe da conexão da mangueira com o tubo. Figura D: detalhe do datalogger conectado ao computador.....	20
Figura 5 - Imagem da seção de controle do Córrego Glória, ilustrando o tubo de PVC onde o linígrafo foi instalado (a direita) e a vigota de madeira onde a régua linimétrica será instalada (a esquerda).....	21
Figura 6 - Imagens ilustrando o tubo de PVC fixo na margem do córrego (A); e o tubo de PVC com a manta de drenagem envolvida na parte submersa do mesmo (B) .....	21
Figura 7 - Imagens ilustrando a mangueira corrugada (A), a caixa selada (B) e o posicionamento do data logger na caixa de proteção selada (C).....	22
Figura 8 - Estação linimétrica instalada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	22
Figura 9 - Detalhamento da divisão da calha do córrego adotada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, para a obtenção da vazão .....	23
Figura 10 - Estação meteorológica do instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	25
Figura 11 - Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013) .....	26
Figura 12 - Imagem ilustrando a definição do tempo de concentração (tc) por meio de um hidrograma.....	30
Figura 14 - Curva chave do Córrego Glória. As letras Q e h representam, respectivamente, a vazão e a cota .....	45
Figura 15 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 31/10/2015 .....	48
Figura 16 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 03/11/2015 .....	48
Figura 17 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 07/11/2015 .....	49

Figura 18 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 06/12/2015 .....	49
Figura 19 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 18/12/2015 .....	50
Figura 20 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 20/12/2015 .....	50
Figura 21 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 26/12/2015 .....	51
Figura 22 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 28/12/2015 .....	51
Figura 23 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 04/01/2016 .....	52
Figura 24 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 19/01/2016 .....	52
Figura 25 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 09/02/2016 .....	53
Figura 26 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 29/02/2016 .....	53
Figura 27 - Resultado das estimativas de tc pela Equação 40 frente ao resultado teórico perfeito .....	64
Figura 28 - Resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) aplicado ao modelo de regressão proposto neste trabalho, para a estimativa do tc na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de vazão e cota obtidos na seção de controle da Bacia hidrográfica Experimental do Córrego Glória, nas campanhas de obtenção da curva chave .....	24
Tabela 2 - Parâmetros fixos utilizados nas equações empíricas, suas unidades e magnitudes, bem como a forma/local de obtenção dos mesmos .....	39
Tabela 3 - Tipos de coberturas e grupos de solos verificados na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	41
Tabela 4 - Horário relativo ao fim da chuva efetiva e ao ponto C, bem como a duração do tempo de concentração (tc) e precipitação total (Pt), de 12 hidrogramas obtidos neste trabalho .....	46
Tabela 5 - Resultados dos tempos de concentração (tc), das precipitações total (Pt) e efetiva (Pef) e dos tempos de duração das precipitações total (tPt) e efetiva (tPef), obtidas na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, no período de 31/10/2015 a 29/02/2016 .....	54
Tabela 6 - Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas explicitadas nas Equações 12 a 33, e respectivos erros em relação ao tempo de concentração médio obtido em doze hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	57
Tabela 7 - Valores de tempo de concentração (tc) e intensidade da precipitação (i) obtidos em cada hidrograma, bem como os tempos de concentração estimados pelas equações de Izzard, Onda Cinemática e McCuen, com os respectivos erros absoluto e relativo do tc estimado em relação ao tc do hidrograma .....	61
Tabela 8 - Resumo dos resultados estatísticos da equação do tc ajustada para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego do Glória .....	63
Tabela 9 - Tempos de concentração observados (tc <sub>obs</sub> ) em cinco hidrogramas e tempos de concentração estimados pela Equação 40 (tc <sub>est</sub> ), na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória .....	65

## RESUMO

SILVEIRA, L.B.P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG.** 86f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>, 2016.

O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle, sendo muito útil para visualizar a resposta hidrológica. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo estimar o tempo de concentração da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em Uberlândia-MG, que possui uma área de 8,27 km<sup>2</sup>, por meio de hidrogramas. Além disso, objetivou comparar os valores de tempo de concentração observados nos hidrogramas com aqueles estimados por métodos empíricos. Por fim, este trabalho buscou também elaborar um modelo matemático capaz de estimar o tempo de concentração para a bacia em questão, a partir de variáveis hidrológicas relacionadas com a chuva. Neste estudo, o tempo de concentração foi estimado a partir de doze hidrogramas obtidos na bacia hidrográfica estudada, de um total de dezessete, a partir de um bloco único de chuva excedente. Após isso, foram determinadas as inflexões nos trechos ascendentes e descendentes dos hidrogramas com base nos valores de vazão. O tempo decorrido entre o final da chuva efetiva e a inflexão descendente foi considerado como tempo de concentração. Após obtido o tempo de concentração nos diversos eventos de precipitação, tais valores foram comparados com 22 métodos empíricos descritos na literatura para estimativa do tempo de concentração. A determinação do tempo de concentração por meio de fórmulas empíricas está sujeita às imprecisões e incertezas que se devem ao tipo de escoamento que a cada fórmula procura representar e ao local onde a mesma foi desenvolvida. Nesse sentido, buscou-se modelar uma equação matemática que melhor estimasse o tempo de concentração para a bacia hidrográfica em estudo. Os resultados indicam que o tempo de concentração médio da bacia foi de 172 minutos. A equação empírica para estimativa do tempo de concentração que apresentou melhor resultado foi a SCS Lag, nos casos onde não se dispõe de dados de intensidade de chuva. Quando esta variável está disponível, recomenda-se o uso da equação da Onda Cinemática. A equação para estimativa do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória mostrou-se consistente e com boa precisão, obtendo 0,76 e 0,88 para os coeficientes de determinação e de Nash-Sutcliffe, respectivamente.

**Palavras-chave:** hidrograma, modelagem hidrológica, escoamento superficial.

<sup>1</sup> Orientador: Hudson de Paula Carvalho – UFU

## ABSTRACT

SILVEIRA, L.B.P. **Time of concentration in small watershed partially urbanized in Uberlândia - MG**. 86f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>, 2016.

The time of concentration is defined as the time required for the entire area of the watershed contribute to the surface runoff in a checkpoint, being very useful to visualize the hydrological response. Therefore, the present study was objective to estimate the time of concentration the Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em Uberlândia-MG, which has an area of 8,27 km<sup>2</sup>, by means of hydrograph. In addition, the objective of this study was to compare the values time of concentration observed in hydrographs with those estimated by empirical methods. Finally, this work also sought to model a mathematical equation capable of estimating the time of concentration for the basin in question, based on hydrological variables related to rainfall. In this study, time of concentration was estimated from twelve hydrograph obtained in the watershed studied, out of a total of seventeen, from a single block excess rainfall. After this, were determined inflections in parts ascending and descending of the hydrographs based on the flow. The time elapsed between the end of the effective rainfall and inflections descending was considered as time of concentration. After obtaining the time of concentration in the various precipitation events. Such values were compared with 22 empirical methods described in the literature for estimating the time of concentration. The determination of the time of concentration by means of empirical formulas is subject to the inaccuracies and uncertainties that are due to the type of runoff that each formula seeks to represent and to the place where it was developed. In this sense, we tried to model a mathematical equation that best estimates the concentration time for the watershed in study. The results showed that the mean basin time of concentration was 172 minutes. The equation for estimating the time of concentration that presented the best result was SCS Lag, in cases where rain intensity data are not available. When this variable is available, it is recommended to use the Kinematic Wave Equation. The equation for estimating time of concentration Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória showed up consistent and with good precision, getting 0,76 and 0,88 for the determination coefficients and Nash-Sutcliffe, respectively.

**Keywords:** hydrograph, hydrology modeling, surface runoff.

<sup>1</sup> Adviser: Hudson de Paula Carvalho – UFU

## INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é usualmente definida como a área na qual ocorre a captação de água para um rio principal e seus afluentes, a partir de limites geográficos conhecidos como divisores de água com direcionamento do fluxo para a seção de controle.

Um dos processos hidrológicos mais importantes que ocorrem em uma bacia hidrográfica é a vazão, que no rio pode ser separada em porções de acordo com o percurso que descreve para chegar ao rio. Os componentes da vazão podem ser classificados em escoamento superficial, escoamento subsuperficial e escoamento subterrâneo. O estudo dos mecanismos de geração de escoamento consiste na compreensão qualitativa e quantitativa de cada componente da vazão.

Para descrever a ocorrência do escoamento superficial como fase do ciclo hidrológico é necessário levar em consideração alguns fatores, como por exemplo o tipo de solo, as depressões do terreno, tipo de vegetação, impermeabilização da área, entre outros. Quando uma chuva atinge a bacia hidrográfica, parte da água ficará interceptada nas depressões do terreno, parte se infiltra e o restante escoar pela superfície do terreno. Entretanto, isso acontece após a intensidade da precipitação superar a capacidade de infiltração da água no solo e de serem preenchidas as depressões da superfície do mesmo pela água da chuva.

O escoamento superficial é o fator determinante para o tempo de concentração ( $t_c$ ), pois  $t_c$  é o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle. Os fatores que influenciam o tempo de concentração de uma dada bacia são: a forma da bacia, a sua declividade média, a sinuosidade e a declividade do seu curso principal, entre outros.

Wong (2005) definiu como tempo de concentração “medido” o intervalo do fim da chuva efetiva até o momento que o hidrograma chega a 95% do escoamento de equilíbrio. Mc Cuen et al. (1984), definem como o tempo necessário para uma gota d’água caminhar superficialmente do ponto mais distante (em percurso hidráulico) da bacia até seu exutório.

Há diversas fórmulas para estimar o tempo de concentração, a grande maioria leva em conta apenas a declividade do curso principal e a área da bacia. A determinação do tempo de concentração por meio de fórmulas empíricas está sujeita às imprecisões e incertezas que se devem ao tipo de escoamento que a fórmula procura representar e ao local onde a mesma foi desenvolvida.

Em geral, praticamente qualquer análise hidrológica precisa de pelo menos um parâmetro de tempo de resposta da bacia, e na maioria das vezes esse parâmetro é o tempo de concentração. São várias as aplicações do tempo de concentração, como, por exemplo: implementação de sistemas de alerta contra inundações, projetos de drenagem urbana, separação do hidrograma, definição do intervalo de monitoramento hidrológico, entre outros.

As ações humanas podem alterar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, uma vez que, interferências no meio natural resultam por consequências, em alterações no ciclo hidrológico. Além disso, essas modificações causam uma crescente perda ambiental, trazendo prejuízos para a sociedade e para o meio ambiente.

Essas alterações também estão presentes no Município de Uberlândia na região Triângulo Mineiro, em Minas Gerais. Esta região é dominada pelo bioma Cerrado, o qual vem sofrendo profundas alterações, devido à agricultura e pecuária intensivas. Tais alterações podem se dar pela simples rotação de culturas, comumente verificado na agricultura moderna, até a urbanização, onde a infiltração da água da chuva no solo é afetada. Diante disso, o efeito dessas transformações é notado nos eventos hidrológicos extremos, como estiagens prolongadas, inundações, transporte de sedimentos, assoreamentos e contaminação de rios. Esses eventos causam muitos prejuízos à sociedade brasileira todos os anos.

Atualmente, a vegetação existente às margens dos rios ou próximos a eles nos espaços urbanos, são amplamente degradados devido à falta de planejamento das cidades. A bacia hidrográfica pode ser urbana, rural ou mista; a urbana está localizada em uma área com ocupação urbana, por isso é mais impermeabilizada, impedindo a infiltração da água no solo. A bacia rural, possui uso e ocupação totalmente rural, permitindo a infiltração da água no solo. E por fim, a bacia mista, possui uma área urbanizada e outra rural.

Assim, a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória é considerada mista, pois uma parte dela é de uso urbano e outra é rural, com pastagem para criação de gado e agricultura para produção de grãos, apresentando muita interferência antrópica. É importante realizar estudos de tempo de concentração, a partir de monitoramento hidrológico, afim de compreender os mecanismos de resposta da bacia hidrográfica.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo estimar o tempo de concentração da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em Uberlândia-MG, que possui uma área de 8,27 km<sup>2</sup>, por meio de hidrogramas. Além disso, objetivou-se, comparar os valores de tempo de concentração observados nos hidrogramas com

aqueles estimados por métodos empíricos. Por fim, este trabalho buscou também elaborar um modelo matemático capaz de estimar o tempo de concentração para a bacia em questão, a partir de variáveis hidrológicas relacionadas com a chuva.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Bacias hidrográficas**

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997).

Dessa forma, pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitada e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente no solo (TUCCI, 2009).

Sob o território das bacias hidrográficas antropizadas, além de vestígios da vegetação nativas, encontram-se cidades, áreas industriais e agrícolas, pastagens, entre outras coberturas e atividades. Dessa forma, qualquer ação causa impacto na bacia hidrográfica.

Em 1997 entrou em vigor a Lei nº 9.433 criando a Política Nacional de Recursos Hídricos, a qual trouxe o arcabouço legal para a gestão das bacias hidrográficas. Porém, existem dificuldades em lidar com todas as bacias, pois a gestão é compartilhada com a administração pública, instituições privadas, empresas de atividades agrícolas, órgãos públicos, entre outros. Além disso, o recorte geográfico de todas as bacias é bastante amplo, e cada região possui interesses distintos, dificultando ainda mais a gestão.

Desse modo, para fazer uma gestão mais eficiente, é necessário o monitoramento hidrológico das bacias, assim a bacia experimental tem uma importante contribuição para esses estudos. Hewlett et al. (1969) esclarecem sobre a definição de bacia experimental. Segundo esses autores, a bacia experimental é o local onde experimentos planejados são ou serão realizados e os resultados de observações de vazão, precipitação e outras variáveis hidrológicas são constantemente analisadas. Então, pequenas bacias monitoradas por um período de tempo e que tem as séries de dados analisadas posteriormente podem ser ditas bacias experimentais.

Segundo Farrell (1995) os estudos realizados em bacias experimentais produzem muitos benefícios a ciência e a sociedade. Porém, ainda há falhas nos monitoramentos hidrológicos e muitos desafios para serem resolvidos.

## 2.2 Precipitação na bacia hidrográfica

A precipitação refere-se a uma expressão quantitativa do ciclo hidrológico, em uma área específica em determinado período de tempo. No entanto, a sua distribuição apresenta uma expressiva variabilidade temporal e espacial e por isso, de acordo com Mol (2005) “torna-se difícil a sua identificação e quantificação”. Neste sentido, a inferência das lâminas precipitadas é diretamente dependente da rede coletora de dados, ou seja, da densidade e distribuição dos postos de monitoramento. Assim, quanto maior o número de pontos de monitoramento, melhor será a compreensão espaço-temporal do fenômeno (BORGES, et. al., 2012).

Entretanto, no Brasil, a rede de monitoramento de precipitação ainda apresenta uma série de dificuldades, (TUCCI, 2009), como por exemplo a baixa densidade de postos pluviométricos, falhas nas coletas de dados pluviométricos, pouco investimento financeiro para realizar o monitoramento, entre outros.

A disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial. A determinação da intensidade da precipitação é importante para o controle de inundação e a erosão do solo (TUCCI, 2009).

O pluviômetro é o instrumento utilizado para a medição da altura total de água precipitada, ou seja, a lâmina acumulada durante a precipitação, sendo que seus registros são sempre fornecidos em milímetros por dia ou em milímetros por chuva. Já o pluviógrafo, registra a intensidade de precipitação, ou seja, a variação da altura de chuva com o tempo. Este aparelho registra, simultaneamente, a quantidade e a duração da precipitação.

A diferença entre o pluviômetro e o pluviógrafo está em que o primeiro, apenas possibilita a leitura da lâmina acumulada (mm), em relação a um período de tempo, não sendo possível a estimativa da intensidade de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ). Sendo esta apenas capaz de ser mensurada, por meio do uso de aparelhos pluviógrafos, devido ao registro das alturas precipitadas em faixas de tempo pré-conhecidas (BORGES; et. al., 2012).

A precipitação efetiva é considerada como sendo constituída por um número infinito de pequenas gotas, de tamanho uniforme e sem interação, que caem instantaneamente e homogeneamente ao longo de toda a região (BHADRA et al., 2008 apud Pereira et al. 2016).

Vários fatores influenciam na porção efetiva da precipitação total, os quais podem atuar isoladamente ou interagindo com outros. Qualquer fator que afete a infiltração, o

escoamento superficial ou a evapotranspiração, tem influência no valor da precipitação efetiva (SAMPAIO, et al., 2000).

Sendo assim, a precipitação efetiva é a medida da altura da parcela da chuva caída que provoca o escoamento superficial. É normalmente referida a um determinado intervalo de tempo de duração da chuva.

### **2.3 Escoamento superficial**

O escoamento superficial é uma das fases do ciclo hidrológico e seu estudo é de grande importância para o dimensionamento de obras de engenharia e manejo agrícola. Sua quantificação é uma tarefa complexa e dependente de vários fatores tais como: topográfico; regime, distribuição e intensidade das chuvas; tipo e cobertura do solo; entre outros (SARTORI, et al, 2005).

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

O processo de infiltração é muito complexo, mesmo quando é assumido que o solo é um meio homogêneo com conteúdo inicial de umidade uniforme. Para muitos eventos de precipitação existe um período inicial durante o qual toda a precipitação se infiltra no solo. Durante este período e como a água vai se infiltrando no solo, a capacidade de infiltração decresce, até tornar-se menor que a intensidade de precipitação. A partir deste momento, a água começa a acumular-se sobre a superfície do solo e o escoamento superficial pode ocorrer (PRUSKI, et. al, 2001). Por isso, a estimativa do escoamento superficial é uma tarefa complexa e dependente de vários fatores, os quais são usados como parâmetros ou variáveis em modelos de chuva-vazão.

A separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo é um procedimento que permite a compreensão da magnitude e da dinâmica da descarga de águas subterrâneas e dos processos de escoamento superficial direto em bacias hidrográficas (FUREY & GUPTA, 2001; BRODIE & HOSTETLER, 2005). Permite também a análise da influência de diversos fatores sobre o escoamento subterrâneo e sobre o escoamento superficial direto. Como, por exemplo, a análise da influência da adoção de práticas para a conservação de água e de solo na redução dos picos de vazão e no aumento das vazões mínimas em períodos de estiagem (HUANG & ZHANG, 2004).

Existem vários métodos para calcular o escoamento superficial. Esses métodos muitas vezes são utilizados como provedores dos dados observados de escoamento superficial direto e subterrâneo, utilizados, inclusive, na calibração e validação de modelos hidrológicos. No entanto, a aplicação para as condições brasileiras de métodos desenvolvidos em outros países não é tão simples, sendo necessária a avaliação do desempenho destas metodologias para as condições específicas onde elas serão aplicadas (AMORIM, et al., 2010).

Miranda et al. (2014), avaliou três métodos, desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979), para separar o escoamento superficial do subterrâneo. Os métodos testados foram o do Intervalo Fixo (IF), o método do Intervalo Móvel (IM) e o método do Mínimo Local (ML). Estes métodos de separação produzem resultados com boa aproximação dos resultados obtidos com processos manuais de separação (SLOTO & CROUSE, 1996) e com o método dos traçadores (GONZALES, et al., 2009).

De acordo com o trabalho de Miranda et al (2014), os valores de volume de escoamento superficial direto ( $V_{ES}$ ) e o volume de escoamento superficial direto total anual ( $V_{ESa}$ ) estimados pelo método IM podem ser considerados semelhantes aos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  estimados pelo método ML, considerando as duas áreas distintas. Os métodos IF e ML apresentam boa concordância entre si com relação às estimativas dos valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  ao mesmo tempo em que o método ML possui boa eficiência na estimativa de valores de  $V_{ES}$  e de  $V_{ESa}$  semelhantes aos valores estimados pelo método IF. Segundo os autores, os três métodos obtiveram resultados semelhantes.

Nessa linha de pesquisa, Mello e Silva (2013) destacam três metodologias para determinar o escoamento superficial, a primeira considera linearidade do escoamento base entre A e C, com alterações proporcionais a inclinação da reta AC, sendo o ponto A a ascensão do hidrograma e o ponto C a recessão. A segunda, o escoamento base é considerado linear, porém, sua obtenção é realizada prolongando-o a partir da inflexão C, sendo assim o escoamento superficial pode ser subestimado. E por último, a terceira metodologia, o prolongamento do escoamento base é realizado a partir da inflexão A até encontrar o ponto D e daí para a inflexão C, o que pode superestimar o deflúvio.

No Brasil, ainda são poucos os estudos que tratam da separação do escoamento superficial direto do subterrâneo pela análise dos hidrogramas (MENEGASSE et al., 2002; IGAM, 2005).

## 2.4 Vazão da bacia hidrográfica

É inegável a importância da previsão de vazões na operação contínua de sistemas de recursos hídricos destinados ao controle de cheias, seja no desenvolvimento e projeto de obras hidráulicas (canais, diques, reservatórios) como no planejamento e implantação de medidas não-estruturais (sistema de aviso, seguro enchente, relocação, etc.). As previsões de vazão de curto prazo são usadas com frequência na operação de sistemas de recursos hídricos destinados a múltiplos usos, como por exemplo: controle de cheias, geração de energia elétrica, navegação, etc. (BARBOSA,2001).

Vazão é o volume de água que passa por uma determinada seção em um determinado tempo. O monitoramento da vazão em uma bacia hidrográfica deve ser feito na seção de controle. Para monitorar esse parâmetro, utilizam-se instrumentos de medição, como vertedores, calhas Pashall, estações fluviométricas ou linimétricas entre outros. O comportamento e a variação das vazões em um rio estão associados a variabilidade da precipitação, do escoamento subterrâneo e do escoamento superficial direto (HUANG;ZHANGH,2004 apud MIRANDA, 2014).

As vazões que escoam em um rio incluem o escoamento subterrâneo (referente à contribuição pelos aquíferos), e, em algumas épocas do ano estas vazões incluem também as águas provenientes do escoamento superficial direto (resposta de curto prazo para um evento de chuva), que são aquelas que escoam sobre a superfície do solo (CUSTÓDIO;LLAMAS,1983;TUCCI,2009 apud MIRANDA,2012).

O molinete é o instrumento mais comumente usado para medir a vazão de forma indireta. Por meio deste instrumento mede-se a velocidade da água em uma determinada seção do rio. O produto da velocidade *versus* a área da seção fornece a vazão do rio no ponto onde foram tomadas essas medidas. Após definidas as vazões e as cotas correspondentes, é possível construir a curva-chave.

A curva-chave é utilizada na hidrologia para se obter a relação entre a cota (nível de água do rio) e a vazão em uma dada seção transversal do rio. Para sua construção é necessário utilizar equações matemáticas. Segundo Tucci (2009), a equação matemática mais utilizada segue o modelo proposto na Equação 1.

$$Q = a \cdot (H - H_o)^n \quad [\text{Eq.1}]$$

Onde:

Q = vazão estimada, L<sup>3</sup> T<sup>-1</sup>;

a e n = coeficientes de ajuste para cada curva-chave, adimensional;

H = cota referente a uma vazão Q, L;

H<sub>0</sub> = cota referente à vazão nula, L.

## **2.5 Tempo de concentração em bacias hidrográficas**

O tempo de concentração ( $t_c$ ) é definido por Bruno et al. (2011) como o tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle. Os principais fatores que influenciam o tempo de concentração de uma dada bacia são: a forma da bacia, a sua declividade média, a sinuosidade e a declividade do seu curso principal.

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 hidrográfica até um ponto em consideração. Mc Cuen et al. (1984), definem como o tempo necessário para uma gota d'água caminhar superficialmente do ponto mais distante (em percurso hidráulico) da bacia até seu exutório. Estes últimos autores ainda propõem uma segunda definição, que o  $t_c$  é baseado em um hietograma de chuvas e do hidrograma de escoamento resultante. A partir do hietograma real e do hidrograma, o excesso de chuvas e o escoamento direto são computados. O tempo de concentração é o tempo entre o centro do excesso de chuvas e o ponto de inflexão na recessão do hidrograma de escoamento direto. Assim, o tempo de concentração é calculado como a diferença de tempo entre o final da precipitação efetiva e o ponto de inflexão.

Tucci et al. (2014), afirmam que o tempo de concentração é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia deslocar-se até a seção principal. Eagleson (1970) define como o tempo necessário, utilizado pelo escoamento superficial, para alcançar o equilíbrio. Wong (2005) considera que é o tempo decorrido desde o início do evento de chuva até o momento em que o fluxo de equilíbrio atinge 95%.

Os valores do tempo de concentração podem ser estimados pela análise do hidrograma obtido no monitoramento de uma bacia hidrográfica, desde que sejam definidos os pontos de ascensão e de inflexão. Também existem diversas fórmulas empíricas que determinam o tempo de concentração em função de características físicas da bacia, como a área, a forma, o comprimento do talvegue, a declividade da bacia, o tipo de solo, uso e ocupação do solo, entre outros.

Muitos pesquisadores desenvolveram equações empíricas, utilizando métodos experimentais e analíticos, a fim de estimar o tempo de concentração. As equações

resultaram de estudos realizados em diferentes locais, e ajustados de acordo com as características fisiográficas e hidrológicas de cada bacia hidrográfica estudada. Porém a determinação do tempo de concentração através de fórmulas empíricas está sujeita a imprecisões e incertezas significativas que se devem ao tipo de escoamento que cada fórmula procura representar.

Mc Cuen et al (1984) reconhecem a importância dos parâmetros de tempo de concepção e avaliação hidrológica. Os hidrólogos desenvolveram vários métodos para estimar os diversos parâmetros de tempo, tais como o tempo de concentração, o tempo de pico e o tempo de atraso. Infelizmente, a maioria das fórmulas empíricas têm sido baseados em dados muito limitados, desenvolvidas com base em poucas bacias hidrográficas, com poucos dados, com pouco tempo de estudo do ciclo hidrológico. Deste modo, a sua aplicabilidade é limitada devido as particularidades de cada bacia hidrográfica, como o tamanho, uso e ocupação, tipo de solo, entre outros.

Um método de estimativa empírico deve ser usado com cuidado, seja para bacias hidrográficas com características diferentes daquelas das quais o método foi ajustado, bem como em bacias de outras regiões hidrológicas.

No intuito de ajustar um modelo para estimativa do tempo de concentração local, Mota (2012) conduziu uma pesquisa na bacia hidrográfica do Rio Araponga, município de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina. Esta bacia era composta por vegetação secundária de Floresta Ombrófila Mista. O modelo matemático para a bacia em questão está descrito na Equação 2.

$$t_c = 0,29 \cdot Q_p + 0,08 \cdot API_{21d} - 0,24 \quad [Eq.2]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em horas;

$Q_p$  = Vazão máxima registrada no evento, em L/s;

$API_{21d}$  = Índice de precipitação antecedente de 21 dias, em mm.

Além do modelo matemático, o trabalho de Mota (2012) tinha como objetivo também, comparar o resultado do tempo de concentração dado pela Equação 2, com aqueles calculados por métodos descritos na literatura. De acordo com a autora, as fórmulas existentes subestimaram os valores de  $t_c$ , além de apresentarem erros maiores do que 90% em relação à fórmula proposta. A equação que mais se aproximou do  $t_c$  medido foi a de Izzard.

Outro trabalho realizado no Brasil, por Almeida et al. (2014) foi em Campo Grande-MS, na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba. Nessa pesquisa o tempo de concentração foi encontrado a partir de hidrogramas obtidos na sub-bacia em questão. Os resultados do  $t_c$  foram comparados com as equações existentes na literatura. Os autores verificaram que o valor do tempo de concentração estimado pela equação de Pasini apresentou a maior diferença percentual, evidenciando que, dentre os métodos analisados, é o que mais se distancia do resultado obtido da análise do hidrograma. Por outro lado, o método de Giandotti apresentou a menor diferença percentual, sendo portanto, a mais indicada para a bacia hidrográfica em estudo.

Kobiyama et al. (2006) utilizaram a bacia hidrográfica do campus da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) para a análise comparativa preliminar entre os  $t_c$ 's calculados em 5 eventos de chuva, e aqueles calculados com 5 fórmulas descritas na literatura. Ao calcular os erros entre a média de  $t_c$  medido e os calculados pelas fórmulas, os autores observaram que eles variaram entre 12 e 72%. A pior estimativa foi dada pela fórmula de Dooge, a qual superestimou o valor de  $t_c$ . Por outro lado, o melhor desempenho foi dado pela equação proposta por McCuen et al. (1984).

Pórem, um detalhe importante e necessário de ser relatado é que Kobiyama et al. (2006) consideraram no cálculo do tempo de concentração o tempo entre o final da chuva total até o ponto C, e não a chuva efetiva. Além disso, os autores analisaram poucos eventos (5 hidrogramas). Esses fatos podem prejudicar os resultados, como os próprios autores reconhecem.

Ainda nessa linha de estudo, Silveira (2005) avaliou o desempenho de vinte e três equações para estimativa do tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Como resultados, recomendou as equações de Ven Te Chow e Kirpich para as bacias rurais devido aos melhores resultados apresentados. No caso de bacias urbanas, as fórmulas com melhor desempenho mostraram uma faixa de erro maior do que as correspondentes em bacias rurais, porém para bacias urbanas com áreas abaixo de 70 hectares a fórmula de Schaake é a mais indicada.

Os artigos que detalham os modelos de tempo de concentração são muito antigos, dificultando o acesso aos documentos originais. Assim, muita informação acaba sendo perdida. Essas observações também foram feitas por Mota (2012) e Silveira (2005).

Sobre a fórmula da Federal Aviation Agency (FAA) (EUA) é difícil encontrar alguma informação experimental, exceto que ela foi desenvolvida em laboratório e seu objetivo era para drenagem de aeroportos (McCUEN, et al, 1984). Já as fórmulas de

Giandotti, Pasini, Ventura, Picking, DNOS e George Ribeiro existem poucas informações sobre como foram desenvolvidas.

Existem duas equações de Kirpich (McCUEN, et al, 1984), mas aquela de utilização muito comum no Brasil é a que foi obtida para o estado do Tennessee (EUA) com dados de apenas sete bacias hidrográficas rurais, as quais apresentavam área entre 0,0051 e 0,4533 km<sup>2</sup> (KIBLER, 1982). Quando extrapola-se sua aplicação para bacias maiores é de se esperar obter tempos de concentração menores que os reais (SILVEIRA, 2005).

A equação do SCS lag foi obtida a partir de estudos de pequenas bacias rurais americanas com até 8 km<sup>2</sup>. Portanto, seu resultado retrata o escoamento de bacias não urbanizadas. Essa equação utiliza o parâmetro da curva-número, que considera o tipo de solo, aumentando, portanto, as chances do resultado retratar o tc real da bacia hidrográfica.

A equação do tempo de concentração de Dooge, baseada em dados de dez bacias rurais da Irlanda, com áreas entre 140 e 930 km<sup>2</sup>, deve refletir melhor o tempo de concentração em bacias onde predomina o escoamento em canais (PORTO, 1995 apud SILVEIRA, 2005).

Numa faixa mais estendida de bacias (65 a 4.200 km<sup>2</sup>) tem-se a equação de Johnstone, resultado do estudo em 19 bacias americanas (USDA, 1973). Além desse modelo, pode-se citar também a fórmula do Corps of Engineers do exército americano, a qual é originária de uma faixa ainda mais ampla de bacias rurais (até 12.000 km<sup>2</sup> aproximadamente) (MOPU, 1987). As equações de Johnstone e do Corps of Engineers deveriam refletir efeitos de armazenamento importantes, porque estão baseadas em dados de bacias de grande porte. Nesse sentido, poderiam superestimar os tempos de concentração quando aplicadas a bacias menores (SILVEIRA, 2005).

Nota-se que a fórmula de Kirpich (1940) é uma das mais conhecidas e empregadas nas estimativas de tc, e seus resultados, em geral, apresentam-se subestimados (SILVA et al., 2008; McCUEN et al., 1984; LOUKAS & QUICK, 1996; apud SILVEIRA, 2005).

### **2.5.1 Avaliações das equações**

As equações para determinar o tempo de concentração foram desenvolvidas para práticas de engenharia, por isso são empíricas, obtidas com poucas informações.

As variáveis que aparecem nas fórmulas referem-se basicamente a:

- Tamanho da bacia: utiliza-se o comprimento do talvegue principal (L) e a área da bacia (A);
- Declividade: utilizada a declividade do talvegue principal (S);
- Rugosidade ou resistência ao escoamento: são os parâmetros de rugosidade, como o n de Manning, a curva número;
- Aporte d'água: a intensidade padrão de chuva.

O uso dessas variáveis explicativas não advém rigorosamente de uma teoria física para o tempo de concentração, mesmo sabendo-se que ele poderia ser explicado por uma razão de distância por velocidade, à distância podendo ser medida em mapas e a velocidade podendo ser referida a equações hidráulicas como as de Manning. Esta base “física” indicaria que o tempo de concentração seria proporcional ao fator  $LS^{-0,5}$ . De fato, a grande maioria das fórmulas utiliza L e S, no entanto, de maneira empírica (SILVEIRA, 2005).

Wong (2005) concluiu que fórmulas que não incluem a intensidade da chuva, só funcionam para uma faixa limitada de valores deste parâmetro, e então apresentam pior desempenho em relação às demais. Mota, 2012, utilizou dados experimentais de parcela de concreto e gramados para testar nove diferentes fórmulas para cálculo de tc. De maneira geral, a fórmula de Chen & Wong (1993) apresentou os melhores resultados tanto para parcela de concreto quanto para os gramados (MOTA, 2012).

Silveira (2005) observou, no Brasil, a carência de indicadores para uma escolha consciente da fórmula mais adequada, e então realizou uma análise de desempenho de algumas fórmulas existentes. Através dessas observações foi possível concluir que nem sempre as características da bacia que originou a fórmula são limitantes para a aplicabilidade das fórmulas, sendo necessários alguns ajustes finais.

## **2.6 Hidrograma unitário**

A teoria do Hidrograma Unitário (HU) foi proposta por Sherman (1932), como uma função-resposta linear da bacia hidrográfica a uma chuva efetiva unitária. Assim, uma chuva efetiva com mesma duração da chuva unitária produzirá um hidrograma com mesmo tempo de base do HU e vazões proporcionais à razão com a chuva unitária. A linearidade propicia também a superposição de efeitos, ou seja, os hidrogramas produzidos por blocos independentes sucessivos de chuva, com duração igual à da chuva unitária, são somados para gerar o hidrograma total (SILVEIRA, 2015).

A determinação do hidrograma de projeto de uma bacia hidrográfica depende de dois componentes principais, a separação do volume de escoamento superficial e a propagação deste volume para jusante. Este último componente dos modelos hidrológicos geralmente utiliza a teoria de sistemas lineares, ou seja, o hidrograma unitário (TUCCI, 2003).

De acordo com Tucci (2003), as limitações do HU para estimativa do escoamento superficial são as seguintes: (a) representação linear do escoamento superficial que tem um comportamento não-linear; (b) distribuição uniforme da precipitação dentro do intervalo de tempo; (c) distribuição espacial uniforme da precipitação; (d) erros nos métodos de separação do escoamento superficial e subterrâneo geram valores hidrológicos equivocados para a determinação do HU. Estas limitações se traduzem em HU diferentes, de acordo com cada evento de chuva (TUCCI, 2003).

Em geral, para obtenção do hidrograma da cheia de projeto, aplica-se um método para cálculo da precipitação efetiva seguido de uma função de transferência, também denominada hidrograma unitário, que permite a distribuição temporal do volume total de chuva efetiva (CUNHA, et al., 2015). A determinação do HU é função dos dados observados de chuva e vazão com intervalo de tempo compatível com o tempo de concentração da bacia.

Nesse sentido, o HU representa o hidrograma de escoamento superficial correspondente à precipitação efetiva unitária de intensidade constante e distribuída uniformemente sobre a área de drenagem. É um modelo linear concentrado, utilizado como função de transferência de uma bacia hidrográfica para gerar hidrogramas de cheias correspondentes a chuvas efetivas, de quaisquer magnitudes e durações (PINHEIRO, 2011).

## **2.7 SCS - Soil Conservation Service**

A relação funcional mais empregada para estimação do escoamento superficial em bacias não monitoradas é o método do Número de Curva (CN) desenvolvido pelo U.S. Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS). O método é documentado no National Engineering Handbook (NEH), Part 630: Hydrology e foi publicado pela primeira vez em 1954, sendo então seguido de diversas revisões. Esse modelo chuva-vazão é largamente aceito por sua simplicidade, número limitado de parâmetros e autoridade da instituição de origem (PONCE; HAWKINS, 1996).

A metodologia do SCS reúne os solos dos Estados Unidos em quatro grandes grupos, conforme sua capacidade de infiltração e produção de escoamento, sendo a cada um deles atribuído uma letra, A, B, C e D, nesta mesma ordem, representando o acréscimo do escoamento superficial e consequentemente a diminuição da taxa de infiltração de um grupo para outro (SARTORI, et al., 2005).

De acordo com esses mesmos autores, para se levar em conta outras características do solo, as quais não estão incluídas na definição dos grupos hidrológicos do solo definidos pelo SCS. Porém são importantes do ponto de vista da formação do escoamento superficial, torna-se difícil na prática classificar uma unidade de solo que se enquadra com as suas principais características num dos grupos hidrológicos. Isso induz a maioria dos usuários do método no Brasil a considerar apenas a textura superficial do solo para enquadrá-los em um dos grupos hidrológicos usando a classificação original apresentada pelo SCS (SARTORI, et al., 2005).

O número da curva é um índice que representa a combinação empírica de três fatores: grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente do solo (McCUEN, 1998). Existem tabelas do número CN para bacias hidrográficas rurais e urbanas. Os valores CN obtidos poderão ou não ser corrigidos posteriormente dependendo da situação do solo, muito seco ou úmido.

O número CN descreve uma situação média e útil em determinados projetos. Porém é preciso ter cautela com seu uso, pois a equação não contém o parâmetro de tempo e não leva em consideração a duração da chuva ou a intensidade da mesma. Esse modelo, inicialmente desenvolvido para uso em áreas agrícolas, tem sido objeto de estudo, desenvolvimento e aplicação também em áreas urbanas. Com ele é possível: a) estimar a partir de informações do tipo, uso e umidade antecedente do solo, o número da curva de escoamento superficial (CN) e com este, a parcela da precipitação que resultará em escoamento superficial, ou chuva excedente; b) conhecida a chuva excedente, estimar a distribuição e o volume do escoamento superficial de uma determinada área de drenagem, baseando-se no hidrograma unitário adimensional regionalizado para pequenas bacias dos Estados Unidos (SARTORI, et al., 2005). Apesar das limitações do método CN, ainda é a técnica mais utilizada para determinar os volumes de escoamento.

## 2.8 Coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ )

O processo de validação de modelos hidrológicos depende das aplicações pretendidas, mas, para se obter uma medida da eficácia da simulação nos testes, é conveniente que coeficientes estatísticos sejam utilizados (VIOLA, et al., 2009).

De acordo com Zhang et al. (2007 apud VIOLA et al., 2009) e Legates & McCabe (1999), o valor de  $C_{NS}$  indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, podendo variar de  $-\infty$  a 1. Gotschalk et al. (1999) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente:  $C_{NS} = 1$  corresponde a um ajuste perfeito;  $C_{NS} > 0,75$  o modelo é considerado adequado e bom;  $0,36 < C_{NS} < 0,75$  o modelo é considerado aceitável; entretanto, para Zappa (2002 apud VIOLA et al 2009), valores de  $C_{NS}$  acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação.

Por outro lado, Santhi et al. (2001) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente:  $C_{NS} > 0,65$  o modelo é considerado muito bom;  $0,54 < C_{NS} < 0,65$  o modelo é considerado bom e entre 0,5 e 0,54, satisfatório.

A análise de sensibilidade também é imprescindível para verificar se o modelo está capturando, de forma correta, o comportamento dos processos hidrológicos predominantes na bacia. Com essa análise demonstra-se a proximidade do valor calculado em relação ao valor real do parâmetro hidrológico pesquisado.

Outro aspecto a ser mencionado é que a análise de sensibilidade é extremamente dependente da estatística de precisão utilizada para quantificar a sensibilidade, ou seja, o  $C_{NS}$  certamente sofrerá mais influência de parâmetros vinculados ao escoamento superficial direto (ANDRADE, 2013).

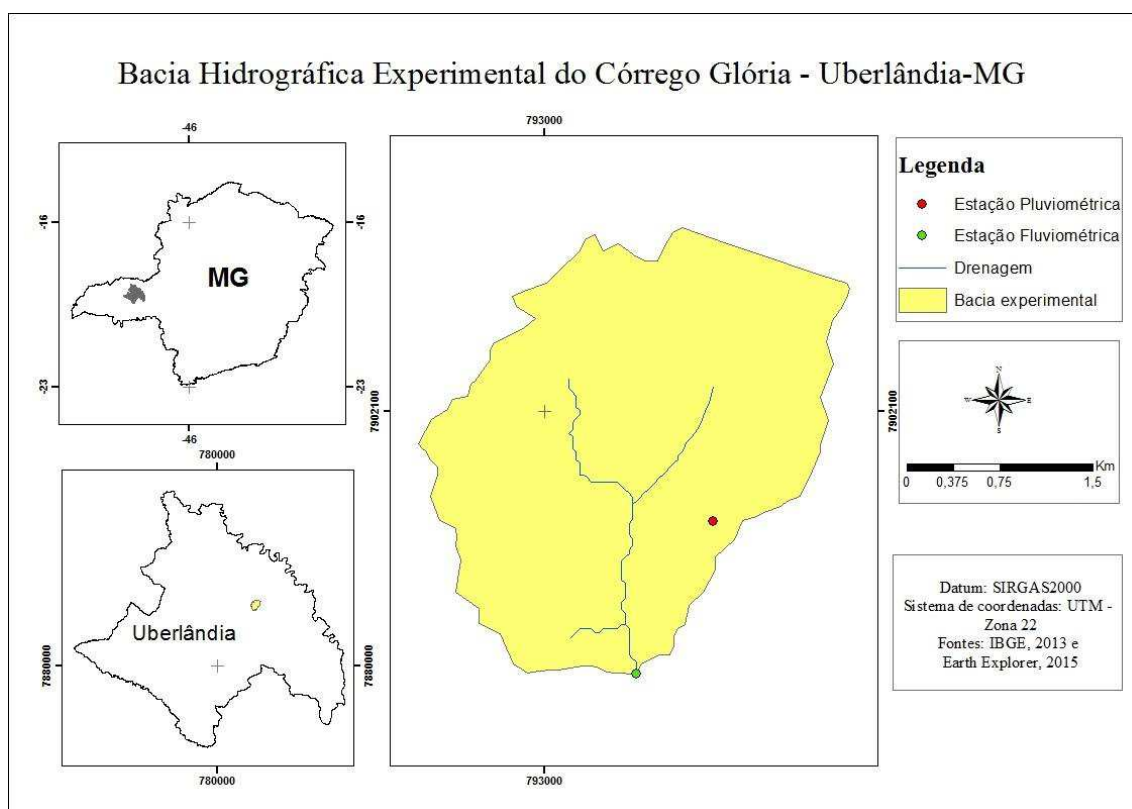
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O local de desenvolvimento deste trabalho foi a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (Figura 1). Localizada geograficamente a nordeste do município de Uberlândia-MG, a bacia em estudo apresenta uma área total de 8,27 km<sup>2</sup>, medida até a seção de controle da bacia. Com uma altitude máxima de 940 metros, o Córrego do Glória é um dos afluentes da margem direita do Rio Uberabinha, um dos principais afluentes do Rio Araguari (OLIVEIRA,2006).

O clima da região é classificado de acordo com Köppen como Aw, verão chuvoso e inverno seco. A temperatura média anual é de 22,3 °C e as precipitações apresentam uma média de 1570 mm, com cerca de 120 dias de chuva por ano. A estação chuvosa tem de cinco a seis meses de duração (OLIVEIRA, 2006).

Figura 1 - Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, com as estações pluviométrica e fluviométrica

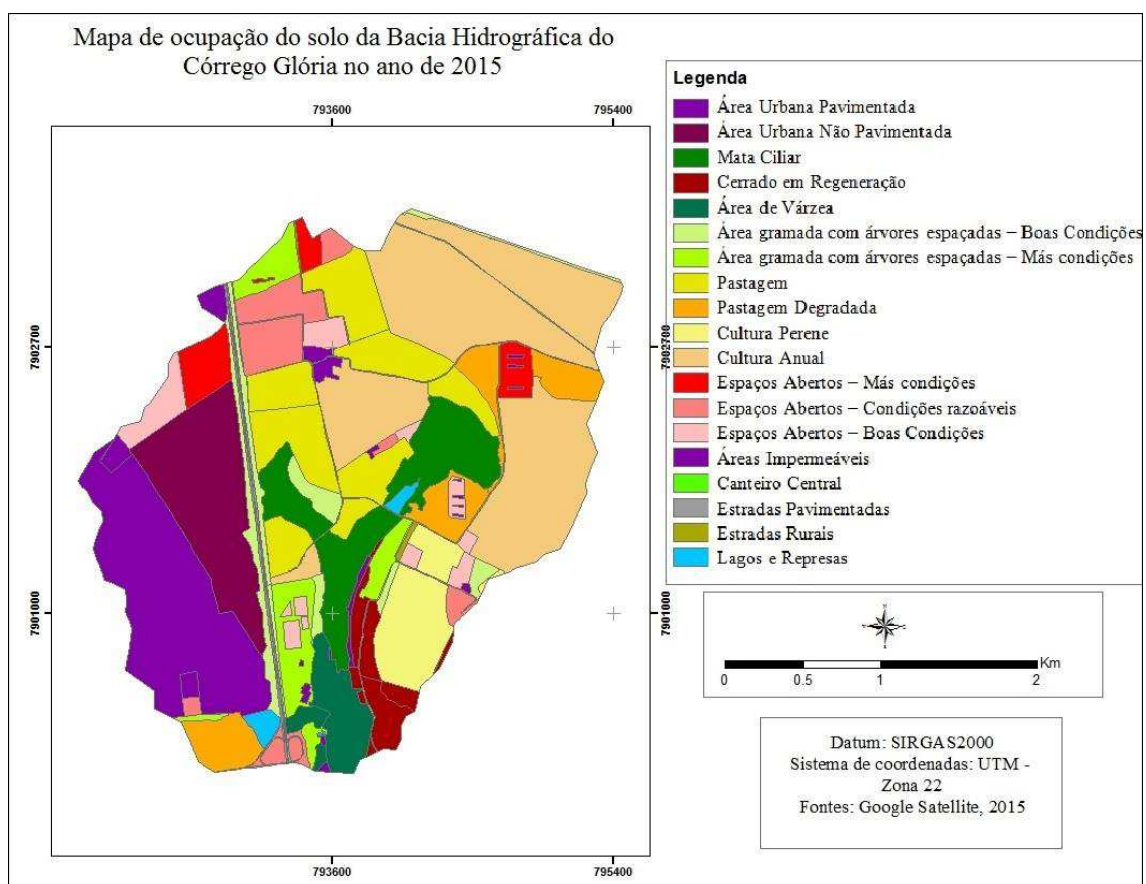


### 3.2 Material cartográfico e imagem de satélite

Para a caracterização do uso e ocupação do solo na bacia foi utilizada imagens multiespectrais de satélite com resolução mínima de 30 m, a partir dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Concomitantemente, foram obtidas verdades de campo, por meio de dispositivos GPS modelo eTrex Vista HCx, as quais possibilitaram a estratificação dos diversos usos do solo. Para a interpolação, e consequentemente a obtenção dessas informações, foi utilizado o software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) Qgis 2.8. Após esses estudos, a área, a elevação e o uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória foi conhecida com maior detalhamento.

Atualmente o uso e ocupação do solo dessa bacia é bastante diversificado, apresentando área urbanizada, área com culturas anuais de milho e soja e também pastagem de *Brachiaria brizanta*, matas de galeria, vegetação rasteira e obras públicas rodoviárias como a BR-050, além de possuir o campus da Universidade Federal de Uberlândia, com instalações de prédios e ruas (Figura 2).

Figura 2 - Mapa ilustrando o uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, no ano de 2015



### 3.3 Calibração do sensor de medida do nível de água do Córrego Glória

O instrumento utilizado para o monitoramento automático do nível da água na seção de controle da bacia experimental foi um transdutor de pressão, marca Keller AG®, modelo DCX-22 AA, do tipo absoluto, com barômetro e coletor de dados (*datalogger*) integrados (Figura 3).

Figura 3 - Sensor utilizado no monitoramento do nível de água do Córrego Glória



No Laboratório de Hidrologia – HIDRO, da Universidade Federal de Uberlândia, foi construído um simulador de nível da água, para conferir a calibração do instrumento e simular diversas situações de elevação e abaixamento do nível de água do córrego. Para realizar esse experimento, utilizou-se dois tubos de PVC, mangueira conectada a uma torneira, régua linimétrica para visualizar a altura da água e o sensor com o *datalogger* que estava inserido dentro do tubo (Figura 4).

Ao ligar a torneira, a água entrava no tubo e o conjunto sensor + *datalogger* registrava a altura. Assim era possível verificar se o equipamento estava registrando a mesma altura observada na régua instalada na parte externa do tubo. Também era possível controlar a velocidade da água, abrindo mais ou menos a torneira e observando o comportamento do instrumento. Essa etapa permitiu verificar o comportamento do conjunto sensor + *datalogger*, bem como todo o processo de programação e extração dos dados coletados antes da instalação no campo.

Figura 4 - Figura A: representa o simulador de nível de água. Figura B: detalhe da régua linimétrica. Figura C: detalhe da conexão da mangueira com o tubo. Figura D: detalhe do datalogger conectado ao computador



### 3.4 Instalação do sensor de nível de água na seção de controle

O local escolhido para a instalação da seção de controle fica a cerca de 1840 metros a montante da represa da Fazenda Experimental do Glória, na latitude  $18^{\circ}58'18.32''$  S e longitude  $48^{\circ}12'36.92''$  O.

Para instalação da estação fluviométrica no Córrego Glória foi escolhido o local que atendeu aos critérios técnicos e de segurança, listados em Tucci et al. (2014) (Figura 5). Para a instalação do linígrafo foram utilizados dois tubos de PVC de 75 milímetros, os quais foram conectados por meio de uma curva (joelho) de  $90^{\circ}$ . Um dos tubos ficou submerso no leito do córrego e o outro fixo na parede, como detalhado na Figura 6. No tubo submerso foram feitos orifícios, com auxílio de uma serra copo, para que a água entrasse no tubo e possibilitasse que o linígrafo verificasse variações do nível da água. Em seguida uma manta geotêxtil, própria para drenagem, foi envolvida no tubo perfurado,

com o objetivo de impedir a entrada de sólidos grosseiros como areia e folhas, os quais poderiam alterar os valores lidos pelo linígrafo (Figura 6).

Figura 5 - Imagem da seção de controle do Córrego Glória, ilustrando o tubo de PVC onde o linígrafo foi instalado (a direita) e a vigota de madeira onde a régua linimétrica será instalada (a esquerda)



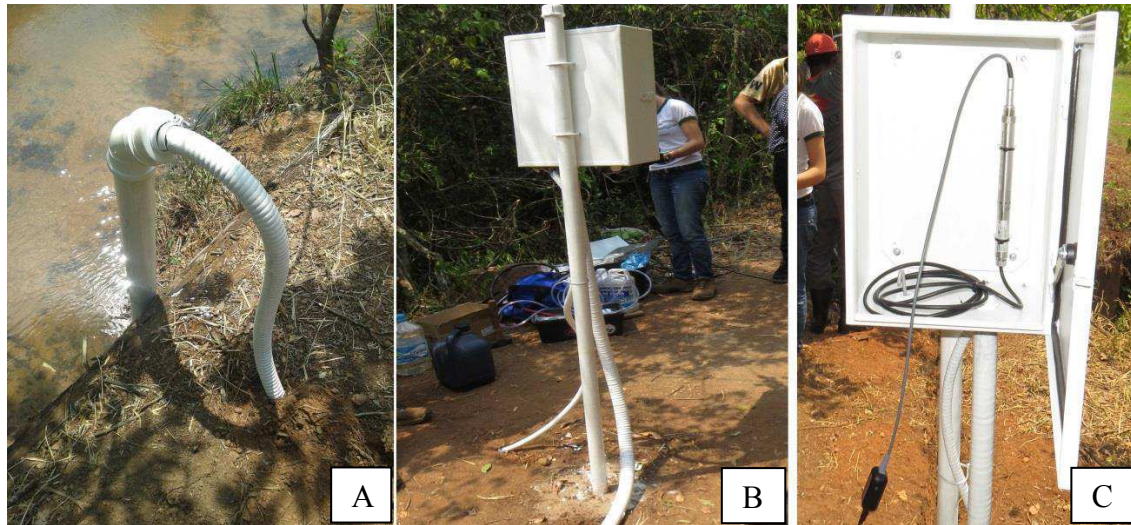
Figura 6 - Imagens ilustrando o tubo de PVC fixo na margem do córrego (A); e o tubo de PVC com a manta de drenagem envolvida na parte submersa do mesmo (B)



Após a fixação do tubo na margem do córrego, o sensor de nível de água foi inserido dentro do mesmo na vertical. Na parte superior do tubo de PVC foi anexada uma redução de modo que uma mangueira corrugada desse acesso até a caixa selada, onde o *datalogger* foi instalado (Figura 7). Essa mangueira corrugada forneceu proteção ao cabo que liga o sensor de nível ao *datalogger*. Neste trabalho, o intervalo de leitura do nível da

água do córrego foi de um segundo, com gravação da média das leituras a cada cinco minutos.

Figura 7 - Imagens ilustrando a mangueira corrugada (A), a caixa selada (B) e o posicionamento do data logger na caixa de proteção selada (C)



A estação linimétrica foi cercada para garantir a segurança do *datalogger*, mantendo-o longe de animais, vandalismo e assim evitando possíveis danos (Figura 8). Como o sensor de nível de água está 7,1 cm acima do fundo do córrego, foi necessário acrescentar essa medida nas mensurações do nível da água. O sensor de nível de água utilizado neste trabalho faz uma leitura de altura de água (em centímetros) a cada segundo e o *datalogger*, foi programado para armazenar uma leitura média a cada 5 minutos.

Figura 8 - Estação linimétrica instalada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



### 3.5 Obtenção da curva chave na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Após a completa instalação do equipamento foram feitas sete medições de velocidade da água com micromolinete fluviométrico MCN-1 da JCTM. As campanhas/mensurações foram feitas em datas distintas (Tabela 1), para a determinação da vazão no Córrego Glória. Para isso, foram obtidas as profundidades em intervalos de 0,2 metros a partir da margem direita do córrego (Figura 9). Nas extremidades da calha, devido à baixa velocidade da água, esta regra não pôde ser seguida, motivo pelo qual se observam na Figura 9 valores como 0,60 m (margem direita) e 0,35 m (margem esquerda). Para cada intervalo de 0,2 metros foram feitas duas medidas de velocidade, sendo uma a 80% e outra a 20% de profundidade, medida a partir da superfície da água. Após a obtenção dos valores de profundidade e velocidade da água em cada trecho do córrego, foi possível calcular a vazão conforme Tucci et al. (2014). Os valores calculados de vazão para o córrego Glória na seção de controle da bacia hidrográfica, bem como a cota correspondente, estão apresentados na Tabela 1.

Figura 9 - Detalhamento da divisão da calha do córrego adotada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, para a obtenção da vazão

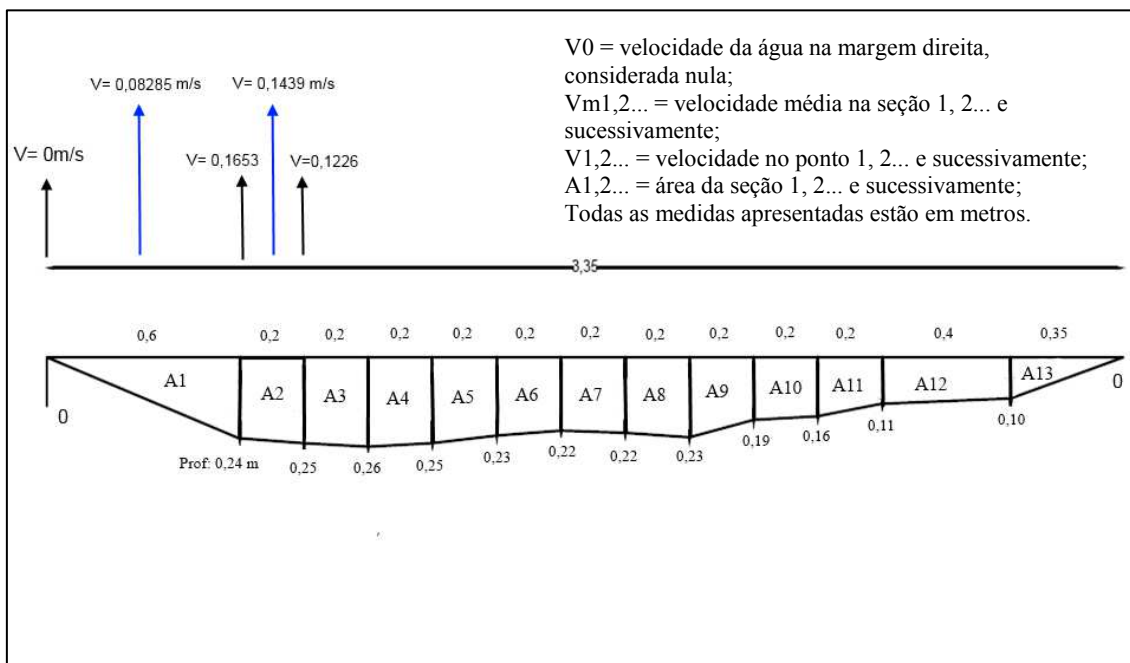


Tabela 1 - Valores de vazão e cota obtidos na seção de controle da Bacia hidrográfica Experimental do Córrego Glória, nas campanhas de obtenção da curva chave

<b>Data</b>	<b>Vazão (L s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Altura (m)</b>
22/10/2015	86,4	0,22
04/11/2015	117,7	0,25
17/11/2015	160,5	0,28
16/12/2015	122,3	0,25
16/02/2016	156,3	0,28
15/03/2016	181,5	0,28
05/04/2016	145,62	0,26

Após obter a vazão da seção de controle, esta foi correlacionada com o nível da água (cota) para a obtenção da curva chave do córrego Glória. A equação da curva chave foi estimada no software SigmaPlot® 12.0. Ainda por meio deste aplicativo computacional, foram calculados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão da estimativa (EPE), o teste F da equação de regressão e o teste t dos coeficientes da equação. Além disso, ainda por meio do citado software, a normalidade dos resíduos do modelo foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilk. Todas estas estatísticas foram calculadas considerando um nível de probabilidade de 5%.

### **3.6 Dados pluviométricos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória**

Os dados de chuva foram coletados na Estação Meteorológica do Setor de Irrigação, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia (Figura 10). Além da chuva, esta monitora também, a temperatura e a umidade relativa do ar, a velocidade e a direção do vento e a radiação solar global. A estação está localizada na latitude 18° 57' 38,11" S e longitude 48° 12' 16,96" O (Figura 1). Para o presente trabalho foi iniciada a captação de dados pluviométricos em intervalos de 5 minutos, a partir do dia 23 de outubro de 2015.

Figura 10 - Estação meteorológica do instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



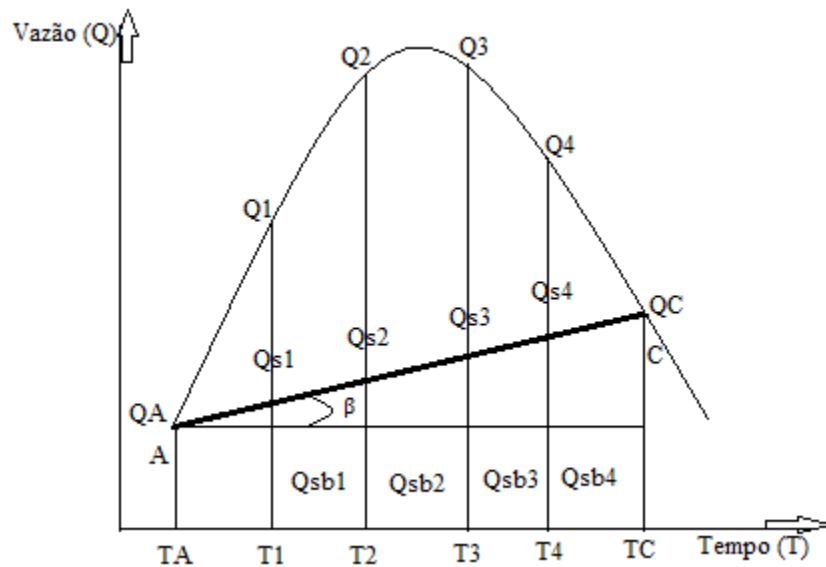
### 3.7 Estimativa do escoamento superficial

A separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo foi feita a partir da determinação, em cada hidrograma, dos pontos A e C. O ponto A é de determinação mais simples, pois corresponde a uma mudança brusca na inclinação da curva de escoamento, ou seja, é onde o hidrograma começa a ter sua ascensão. Por outro lado, o ponto C é mais difícil de ser determinado, pois é onde ocorre a queda do hidrograma, ou seja, a vazão do rio começa a se estabilizar, como pode ser observado na figura 12. Neste trabalho, a obtenção do ponto C foi determinada na planilha de dados de vazão, por meio da divisão da vazão seguinte pela anterior, com o objetivo de encontrar um valor fixo dessa divisão. Quando esse valor era encontrado, adotava-se a vazão e o tempo imediatamente anterior como sendo aquele do ponto C.

O escoamento superficial direto foi obtido por meio da regra dos trapézios, que consiste basicamente em multiplicar a vazão em cada instante pelo intervalo de tempo entre as medições (5 minutos). Consiste em subdividir a área do hidrograma em retângulos, nesse caso específico, retângulos de altura igual a vazão e largura igual ao

intervalo de tempo entre as medições (Figura 11). Essa metodologia está descrita Mello e Silva (2013).

Figura 11 - Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013)



Neste trabalho, para a separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo foi realizada uma aproximação linear entre os pontos A e C, dada pela reta AC. Após isso, foi calculada a inclinação da reta AC por meio da Equação 3.

$$m = \text{tg}(\beta) = \frac{(QC-QA)}{(TC-TA)} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

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

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

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

$TC$  = tempo no ponto C, em segundos;

$TA$  = tempo no ponto A, em segundos.

Após isso, foi calculado o valor a ser adicionado como incremento da vazão, para o intervalo de tempo das vazões (neste trabalho foi considerado 5 min. = 300 segundos), conforme detalhado na Equação 4.

$$J = m \cdot \Delta T \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde:

J = valor a ser incrementado às vazões do escoamento base a partir de QA, em L s<sup>-1</sup>;

ΔT = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, 300 segundos.

Sendo assim, o J será o valor acrescentado às vazões do escoamento base a partir de QA. As vazões subterrâneas foram calculadas a partir de J conforme detalhado na Equação 5.

$$Q_{SB1} = QA + J; Q_{SB2} = Q_{SB1} + J; Q_{SB3} = Q_{SB2} + J \dots \quad [Eq.5]$$

Onde:

Q<sub>SB1,2,...</sub> = vazão subterrânea nos tempos 1, 2 e sucessivamente, L s<sup>-1</sup>.

As vazões equivalentes ao escoamento superficial direto foram calculadas pela diferença entre a vazão total e a respectiva vazão subterrânea, conforme explicitado na Equação 6.

$$Q_{S1} = Q1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q3 - Q_{SB3} \dots \quad [Eq. 6]$$

Onde:

Q<sub>S1,2,...</sub> = vazão superficial direta nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em L s<sup>-1</sup>;

Q<sub>1,2,...</sub> = vazão medida pelo linígrafo nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em L s<sup>-1</sup>.

Por fim, fazendo-se o somatório das vazões superficiais e multiplicando-se pelo intervalo de tempo, tem-se o volume do escoamento superficial direto, conforme explicitado na Equação 7.

$$ESD = \sum_{i=1}^N (Q_{S1} \cdot \Delta T) \quad [Eq. 7]$$

Onde:

ESD = volume do escoamento superficial direto, em litros;

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

Q<sub>si</sub> = vazões provenientes da contribuição do escoamento superficial direto, em L s<sup>-1</sup>;

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

### 3.8 Determinação da precipitação efetiva

A precipitação efetiva é a fração da precipitação total que contribuiu para a vazão do rio, ou seja, a vazão que realmente escoou pela bacia e chegou até a seção de controle. A precipitação total representa o total de chuva que caiu na bacia. Porém nem toda chuva contribuiu para a vazão do rio, uma parte dela é perdida por infiltração e depressões no solo, interceptação vegetal, evapotranspiração etc. Assim, no cálculo da precipitação efetiva foi necessário descontar, da precipitação total, a parcela que foi perdida, a qual não influenciou a vazão do rio.

Neste trabalho, consideraram-se insignificantes as parcelas da precipitação evapotranspirada e interceptada pela vegetação, durante e após a chuva. Sendo assim, foi considerado relevante somente a parcela da chuva que foi infiltrada ou retida nas depressões do solo. A partir desta consideração, foi necessário calcular esse volume de água, o qual foi estimado pelo método do índice  $\phi$  (Equação 8), conforme detalhado em Tucci et al. (2014).

$$\phi = \frac{Pt - ESD}{No} \quad [Eq.8]$$

Onde:

$\phi$  = taxa de retenção média no solo da bacia hidrográfica, em mm;

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

Pt = precipitação total na bacia hidrográfica, em mm;

No = número de ocorrências.

Sendo assim, considerou-se neste trabalho que a taxa de absorção máxima de água pelo solo é igual ao valor de  $\phi$ . Se a precipitação num dado intervalo de tempo fosse maior que  $\phi$ , considerou-se que essa quantidade de água contribuiu para o escoamento superficial. Porém, se no intervalo subsequente a precipitação fosse menor que  $\phi$ , essa quantidade de água não absorvida anteriormente, poderia ser absorvida nesse intervalo de tempo.

Para determinar o tempo em que a precipitação efetiva ocorreu, foi desenvolvida a seguinte metodologia:

#### a. Etapa 1

Calcular o valor a diferença entre a precipitação total e o índice  $\phi$ , fazendo:  $Pt - \phi$ .

Após isso, definiu-se que os tempos que possuem excessos, ocorrem onde  $P_t - \phi$  é maior que zero, ou seja, a água escoar nesse intervalo de tempo, pois a precipitação é maior que a capacidade de absorção do solo. Essa etapa está explicitada na Equação 9.

$$E_p = P_{t_i} - \phi \quad \text{se } P_{t_i} - \phi > 0 \quad [\text{Eq.9}]$$

Onde:

$E_p$  = excesso da precipitação, em mm;

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

Por outro lado, definiu-se como bônus de absorção de água pelo solo, os intervalos de tempo onde a água não escoaria, pois, a precipitação naquele intervalo de tempo foi menor que a capacidade de infiltração do solo. Neste caso, considerou-se que a água iria infiltrar no solo. A Equação 10 representa matematicamente este processo.

$$B_o = P_{t_i} - \phi \quad \text{se } P_{t_i} - \phi < 0 \quad [\text{Eq.10}]$$

Onde:

$B_o$  = bônus de absorção de água pelo solo, em mm;

#### b. Etapa 2

Nesta etapa, calculou-se o bônus médio em relação ao número de excessos da precipitação. Para isso, somou-se os bônus e dividiu-se pelo número de eventos de precipitação onde ocorreram excessos. A Equação 11 explicita matematicamente esta etapa.

$$B_{o_m} = \frac{\sum B_o}{N_{E_p}} \quad [\text{Eq.11}]$$

Onde:

$B_{o_m}$  = bônus de absorção de água pelo solo médio, em mm;

$N_{E_p}$  = número de excessos da precipitação.

#### c. Etapa 3

Nesta etapa, os bônus de absorção de água pelo solo médio foram distribuídos nos eventos que apresentaram excessos.

d. Etapa 4

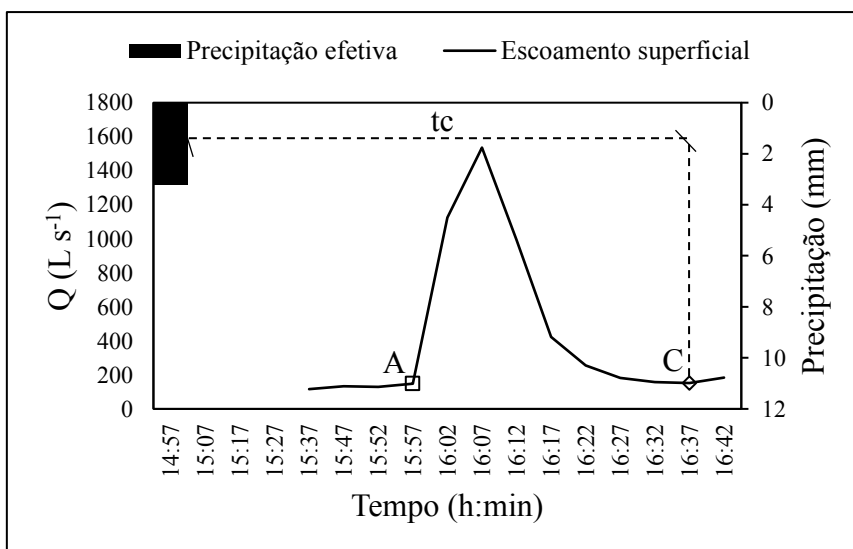
Neste ponto, foram repetidas as etapas 2 e 3 sucessivamente, até acabarem os bônus. Ao final, a somatória dos excessos foi considerada como a precipitação efetiva.

### 3.9 Estimativa do tempo de concentração por meio de hidrogramas

Para determinar o tempo de concentração por meio do estudo de hidrogramas é necessário entender a sua configuração. Ele 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, 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 (ponto C).

Neste trabalho, o ponto C foi determinado dividindo-se os últimos valores de vazão, os quais pertencem apenas ao escoamento base, pelos valores anteriores, obtendo-se um valor aproximadamente constante. Isto foi feito até que se encontrou um valor consideravelmente diferente dos já obtidos, significando que um valor de vazão mais alto foi atingido. O tempo decorrido entre o fim da chuva efetiva e a inflexão descendente (ponto C) foi considerado como tempo de concentração. A Figura 12 ilustra a obtenção do tempo de concentração em um hidrograma.

Figura 12 - Imagem ilustrando a definição do tempo de concentração ( $t_c$ ) por meio de um hidrograma



### 3.10 Equações empíricas para estimativa do tempo de concentração

Todas as equações empíricas utilizadas neste trabalho para estimativa do tempo de concentração foram extraídas de Silveira (2005). Este autor fez uma revisão de 23 equações, confrontando informações teóricas e a origem da fórmula, obtendo assim um desempenho para cada equação analisada, tanto para bacias rurais como para urbanas.

Neste trabalho, optou-se por avaliar as equações originalmente desenvolvidas para áreas urbanas e rurais, indistintamente, por que a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória se apresenta parcialmente urbanizada, conforme visualiza-se na Figura 2. Além disso, desconsiderou-se propositalmente o fato de que algumas equações terem sido geradas para bacia hidrográficas com áreas muito maiores do que aquela verificada nesta bacia. Essa ação pode ser justificada pela intensão de verificar se o efeito de área se perpetua na bacia ora em estudo.

#### 3.10.1 Equação de Carter

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad [\text{Eq. 12}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade medida pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

#### 3.10.2 Equação de Corps Engineers

$$t_c = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad [\text{Eq. 13}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade medida pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.3 Equação de Desbordes

$$t_c = 0,0869 \cdot A^{0,3039} \cdot S^{-0,3832} \cdot A_{imp}^{-0,4523} \quad [\text{Eq. 14}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ ;

$S$  = declividade obtida pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ ;

$A_{imp}$  = fração de área impermeável, adimensional.

### 3.10.4 Equação de DNOS

$$t_c = 0,419 \cdot k^{-1} \cdot A^{0,3} \cdot L^{0,2} \cdot S^{-0,4} \quad [\text{Eq. 15}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ ;

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

$S$  = a declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.5 Equação de Dooge

$$t_c = 0,365 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17} \quad [\text{Eq. 16}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ ;

$S$  = declividade estimada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.6 Equação de Eagleson

$$t_c = 0,274 \cdot n \cdot R^{-0,67} \cdot L \cdot S^{-0,5} \quad [\text{Eq.17}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

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

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

$S$  = declividade estimada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m \cdot m^{-1}$ .

### 3.10.7 Equação de FAA

$$t_c = 0,37 \cdot (1,1 - C_m) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,333} \quad [\text{Eq.18}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$C_m$  = coeficiente de escoamento superficial médio, adimensional;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m \cdot m^{-1}$ .

### 3.10.8 Equação de George Ribeiro

$$t_c = 0,222 \cdot (1,05 - 0,2 \cdot p)^{-1} \cdot L \cdot S^{-0,04} \quad [\text{Eq.19}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m \cdot m^{-1}$ .

### 3.10.9 Equação de Giandotti

$$t_c = 0,0559 \cdot (4 \cdot A^{0,5} + 1,5 \cdot L) \cdot L^{-0,5} \cdot S^{-0,5} \quad [\text{Eq.20}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em minutos;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $\text{km}^2$ ;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.10 Equação de Izzard

$$t_c = 85,5 \cdot \left( \frac{i}{36286} + Cr \right) \cdot i^{-0,667} \cdot L^{0,33} \cdot S^{-0,333} \quad [\text{Eq.21}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$i$  = intensidade da chuva, em  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$Cr$  = coeficiente que considera a superfície da bacia, adimensional;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.11 Equação de Johnstone

$$t_c = 0,462 \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,25} \quad [\text{Eq.22}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.12 Equação de Kerby-Hathaway

$$t_c = 0,619 \cdot N^{0,47} \cdot L^{0,47} \cdot S^{-0,235} \quad [\text{Eq.23}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$N$  = característica da superfície, adimensional;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.13 Equação de Kirpich

$$t_c = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad [\text{Eq.24}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.14 Equação de McCuen

$$t_c = 2,25 \cdot i^{-0,7164} \cdot L^{0,5552} \cdot S^{-0,2070} \quad [\text{Eq.25}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$i$  = intensidade da chuva, em  $\text{mm h}^{-1}$ ;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $\text{m m}^{-1}$ .

### 3.10.15 Equação de Onda Cinemática

$$t_c = 7,35 \cdot n^{0,6} \cdot i^{-0,4} \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad [\text{Eq.26}]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

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

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

### 3.10.16 Equação de Pasini

$$t_c = 0,107 \cdot A^{0,333} \cdot L^{0,333} \cdot S^{-0,5} \quad [Eq.27]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $km^2$ ;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m/m$ .

### 3.10.17 Equação de Picking

$$t_c = 0,0883 \cdot L^{0,667} \cdot S^{-0,333} \quad [Eq.28]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

### 3.10.18 Equação de Schaake et al.

$$t_c = 0,0828 \cdot L^{0,24} \cdot S^{-0,16} \cdot A_{imp}^{-0,26} \quad [Eq.29]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

$A_{imp}$  = fração de área impermeável, adimensional.

### 3.10.19 Equação de SCS Lag

$$t_c = 0,057 \left( \frac{1000}{CN_m-9} \right) 0,7 \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5} \quad [Eq.30]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$CN_m$  = curva número médio da bacia hidrográfica, adimensional;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

### 3.10.20 Equação de Simas-Hawkins

$$t_c = 0,322 \cdot A^{0,594} \cdot L^{-0,594} \cdot S^{-0,150} \cdot S_{scs}^{0,313} \quad [Eq.31]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $km^2$ ;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ ;

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

### 3.10.21 Equação de Ven te Chow

$$t_c = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad [Eq.32]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

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

$S$  = declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

### 3.10.22 Equação de Ventura

$$t_c = 0,127 \cdot A^{0,5} \cdot S^{-0,5} \quad [Eq.33]$$

Onde:

$t_c$  = tempo de concentração, em min;

$A$  = área da bacia hidrográfica, em  $km^2$ ;

$S$  = a declividade avaliada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento  $L$  do percurso, em  $m\ m^{-1}$ .

### 3.11 Parâmetros utilizados nas equações empíricas

As equações utilizadas neste trabalho apresentam diversas variáveis descritas pelos autores, as quais tem suas magnitudes elencadas na Tabela 2. As variáveis  $Cr$ ,  $k$ ,  $N$  e  $n$  são todos valores tabelados de acordo com as características da bacia hidrográfica na qual serão aplicados.

No que diz respeito às variáveis  $A$ ,  $S$  e  $L$ , as suas magnitudes foram obtidas por meio do software de sistema de informação geográfica Qgis 2.8. O parâmetro  $S_{scs}$  foi calculado por meio da Equação 34, descrita pelo Soil Conservation Service (SCS, 1986).

$$S_{scs} = \frac{25400}{CN_m} - 254 \quad [Eq.34]$$

A variável  $Cr$  da equação de Izzard, foi assumida neste trabalho como sendo 0,05. Este, representa um valor médio entre aqueles indicados para gramado aparado e a leivas de grama densa. O parâmetro  $k$  da equação de DNOS, foi adotado como sendo 4,0, pois, dentre as opções possíveis para este parâmetro, a descrição do solo como argiloso, coberto de vegetação e com absorção média, pareceu a mais adequada para a bacia hidrográfica ora estudada. O  $N$  da equação de Kerby-Hathaway foi adotado como sendo 0,2, um valor intermediário entre o pavimento alisado e a cobertura com grama.

Tabela 2 - Parâmetros fixos utilizados nas equações empíricas, suas unidades e magnitudes, bem como a forma/local de obtenção dos mesmos

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Área da bacia (A)	km <sup>2</sup>	8,27	Bacia hidrográfica
Declividade (S)	m m <sup>-1</sup>	0,03	Bacia hidrográfica
Comprimento do rio (L)	km	2,69	Bacia hidrográfica
Cr	-	0,05	Silveira (2005)
k	-	4,00	Silveira (2005)
N	-	0,20	Silveira (2005)
Sscs	-	112,57	Calculado
n (coeficiente de Manning)	-	0,035	Azevedo Netto et al. (1998)
Aimp	-	0,50	Silveira (2005)
p	-	0,50	Silveira (2005)
CNm	-	69,29	SCS (1986)
Cm	-	0,44	Genovez <i>apud</i> Mello e Silva (2013)

O valor do coeficiente de Manning (n), foi adotado como sendo 0,035. Esta assunção foi feita considerando que os canais da bacia hidrográfica apresentam coberturas com cascalhos e vegetação.

O parâmetro Aimp utilizado nas equações de Schaake et al. e Desbordes, assim como a variável p, utilizada na equação do George Ribeiro, foram considerados como sendo 0,5. Este é um valor intermediário entre o valor 1 (cobertura com mata) e o zero (área urbana, impermeável).

O CN foi obtido de acordo com as recomendações contidas em USDA (1986), considerando o tipo de cobertura do solo e o grupo hidrológico a que este solo pertence. Na Tabela 3 estão compilados os tipos de coberturas dos solos verificados na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, os grupos hidrológicos a quem estes solos pertencem, o respectivo número da curva (CN), a área ocupada com tais coberturas, e o valor médio do número da curva (CNm = 69,28) calculado para citada bacia, conforme Equação 35.

$$CNm = \frac{\sum_{i=1}^j CN_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad [Eq.35]$$

Onde:

CNm = curva número média da bacia hidrográfica, adimensional;

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

Ai = área ocupada com o tipo de solo i, km<sup>2</sup>;

i e j = grandezas de posição da somatória.

O Cm da equação de FAA, foi obtido para cada tipo de cobertura e declividade do solo, considerando um tempo de retorno de 2 anos, de acordo com o citado por Genovez *apud* Mello e Silva (2013). O valor Cm foi estimado, por meio da Equação 36, em 0,44, a partir dos valores individuais de C para cada tipo de cobertura e declividade do solo.

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^j C_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad [\text{Eq.36}]$$

Onde:

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

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

Ai = área i, km<sup>2</sup>;

i e j = grandezas de posição da somatória.

Tabela 3 - Tipos de coberturas e grupos de solos verificados na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Uso e ocupação do solo	Grupo de Solo	CN	Área (km <sup>2</sup> )
Área Urbana Pavimentada	A	77	0,92
Área Urbana não pavimentada	A	61	0,61
Mata Ciliar	B	55	0,57
Cerrado em Regeneração	B	73	0,19
Área de Várzea	D	50	0,22
Área gramada com árvores espaçadas – boas condições	B	48	0,27
Área gramada com árvores espaçadas – más condições	B	67	0,30
Pastagem	B	61	0,80
Pastagem Degradada	B	79	0,38
Cultura Perene	B	71	0,34
Cultura Anual	B	71	1,83
Espaços abertos – más condições	B	79	0,20
Espaços abertos – condições razoáveis	B	69	0,74
Espaços abertos – boas condições	B	61	0,24
Áreas impermeáveis	B	98	0,22
Canteiro central	B	79	0,01
Estradas pavimentadas	B	98	0,20
Estradas rurais	B	85	0,11
Lagos e Represas	B	100	0,04
<b>Média</b>		69,28	
<b>Total</b>			8,27

### 3.12 Análise estatística

A metodologia utilizada para avaliar o desempenho de 22 equações empíricas foi dos erros absolutos e relativo, conforme explicitado nas Equações 37 e 38, respectivamente. O erro relativo é dado pela razão do erro absoluto pelo valor mais verdadeiro ou provável, expresso em porcentagem.

$$EA = tc_{calc} - tc_{obs} \quad [Eq.37]$$

$$ER = \frac{EA}{tc_{obs}} \cdot 100 \quad [Eq.38]$$

Onde:

EA = erro absoluto, em min.;

ER = erro relativo, em %;

$tc_{obs}$  = tempo de concentração observado (tido como verdadeiro), obtido no hidrograma, em min.;

$tc_{calc}$  = tempo de concentração calculado por meio das equações empíricas, em min..

### 3.13 Equação empírica para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A equação empírica para a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória foi estimada a partir de doze hidrogramas, dos dezessete obtidos no período de 31/10/2016 a 26/05/2016. Neste trabalho, as variáveis independentes testadas na construção do modelo matemático foram todas relacionadas à precipitação que ocorreu na bacia hidrográfica, como precipitação total, precipitação efetiva, intensidade da precipitação total e intensidade da precipitação efetiva.

É importante ressaltar que as precipitações aqui elencadas foram aquelas observadas durante o escoamento superficial, ou seja, aquelas geradoras dos hidrogramas. Além dessa observação, outra de grande relevância, se refere ao motivo de não haver sido avaliado no modelo matemático as características fisiográficas da bacia hidrográfica, como comprimento e declividade do curso d'água principal, declividade da bacia hidrográfica, coeficiente de escoamento, curva número etc. A explicação para isso se ancora no fato de que somente uma bacia hidrográfica está sendo avaliada, o que não

permitiria que tais características contribuíssem no citado modelo, uma vez que os valores seriam fixos, não havendo, portanto, variação.

No processo de geração da equação matemática diversos modelos de regressão foram testados, a partir do comportamento dos tempos de concentração (verificados nos doze hidrogramas) *versus* variáveis independentes. Diante disso, pôde-se avaliar os modelos de regressão linear simples, linear múltiplo, quadrático de 2ª e 3ª grau e potencial com 2 e 3 parâmetros, todos eles por meio do software estatístico SigmaPlot 12.0.

Os modelos matemáticos gerados foram submetidos aos testes estatísticos de F, para avaliação da regressão (denominado de p-valor regres.); ao teste t, para avaliação das constantes do modelo de regressão (denominado de p-valor coef. a e p-valor coef. b); e ao teste de Shapiro-Wilk, para avaliação da normalidade dos resíduos da regressão. Em todos esses testes, considerou-se 5% como nível de significância. Além disso, de cada modelo gerado foram calculados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão de estimativa (EPE). Importa destacar que o modelo somente foi considerado adequado se fosse aprovado em todos os testes estatísticos. Caso dois ou mais modelos de regressão fossem aprovados, os critérios de escolha passariam a ser aquele com menor EPE, em seguida maior  $R^2$  e, se ainda assim perdurasse a dúvida, aquele mais simples ou de mais fácil utilização.

Uma vez escolhido o modelo de regressão, o mesmo teve sua eficiência avaliada por meio do teste de Nash-Sutcliffe (Equação 39). Neste teste é calculado o coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ) e, quanto mais próximo de 1 for este coeficiente, entende-se que mais preciso é o modelo matemático gerado na estimativa do  $t_c$  da bacia hidrográfica.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^j (t_{c_{obs}} - t_{c_{estm}})^2}{\sum_{i=1}^j (\overline{t_{c_{obs}}} - \overline{t_{c_{estm}}})^2} \quad [\text{Eq.39}]$$

Onde:

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

$\overline{t_{c_{estm}}}$  = tempo de concentração médio, estimado por meio do modelo de regressão gerado para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em min.;

$t_{c_{estm}}$  = tempo de concentração estimado por meio do modelo de regressão gerado para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em min..

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual, em comparação com a variação dos dados medidos ou observados. Neste trabalho, empregou-se a classificação de eficiência dos

modelos proposta por Gotschalk & Motoviloc (2000), *apud* Collischow (2001) e Viola (2008), que designa a seguinte escala de valores:  $C_{NS} = 1$  indica ajuste perfeito do modelo;  $C_{NS} > 0,75$  demonstra ajuste bom/adequado; e  $0,36 < C_{NS} < 0,75$  para ajustes aceitáveis. Para esta análise, foram utilizados os tempos de concentração, bem como as variáveis independentes, extraídas de 5 hidrogramas, dos 17 obtidos neste trabalho.

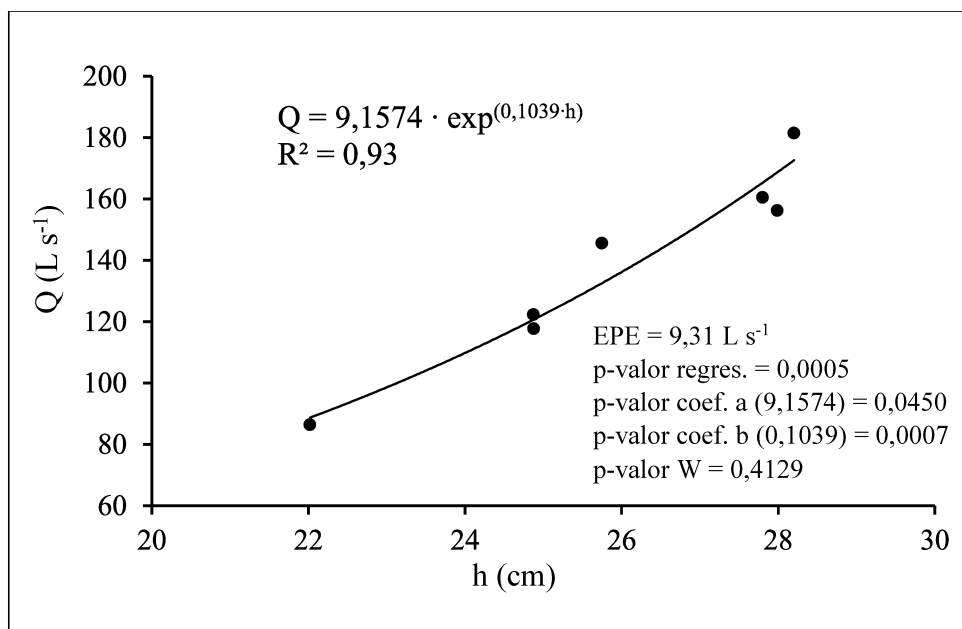
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Curva chave do Córrego Glória

A curva chave do Córrego Glória foi obtida a partir de sete leituras de velocidade e cota do manancial, no período de 22/10/2015 a 05/04/2016, conforme detalhado na Tabela 1. A partir da velocidade da água e da seção molhada do córrego foi possível obter a vazão, a qual tem seus valores *versus* cota plotados na Figura 12. Na citada figura estão contidos também a equação da curva chave, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão da estimativa (EPE), assim como os testes estatísticos da regressão e dos coeficientes a e b do modelo de regressão.

Analizando a Figura 14, nota-se o bom ajuste do modelo de regressão, dado pelo alto valor do  $R^2$  (0,93) e o baixo valor do EPE (9,31 L s<sup>-1</sup>). Além disso, o modelo de regressão apresentado foi aprovado (p-valor abaixo de 0,05) em todos os testes estatísticos impostos neste trabalho, como teste F da regressão, teste t dos coeficientes a e b da regressão e o teste de Shapiro-Wilk (W).

Figura 14 - Curva chave do Córrego Glória. As letras Q e h representam, respectivamente, a vazão e a cota



#### 4.2 Hidrogramas obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Neste trabalho foram selecionados os 17 hidrogramas mais característicos, ou seja, aqueles onde a ascensão, o pico e a recessão apresentaram-se bem pronunciados. Para todos os hidrogramas foram obtidos os tempos de concentração (tc), que representa o tempo entre o fim da chuva efetiva e o ponto C, ou o final do período de recessão. Dos 17 hidrogramas, em 12 deles o tc estimado foi usado para a avaliação do desempenho de 22 equações empíricas, desenvolvidas para a estimativa do tempo de concentração. Além disso, esses 12 tempos de concentração também foram usados na obtenção de um modelo matemático capaz de estimar tc para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória em função de parâmetros relacionados à precipitação.

Na Tabela 4 estão compilados o horário do fim da chuva efetiva, o horário do ponto C e a duração do tc dos 12 hidrogramas usados para a avaliação do desempenho das equações empíricas, bem como para a obtenção do modelo matemático.

Tabela 4 - Horário relativo ao fim da chuva efetiva e ao ponto C, bem como a duração do tempo de concentração (tc) e precipitação total (Pt), de 12 hidrogramas obtidos neste trabalho

Data do hidrograma	Tempo (h min)			
	Fim da chuva efetiva	Ponto C	Tc (min)	Pt (mm)
31/10/2015	12h 20min	13h 50min	90	12,4
03/11/2015	1h 50min	5h 50min	240	17,0
07/11/2015	14h 57min	16h 37min	100	5,6
06/12/2015	4h 2min	7h 32min	210	17,4
18/12/2015	15h 52min	18h 17min	145	4,2
20/12/2015	16h 17min	19h 27min	190	29,8
26/12/2015	13h 27min	15h 57min	150	13,6
28/12/2015	15h 22min	18h 32min	190	15,4
04/01/2016	5h 12min	8h 42min	210	19,6
19/01/2016	1h 27min	6h 47min	320	20,0
09/02/2016	19h 52min	21h 27min	95	15,2
29/02/2016	13h 2min	15h 7min	125	15,6

Os hidrogramas citados na Tabela 4 estão representados graficamente nas Figuras de número 15 a 26. Nas citadas figuras, estão explicitados os resultados do escoamento superficial, o qual representa a resposta da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória à chuva que gerou esse evento, ou seja, a chuva efetiva. Além disso, nesses hidrogramas é possível visualizar os pontos A (início da ascensão do escoamento superficial) e C (fim do escoamento superficial e continuação do escoamento de base).

Analisando o hidrograma ilustrado na Figura 16, nota-se que o formato do mesmo não se apresenta de forma típica, como visualizado na Figura 15. Isso é decorrente da duração da chuva que gerou o escoamento, a qual não ocorreu em bloco, mas sim se perdeu por 2h e 15min, de forma distribuída nesse tempo, precipitando uma média de 0,63 mm a cada 5 minutos. Essa característica da chuva afetou o formato da região do pico do hidrograma, o qual se apresentou de forma achatada, como um patamar e não como um pico.

Não obstante, visualizam-se nas Figuras 19, 22, 23 e 26, a existência de dois picos pronunciados em cada hidrograma. Essa situação pode ser atribuída à característica da chuva que gerou esses hidrogramas. Infere-se que a chuva não tenha ocorrido igualmente em toda a bacia hidrográfica, mas sim, que a mesma incidiu inicialmente e de maneira mais intensa na porção oeste da bacia. Neste setor encontra-se a parte urbanizada e, conseqüentemente, mais impermeabilizada da bacia hidrográfica (Figura 2), o que favorece o rápido escoamento em detrimento da maior infiltração.

Além disso, uma verificação *in loco* na bacia hidrográfica, constatou-se que toda a água pluvial da área urbanizada é direcionada para um bueiro que faz a travessia dessa água por baixo da rodovia BR-050, a qual corta a bacia no sentido norte sul. Ao atravessar a rodovia, esse bueiro descarrega toda a água no menor tributário da bacia hidrográfica (em relação ao comprimento do seu talvegue), localizado próximo à seção de controle. Esse tributário pode ser visualizado na Figura 1.

Nesse sentido, infere-se que a porção oeste da bacia pode, mais rapidamente do que as demais, contribuir com o escoamento superficial, provocando o primeiro pico. Com o avançar da chuva para o restante da bacia, as demais áreas passam a contribuir, contudo mais atrasada, gerando o segundo e maior pico. Um outro fator que pode contribuir para um maior atraso do segundo pico, se deve à represa oriunda de um barramento instalado na bacia hidrográfica. Contudo, o efeito dessa represa no retardamento do escoamento superficial é baixo, pois o vertedouro da mesma verteu, apesar de não ter sido medida, uma quantidade considerável de água o tempo todo.

Importa ressaltar também, que o único pluviômetro instalado na bacia hidrográfica se localiza na porção leste da mesma. Apesar da bacia hidrográfica em questão possuir uma área de apenas 8,27 km<sup>2</sup>, espera-se que haja interferência no escoamento superficial da mesma, em função da variabilidade espacial da chuva, principalmente das chuvas convectivas.

Figura 15 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 31/10/2015

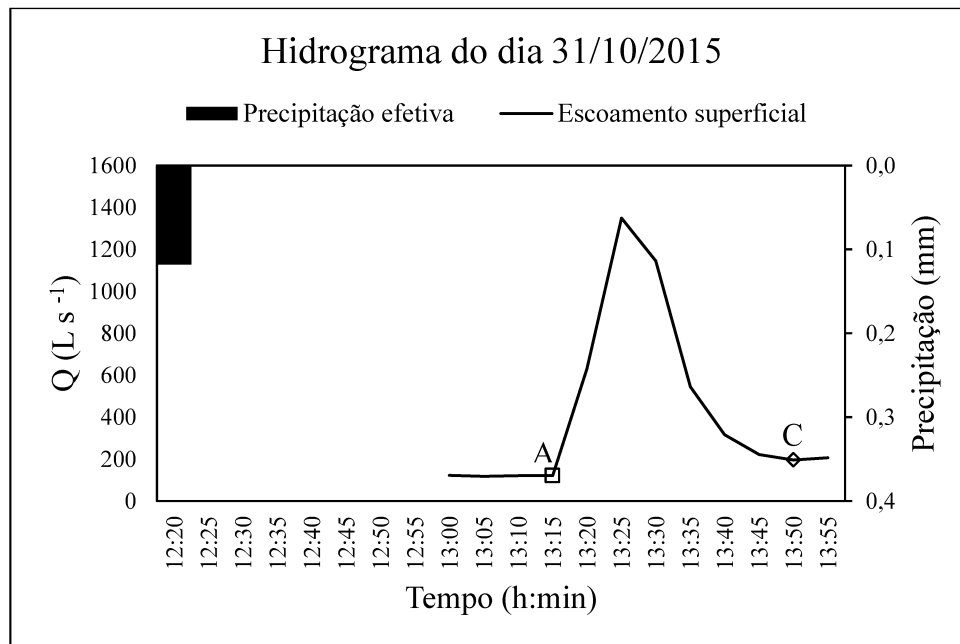


Figura 16 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 03/11/2015

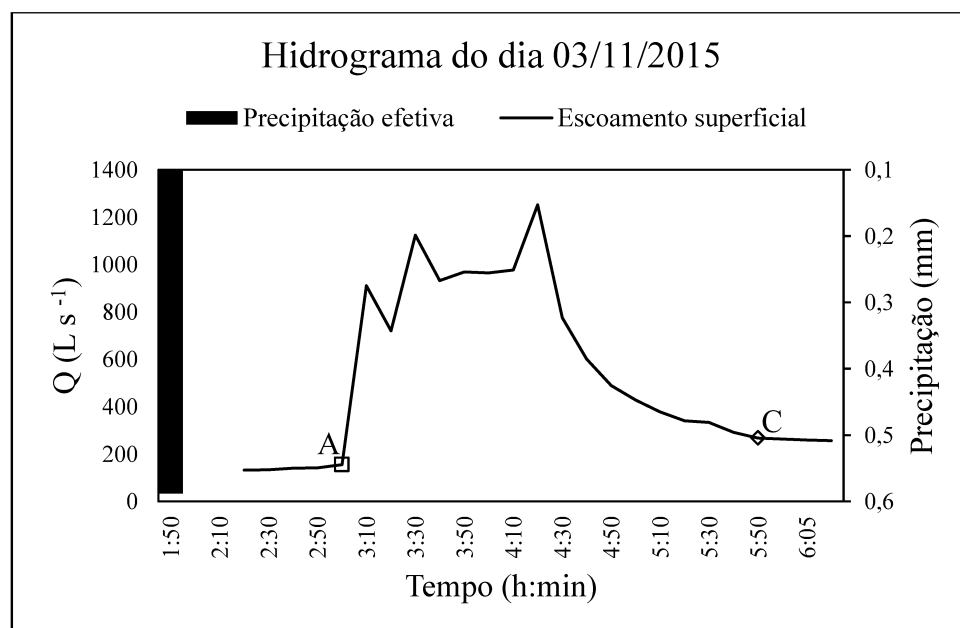


Figura 17 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 07/11/2015

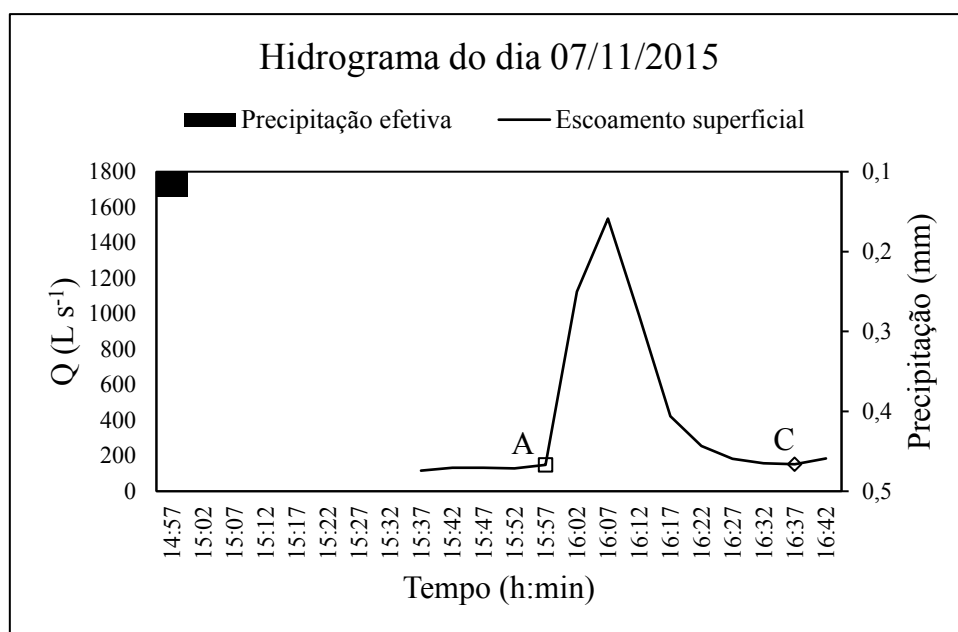


Figura 18 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 06/12/2015

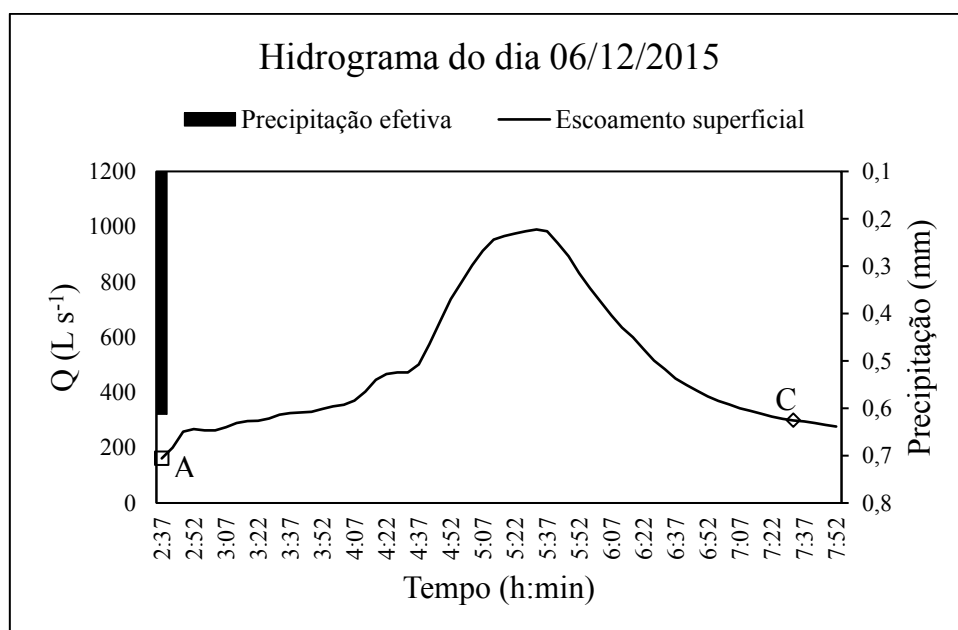


Figura 19 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 18/12/2015

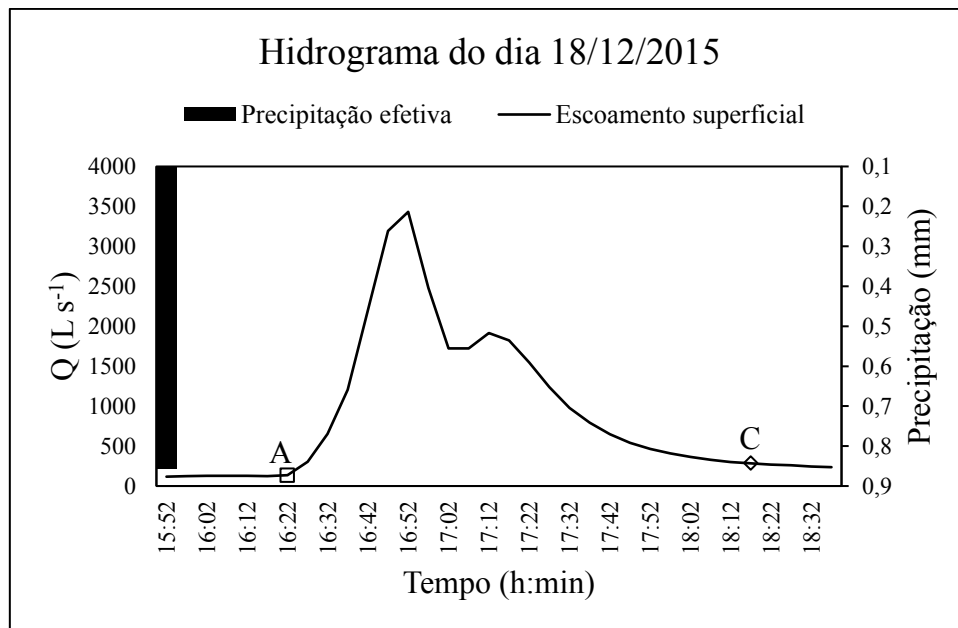


Figura 20 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 20/12/2015

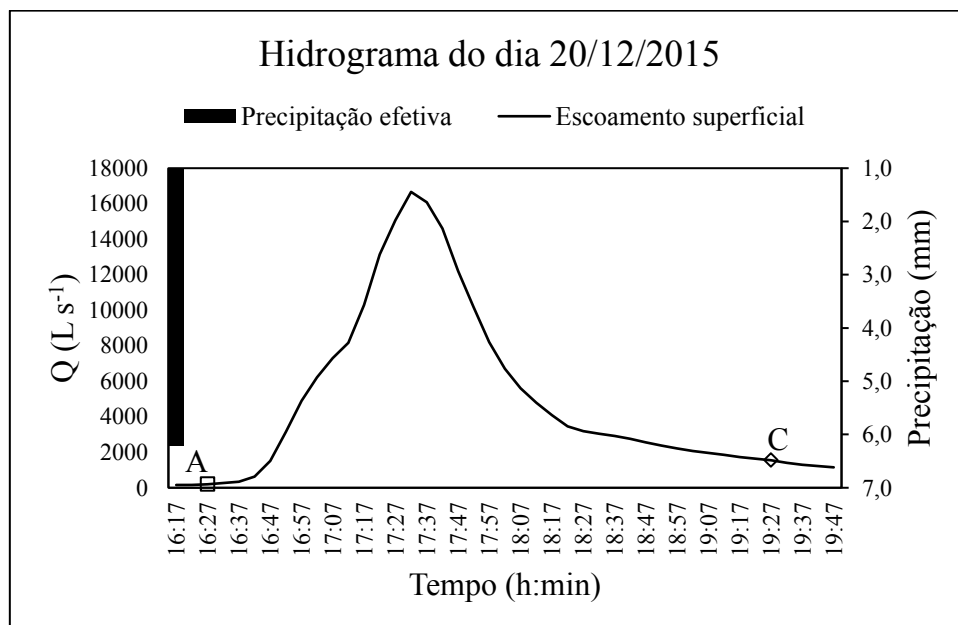


Figura 21 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 26/12/2015

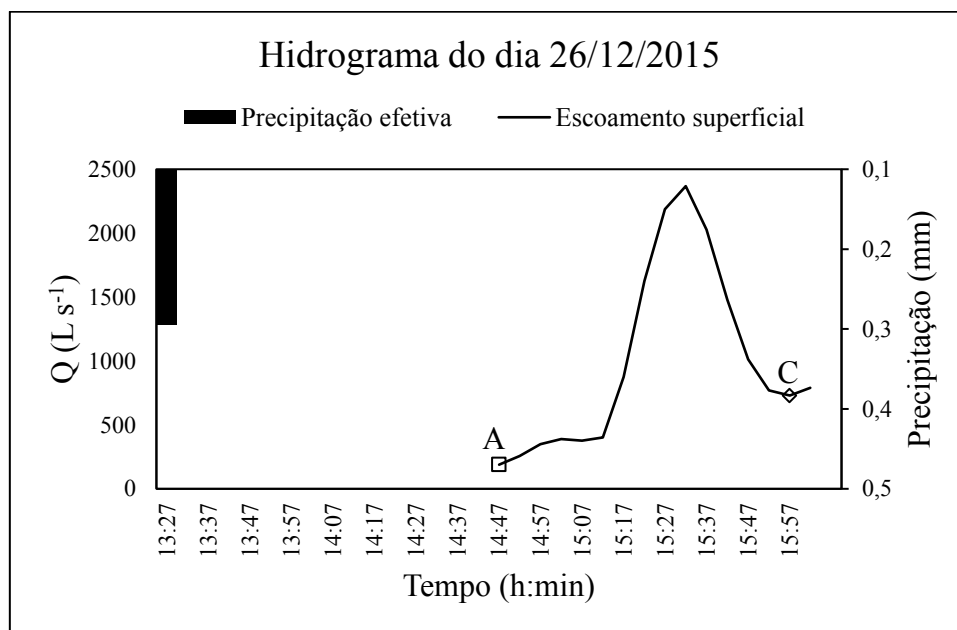


Figura 22 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 28/12/2015

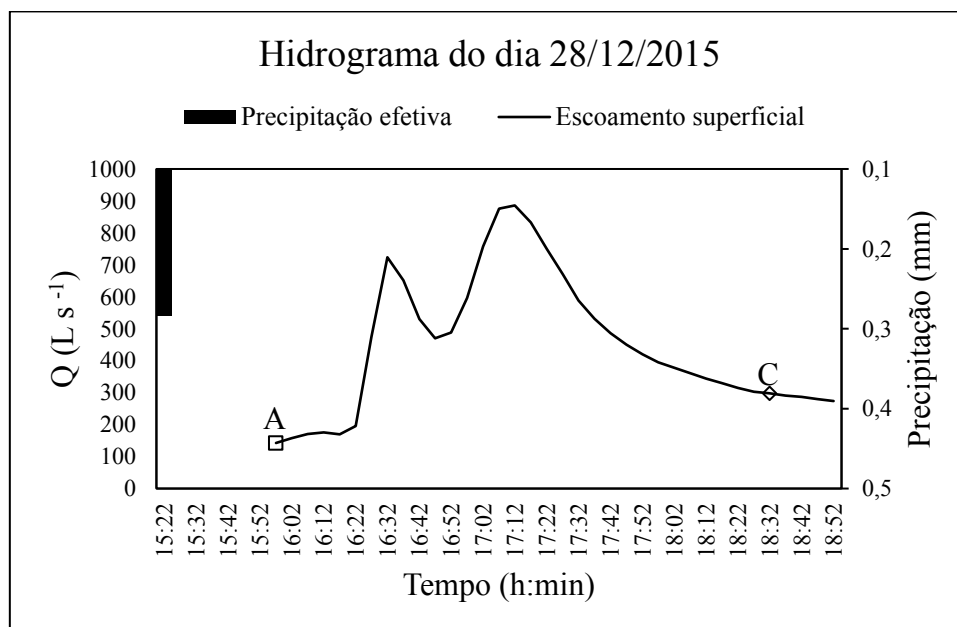


Figura 23 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 04/01/2016

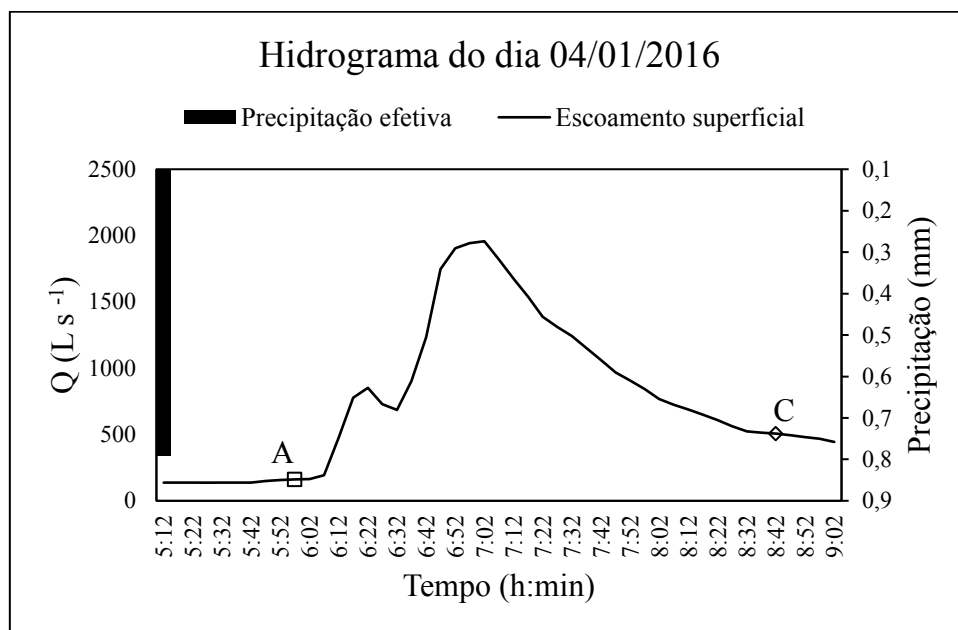


Figura 24 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 19/01/2016

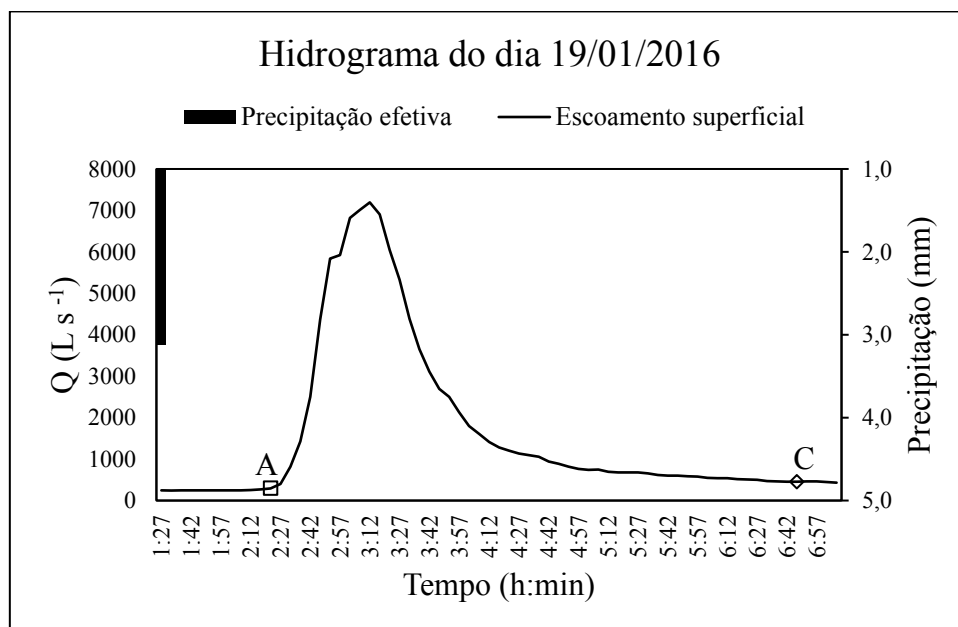


Figura 25 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 09/02/2016

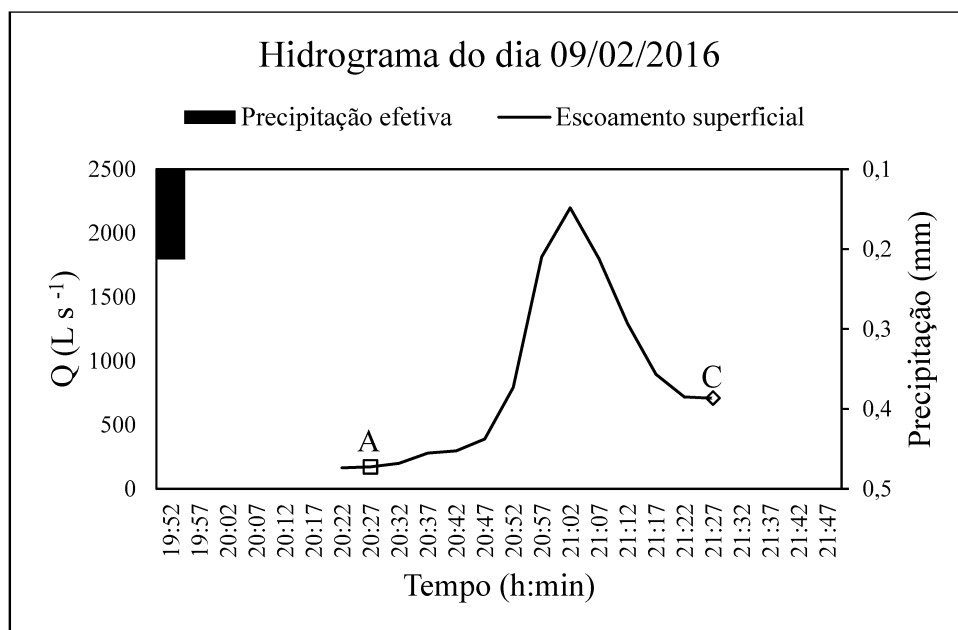
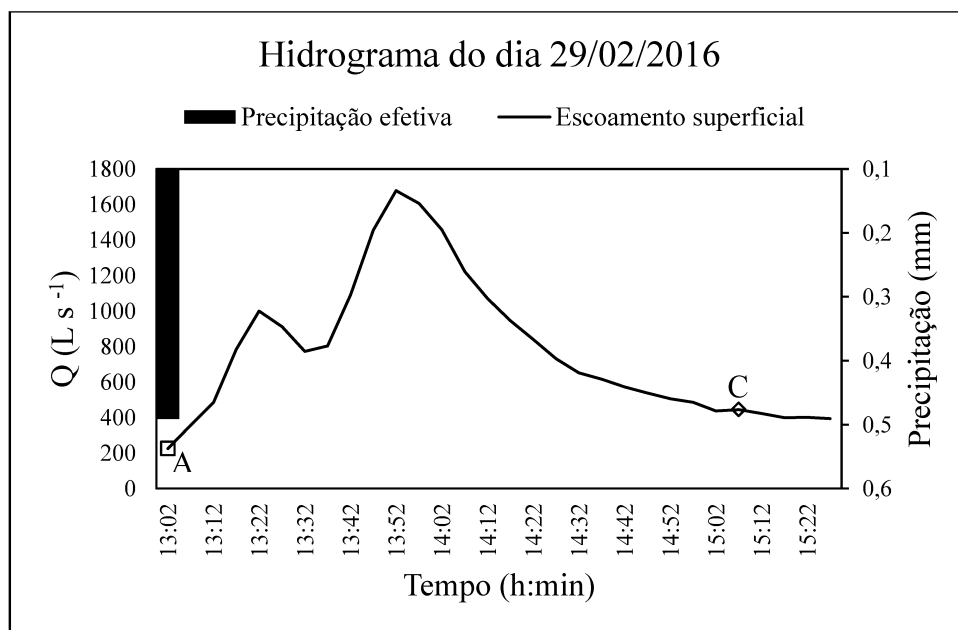


Figura 26 - Hidrograma obtido na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória no dia 29/02/2016



### 4.3 Resultados do tempo de concentração utilizando hidrogramas

A partir dos doze hidrogramas (Figuras 15 a 26) foi possível extrair os tempos de concentração expostos na Tabela 5. Nesta tabela estão explicitados também, as precipitações total e efetiva, bem como seus respectivos tempos de duração, obtidos em cada hidrograma.

Tabela 5 - Resultados dos tempos de concentração (tc), das precipitações total (Pt) e efetiva (Pef) e dos tempos de duração das precipitações total (tPt) e efetiva (tPef), obtidas na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, no período de 31/10/2015 a 29/02/2016

Data do hidrograma	tc (min)	Pt (mm)	tPt (min)	Pef (mm)	tPef (min)
31/10/2015	90	12,4	20	0,1	5
03/11/2015	240	17,0	130	0,6	5
07/11/2015	100	5,6	10	0,1	5
06/12/2015	210	17,4	215	0,6	20
18/12/2015	145	4,2	40	0,9	15
20/12/2015	190	29,8	155	6,2	25
26/12/2015	150	13,6	100	0,3	10
28/12/2015	190	15,4	30	0,3	5
04/01/2016	210	19,6	105	0,8	10
19/01/2016	320	20,0	195	3,1	15
09/02/2016	95	15,2	40	0,2	10
29/02/2016	125	15,6	70	0,5	10
<b>Média</b>	172	...	...	...	...
		0,73	0,80	0,71	0,33
<b>Correlação de Spearman<sup>1</sup></b>		(p-valor = 0,0090)	(p-valor = 0,0004)	(p-valor = 0,0054)	(p-valor = 0,2840)

Nota: <sup>1</sup> Coeficiente de correlação de postos de Spearman em relação ao tc (p-valor abaixo de 0,05 indica que a correlação encontrada foi significativa pelo teste t com alfa de 5%); a simbologia “...” significa que o valor numérico não está disponível

Por meio do coeficiente de correlação de postos de Spearman é possível medir a intensidade da relação entre variáveis quantitativas ou não. Além disso, este coeficiente

não é sensível a assimetrias na distribuição, nem à presença de outliers, bem como não exige que os dados sejam oriundos de populações normais. Não obstante, o coeficiente de Spearman é indicado também, nos casos em que os dados se apresentem graficamente desarranjados, com pontos afastados dos demais, ou então, quando os mesmos se ordenarem no formato de uma curva. Os dados contidos na Tabela 5 apresentaram esses comportamentos, o que justificou o uso desse coeficiente e não de Pearson.

Analisando a Tabela 5, notam-se correlações significativas pelo coeficiente de correlação de postos de Spearman, das precipitações total (Pt) e efetiva (Pef) e do tempo de duração da precipitação total (tPt), em relação ao tempo de concentração. No que se refere ao do tempo de duração da precipitação efetiva (tPef) em relação ao tempo de concentração, a correlação se apresentou fraca e não significativa pelo teste t. Diante do resultado do teste de correlação, espera-se um aumento nos valores de tc quando Pt, Pef e tPt também aumentarem.

Essa é uma resposta normal da bacia hidrográfica, quando se considera que um maior volume de chuva incidente sobre a bacia demandará mais tempo para ser escoado, o que estende o tempo de base do hidrograma e, conseqüentemente, aumenta o tempo de concentração. Em relação ao tempo de duração da precipitação total (tPt) verificou-se a mesma resposta, ou seja, maiores valores de tPt implicam em chuvas com maiores durações, o que aumenta a distância entre o fim da chuva efetiva e o ponto C do hidrograma, aumentando também o tempo concentração. No que diz respeito à precipitação efetiva (Pef), verificou-se comportamento semelhante ao encontrado para Pt e tPt, ou seja, o tc tende aumentar quando Pef aumenta. A razão disso reside no fato de que maiores volumes de Pef, implicam diretamente no maior volume de água a ser escoado pela bacia hidrográfia, aumentando também o tempo de concentração.

Contudo, um fator que pode ser preponderante no tempo de concentração, diz respeito ao conteúdo de umidade do solo antes da chuva. Ele afetará diretamente a infiltração da água no solo e, conseqüentemente, o volume de água que será escoado. Neste trabalho os teores de água no solo não foram medidos.

Segundo Pruski et. al. (2001), o processo de infiltração é complexo. Primeiro toda a precipitação se infiltra no solo. Com o decorrer da chuva a capacidade de infiltração decresce, até tornar-se menor que a intensidade de precipitação. Quando isso ocorre, a água começa a acumular-se sobre a superfície do solo e o escoamento superficial acontece.

#### 4.4 Resultados do tempo de concentração utilizando as equações empíricas

A partir dos valores do tempo de concentração obtidos nos doze hidrogramas, foi possível compará-los com os valores estimados pelas equações experimentais (Equação 12 a 33). Os resultados obtidos pelas equações empíricas estão compilados na Tabela 6. Nesta tabela estão reunidos também, os resultados dos erros absoluto e relativo, calculados em relação ao valor médio do tempo de concentração obtido nos doze hidrogramas.

Adotou-se o valor médio de  $t_c$  (172 min) porque as equações empíricas levam em consideração, em sua maioria, parâmetros físicos da bacia hidrográfica, o que permitiria estimar apenas um valor de  $t_c$  para cada equação empírica. Sendo assim, inferiu-se que o valor médio de  $t_c$  obtido nos doze hidrogramas poderia ser um número justo para a comparação, visto que as equações empíricas também refletem um  $t_c$  médio das bacias hidrográficas nas quais essas equações foram desenvolvidas.

Analisando os resultados contidos na Tabela 6, nota-se que a equação de DNOS e Simas-Hawkins, estimaram o  $t_c$  para a bacia experimental em 61 min e 283 min, respectivamente. Os erros equivalentes são -110 min, para o erro absoluto e, -64% para o erro relativo. Por outro lado, a equação de Simas-Hawkins apresentou um erro absoluto de 111 minutos e um erro relativo de 64%, quando comparado ao  $t_c$  médio da bacia. A diferença provavelmente está nos parâmetros utilizados exigidos pelas equações, os quais são diferentes. O armazenamento de água no solo pelo método do Soil Conservation Service (Scsc), solicitado pela equação de Simas-Hawkins, leva em consideração o tipo de solo, porém, o parâmetro  $k$ , exigido pela equação de DNOS, está relacionado com as características do terreno da bacia hidrográfica.

As equações de Derbordes, Dooge e Ventura possuem modelagem semelhante, porém, obtiveram valores de  $t_c$  para a bacia experimental muito diferentes entre si, da ordem de 54, 96 e 133 min, respectivamente. Esses valores são muito diferentes do tempo de concentração médio da bacia, estimado pelos hidrogramas, o qual atingiu 172 min. Essa diferença se refletiu nos erros absoluto (-118, -75 e -39 min, respectivamente) e relativo (-68%, -44% e -22%, respectivamente). A inclusão do parâmetro fração de área impermeável ( $A_{imp}$ ) na equação de Desbordes não influenciou positivamente o desempenho da mesma na bacia experimental.

Tabela 6 - Resultados dos tempos de concentração estimados pelas equações empíricas explicitadas nas Equações 12 a 33, e respectivos erros em relação ao tempo de concentração médio obtido em doze hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Equação empírica	t <sub>cest</sub> (min)	Erros <sup>1</sup>	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Carter	31	-140	-81
Corps Engineers	48	-123	-71
Desbordes	54	-118	-68
DNOS	61	-110	-64
Dooge	96	-75	-44
Eagleson	32	-139	-81
FAA	79	-92	-53
George Ribeiro	43	-128	-74
Giandotti	192	20	12
Johnstone	112	-60	-34
Kerby-Hathaway	64	-107	-62
Kirpich	34	-137	-80
Pasini	109	-62	-36
Picking	34	-138	-80
Schaake et al.	13	-158	-92
SCS Lag	174	2	1
Simas-Hawkins	283	111	64
Ven te Chow	57	-114	-66
Ventura	133	-39	-22

Nota: <sup>1</sup>Os erros foram calculados considerando o valor do tc médio de 172 minutos, obtido em doze hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

O desempenho da equação de Dooge, baseada em dados de dez bacias rurais da Irlanda, com áreas entre 140 e 930 km<sup>2</sup>, deve refletir melhor o tempo de concentração em bacias onde predomina o escoamento em canais (PORTO, 1995 apud SILVEIRA, 2005). Diante disso, como a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória possui uma

baixa densidade de canais, é de esperar que o escoamento predominante seja sobre o solo, fato que pode ter afetado o desempenho da equação de Dooge.

Kobiyama et al. (2006) utilizaram como área de estudo a bacia do campus da Universidade Federal de Santa Catarina e realizaram análise comparativa entre os tempos de concentração calculados em 5 eventos de chuva, e aqueles calculados com 5 fórmulas. Ao calcular os erros entre a média de  $t_c$  medido e os estimados pelas fórmulas, observou-se que o pior desempenho foi obtido pela fórmula de Dooge, que superestimou o valor de  $t_c$ . Porém eles analisaram o tempo de concentração do final da chuva total até o ponto C, e não considerou a precipitação efetiva, além de analisar poucos eventos. Isso pode ter influenciado nos resultados. Os próprios autores reconheceram que precisam ser analisados mais eventos de chuva.

As equações de Carter, Corps Engineers, Johnstone, Kirpich, Picking e Ven te Chow, utilizam como parâmetros apenas o comprimento e a declividade do curso d'água principal. Sendo assim, todas apresentaram resultados semelhantes. Apenas Johnstone obteve um resultado diferente, aproximando-se mais do tempo de concentração da bacia experimental, obtendo um erro absoluto de -60 min e um erro relativo -34%. Por outro lado, as equações de Carter, Corps Engineers, Kirpich, Picking e Ven te Chow, apresentaram um erro absoluto de -140, -123, -137, -138 e -114 min, respectivamente, e um erro relativo de -81%, -71%, -80%, -80% e -66%, respectivamente. Portanto, não é recomendado o uso dessas equações para a bacia experimental em estudo. Contudo, ressalta-se que o pequeno tempo de avaliação e número de bacias hidrográficas envolvidas não permitem um parecer definitivo.

Segundo USDA (1973), a equação de Johnstone foi desenvolvida a partir de dados de 19 bacias americanas, com uma faixa de área de 65 a 4.200 km<sup>2</sup>. Não obstante, MOPU (1987) relata que a fórmula do Corps of Engineers do exército americano foi originária de uma faixa ainda mais ampla de bacias rurais (até 12.000 km<sup>2</sup>), aproximadamente. Diante disso, pode-se inferir que o resultado ruim dessas duas equações em relação ao tempo de concentração médio da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, possa ser atribuído em parte, à grande diferença de áreas entre as bacias avaliadas.

No Brasil, a equação de Kirpich é largamente utilizada, porém, neste trabalho não obteve um desempenho satisfatório. Segundo Kibler (1982), essa equação foi desenvolvida em 6 bacias hidrográficas rurais do estado americano do Tennessee com áreas entre 0,0051 e 0,4533 km<sup>2</sup>. Esse fato pode ter influenciado no alto erro, pois a bacia em estudo possui área maior (8,27 km<sup>2</sup>) e está parcialmente urbanizada. De acordo com

Silveira (2005), quando extrapola-se sua aplicação para bacias maiores do que 0,4533 km<sup>2</sup> é de se esperar obter tempos de concentração menores que os reais.

Silveira et al. (2005) avaliou o desempenho de vinte e três equações para estimativa do tempo de concentração em bacias urbanas e rurais, dentre as equações testadas, recomendou os modelos de Ven Te Chow e Kirpich para as bacias rurais devido aos melhores resultados apresentados. Neste trabalho, porém, essas duas equações não apresentaram um bom desempenho.

As equações de Eagleson, FAA, George Ribeiro, Kerby-Hathaway, Shaaake et al. e SCS Lag utilizam os parâmetros L e S, porém todas acrescentam outras variáveis ao modelo matemático. Apenas as fórmulas de Kerby-Hathaway e FAA tiveram seus resultados parecidos, com erros absoluto de -107 e -92 min e relativo, de -62% e -53%, respectivamente. Corroborou para esse resultado, o fato de ambas terem sido desenvolvidas para bacias urbanas e pequenas (SILVEIRA, 2005).

Ao se analisar a Tabela 6 nota-se também, que a equação de Schaaake et al. Foi aquela que obteve o maior erro para o tempo de concentração. Em relação aos erros absoluto e relativo, a sua magnitude chegou a -158 min e -92%, respectivamente. Portanto, não é recomendado o seu uso para a bacia em estudo, apesar do pouco tempo de avaliação e baixo número de bacias hidrográficas envolvidas.

As equações de Eagleson e George Ribeiro apresentaram resultados semelhantes em relação ao tc médio da bacia experimental, com erros absoluto e relativo, respectivamente de -139 e -128 min e -81% e -74%.

Analisando os resultados contidos na Tabela 6, verifica-se que a equação de Giandotti estimou o tc em 192 min, apresentando, portanto, um erro absoluto de 20 minutos e um erro relativo de 12%, quando comparado ao tempo de concentração médio da bacia experimental que foi de 172 minutos. Sendo assim, pode-se considerar que a equação de Giandotti apresentou um bom resultado, podendo ser utilizada para a bacia em estudo.

A equação de Giandotti utiliza a área (A), o comprimento do curso d'água principal (L) e a declividade (S), assim como a equação de Pasini. Apesar de utilizarem os mesmos parâmetros, a equação de Pasini apresentou pior desempenho quando comparada com a equação de Giandotti, com erros absoluto e relativo de 62 min e 36%, respectivamente.

Um estudo realizado, em Campo Grande – MS, por Almeida et al. (2013), avaliaram o desempenho de dez equações para a estimativa do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Guariroba. Como resultado, observaram que a equação de

Giandotti foi a que mais se aproximou do tempo de concentração obtido por meio dos hidrogramas da bacia.

E por fim, a equação que melhor resultado alcançou foi a SCS Lag, que apresentou um erro absoluto 2 min e um erro relativo de 1%. Esse resultado demonstra que o tempo de concentração encontrado (174 min) foi muito próximo daquele médio obtido por meio dos hidrogramas (172 min). Essa equação utiliza, além do comprimento e declividade do curso d'água principal, o parâmetro da curva número, que considera o tipo de cobertura do solo e o grupo hidrológico a que este solo pertence. Esse parâmetro parece ter sido a causa do bom desempenho dessa equação na estimativa do tempo de concentração da bacia experimental em estudo.

Além disso, segundo Tucci (2005), a equação do SCS Lag, foi desenvolvida para bacias com até 8 km<sup>2</sup>, o que também pode ter contribuído para o seu melhor desempenho na bacia em estudo, visto que esta possui 8,27 km<sup>2</sup>.

As equações de Izzard, Onda Cinemática e McCuen, utilizam a intensidade da chuva como um dos parâmetros de entrada. Diante disso, é possível comparar os valores do tempo de concentração dados por essas três equações, com aqueles observados em cada hidrograma. Os resultados dessas comparações, bem como seus respectivos erros absolutos e relativos estão compilados na Tabela 7.

Analisando a citada tabela, nota-se que a equação de Izzard apresentou uma tendência de superestimar os tempos de concentração na Bacia hidrográfica Experimental do Córrego Glória. Esse comportamento é verificado ao se observarem os erros absoluto e relativos estimados em relação ao  $t_c$  de cada hidrograma. Apesar disso, quando se comparam os erros absoluto e relativo em relação ao tempo de concentração ( $t_c$ ) e à intensidade ( $i$ ) médios da bacia, verifica-se que a equação de Izzard apresentou resultados muito bons, com valores de 60 min e 34%, respectivamente. Contudo, quando se analisam os erros médios absoluto e relativo, oriundos dos erros individuais em módulo, nota-se que essa equação alcançou valores da ordem de 72 min e 42%, respectivamente. Neste caso, o erro em módulo fornece uma idéia da dispersão dos erros em relação ao valor real, independentemente se está superestimando ou subestimando.

Mota (2012), em um estudo realizado na bacia hidrográfica do Rio Araponga, no município de Rio Negrinho – SC, concluiu que a equação de Izzard apresentou o melhor resultado na estimativa do tempo de concentração.

Tabela 7 - Valores de tempo de concentração (tc) e intensidade da precipitação (i) obtidos em cada hidrograma, bem como os tempos de concentração estimados pelas equações de Izzard, Onda Cinemática e McCuen, com os respectivos erros absoluto e relativo do tc estimado em relação ao tc do hidrograma

Data do Hidrograma	tc	i <sup>1</sup>	Izzard			Onda Cinemática			McCuen		
			tc	EA	ER	tc	EA	ER	tc	EA	ER
	(min)	(mm h <sup>-1</sup> )	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)
31/10/2015	90	37,2	105	15	8	72	-18	-10	36	-54	-31
03/11/2015	240	7,8	291	51	29	134	-106	-62	110	-130	-75
07/11/2015	100	33,6	112	12	7	75	-25	-15	39	-61	-35
06/12/2015	210	4,9	399	189	110	163	-47	-28	156	-54	-32
18/12/2015	145	6,3	336	191	111	147	2	1	129	-16	-9
20/12/2015	190	11,5	225	35	20	115	-75	-44	84	-106	-62
26/12/2015	150	8,2	283	133	77	132	-18	-10	107	-43	-25
28/12/2015	190	30,8	118	-72	-42	78	-112	-65	41	-149	-86
04/01/2016	210	11,2	230	20	11	116	-94	-54	86	-124	-72
19/01/2016	320	6,2	341	21	12	148	-172	-100	131	-189	-110
09/02/2016	95	22,8	144	49	28	88	-7	-4	51	-44	-25
29/02/2016	125	13,4	204	79	46	108	-17	-10	75	-50	-29
Média <sup>2</sup>	172	16,2	232	60	34	115	-57	-33	87	-85	-49
Média  EAi  <sup>3</sup>	...	...	...	72	...	...	58	...	...	85	...
Média  ERi  <sup>4</sup>	...	...	...	...	42	...	...	34	...	...	49

Nota: <sup>1</sup> representa a intensidade de precipitação, obtida por  $[Pt/tPt \times 60]$ ; <sup>2</sup> os valores de tc, EA e ER expostos para cada equação empírica foram calculados em função dos dados médios de tc (172 min) e i (16,2 mm h<sup>-1</sup>); <sup>3</sup>, <sup>4</sup> os valores médios expostos provêm do cálculo de EA e ER a partir dos valores estimados de erro absoluto e relativo, de cada data, em módulo

Em relação aos resultados obtidos pelas equações da Onda Cinemática e de McCuen (Tabela 7), nota-se que as duas tenderam a subestimar os valores do tempo de concentração para a bacia experimental. Contudo, é possível perceber também, que a equação da Onda Cinemática se mostrou mais precisa do que a de McCuen, com erros absolutos e relativos dos tempos de concentração menores, quando comparados com aqueles obtidos em cada hidrograma. Essa condição se refletiu no resultado dos erros médios absoluto e relativo, oriundos dos erros individuais em módulo. Neste caso, é possível perceber a superioridade da equação da Onda Cinemática em relação aos

modelos de Izzard e McCuen, onde a primeira alcançou erros absoluto e relativo, respectivamente, de 58 min e 34%, contra 72 min e 42% e 85 min e 49%.

Por outro lado, se forem utilizados para a estimativa de  $t_c$  os valores médios de intensidade da precipitação obtidos na bacia experimental até o momento, as equações da Onda Cinemática e de McCuen mostraram-se piores do que a de Izzard.

Nesse sentido, nas situações onde não se dispõe de dados da intensidade da chuva para a estimativa do  $t_c$  da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, a equação empírica recomendável é a de SCS Lag. Contudo, quando se dispuser de dados de intensidade da chuva, e desejar conhecer o comportamento do  $t_c$  da bacia frente a um evento específico, a equação que se recomenda é a da Onda Cinemática. No entanto, este estudo abrangeu poucos eventos de chuva e pouco tempo de avaliação, o que impõe cautela na utilização dessas informações.

#### **4.5 Ajuste de uma equação para estimativa do $t_c$ na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória**

Foram obtidas informações do total precipitado ( $P_t$ ), da precipitação efetiva ( $P_{ef}$ ), das intensidades das precipitações total ( $i$ ) e efetiva ( $iP_{ef}$ ) e dos tempos de duração das precipitações total ( $tP_t$ ) e efetiva ( $tP_{ef}$ ). Após isso, todas essas variáveis foram correlacionadas com os tempos de concentração obtidos na bacia experimental, por meio do coeficiente de correlação de postos de Spearman. Os resultados deste teste para as variáveis  $P_t$ ,  $P_{ef}$ ,  $tP_t$  e  $tP_{ef}$  estão explicitados na Tabela 5.

Em relação às variáveis  $i$  e  $iP_{ef}$ , os resultados do teste de correlação de Spearman também foram bons, com valores de 0,74 e 0,78, respectivamente. Importa destacar que essa correlação também apresentou significância pelo teste  $t$ , considerando um nível de 5% de probabilidade, com  $p$ -valor de 0,0054 e 0,0014, respectivamente para a intensidade da precipitação total ( $i$ ) e intensidade da precipitação efetiva ( $iP_{ef}$ ).

Após isso, todas essas variáveis (12 valores, um para cada hidrograma), com exceção do  $tP_{ef}$  a qual não apresentou qualquer correlação com o  $t_c$ , foram trabalhadas no software SigmaPlot 12.0, juntamente com os tempos de concentração contidos na Tabela 5, no intuito de encontrar um modelo matemático que melhor representasse o  $t_c$  da bacia experimental. Diversas combinações foram avaliadas, contudo, o modelo de regressão que foi aprovado em todos os testes estatísticos impostos neste trabalho está explicitado na Equação 40.

$$tc_{BHEG} = 243,230 + 0,509 \cdot Pt + 92,609 \cdot \text{Log}(iPef) \quad [\text{Eq.40}]$$

Onde:

$tc_{BHEG}$  = tempo de concentração estimado por meio de um modelo de regressão ajustado para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em min;

Pt = precipitação total, em min;

$\text{Log}(iPef)$  = logaritmo da intensidade da precipitação efetiva, em mm.

A Equação foi submetida aos critérios estatísticos impostos neste trabalho e os resultados estão explicitados na Tabela 8. Analisando a citada tabela, nota-se que todos os quesitos estatísticos foram atendidos. Além disso, observa-se também, o baixo erro padrão da estimativa (EPE), com valor de 38 min, indicando que o valor estimado pela Equação 40 possui uma margem de erro de 38 min para mais ou para menos.

Não obstante, ressalta-se também que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) com valor de 0,76 indica que o modelo de regressão é útil, quando se consideram dois regressores (Pt e  $\text{Log}(Pef)$ ) e o universo amostral como sendo doze. Neste caso, por meio da função Beta disponível no Excel ( $BETA.ACUM.INV(1-\alpha; k/2; (n-k-1)/2)$ ), com nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 0,05, número de regressores (k) como sendo 2 e universo amostral (n) igual a 12, o mínimo valor de  $R^2$  para considerar o modelo de regressão útil seria de 0,49 ou acima.

Tabela 8 - Resumo dos resultados estatísticos da equação do tc ajustada para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego do Glória

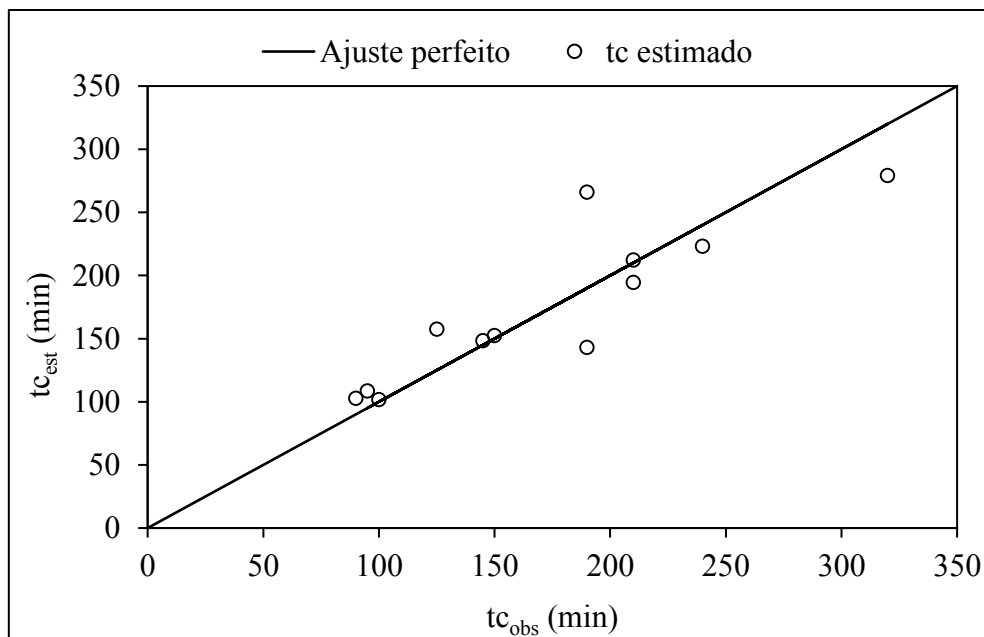
Fonte de variação	Coefficiente	t	p-valor	W <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	EPE (min)
Constante	243,230	3,969	0,003			
Pt	0,509	2,554	0,031	0,271	0,76	38
$\text{Log}(Pef)$	92,609	2,422	0,038			

Nota: <sup>1</sup> W representa o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Neste trabalho, valores de W acima de 0,05 indicam que os resíduos da regressão foram aprovados no teste de normalidade de Shapiro-Wilk

No intuito de demonstrar o comportamento dos dados de tc estimados ( $tc_{est}$ ) pela Equação 40, frente aos dados reais de tc observados ( $tc_{obs}$ ) na bacia em estudo, foi elaborado um gráfico (Figura 27) por meio do qual pode-se verificar visualmente o bom

resultado da equação proposta neste trabalho. Analisando a citada figura, nota-se que os valores de  $t_c$  estimados pela equação, em sua maioria, se alinham sobre ou nas proximidades da linha contínua, a qual representa a reta 1:1. Quando o  $t_c$  estimado está em cima da reta, indica que este resultado é igual ao  $t_c$  observado. Neste caso, uma condição de ajuste perfeito.

Figura 27 - Resultado das estimativas de  $t_c$  pela Equação 40 frente ao resultado teórico perfeito



Mota (2012) também ajustou um modelo matemático para estimativa do tempo de concentração em uma pequena bacia hidrográfica no Rio Araponga, município de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina. Neste trabalho, as variáveis que proporcionaram os melhores ajustes foram a vazão de pico e o índice de precipitação antecedente de 21 dias. A autora testou outras variáveis hidrológicas também, como tempo de duração e altura da chuva e intensidade máxima da chuva.

Apesar da intensidade máxima da chuva não ter contribuído na geração do modelo de regressão para estimativa do  $t_c$  no trabalho de Mota (2012), McCuen et al. (1984) relata que a intensidade da chuva é um fator importante para determinação do  $t_c$ , pois possui uma forte correlação com o tempo de concentração.

Além dos quesitos estatísticos, a equação para estimativa do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (Equação 40), também foi submetida ao teste do coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $C_{NS}$ ). Neste trabalho, o

$C_{NS}$  foi usado para avaliar a eficiência do modelo de regressão proposto em estimar o tempo de concentração na bacia experimental.

Para a realização do teste de Nash-Sutcliffe foram utilizados dados de  $t_c$  observados em cinco hidrogramas (Tabela 9), dos dezessete obtidos neste trabalho. Ressalta-se que estes cinco não fizeram parte daqueles doze hidrogramas usados no ajuste da Equação 40.

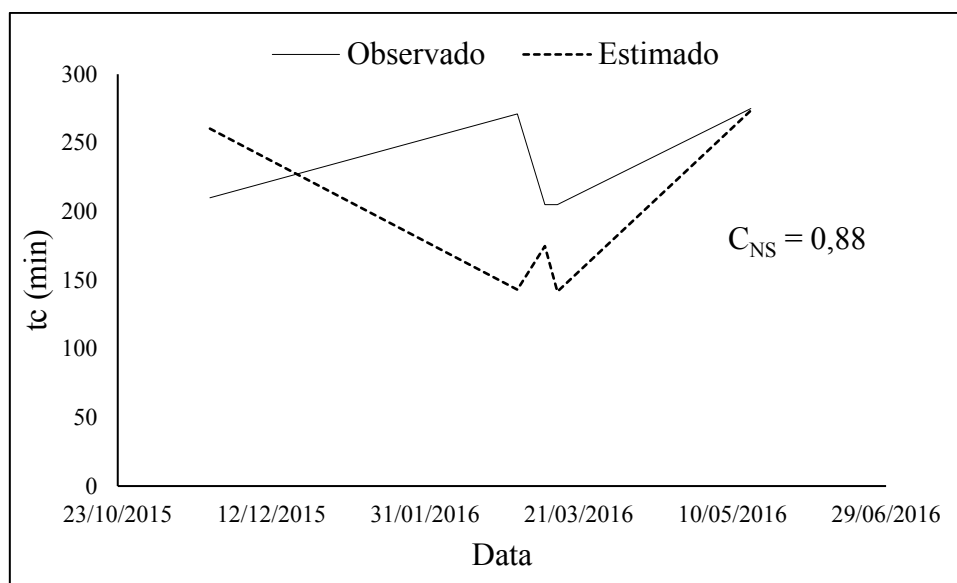
Tabela 9 - Tempos de concentração observados ( $t_{c_{obs}}$ ) em cinco hidrogramas e tempos de concentração estimados pela Equação 40 ( $t_{c_{est}}$ ), na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

<b>Data do hidrograma</b>	<b><math>t_{c_{obs}}</math> (min)</b>	<b><math>t_{c_{est}}</math> (min)</b>
22/11/2015	210	260
01/03/2016	271	143
10/03/2016	205	175
14/03/2016	205	142
16/05/2016	275	274

O resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe está explicitado na Figura 28. Analisando a citada figura nota-se um bom ajuste, com  $C_{NS}$  de 0,88. Segundo Gotschalk et al. (1999) este resultado classifica o modelo de regressão proposto neste trabalho como Adequado/Bom. Por outro lado, Santhi et al. (2001) indicam que valores de  $C_{NS}$  maiores do que 0,65 classificam o modelo como Muito Bom.

Contudo, é importante frisar que a quantidade de hidrogramas analisados nesta fase do trabalho (cinco apenas) é pequena. Neste caso, o resultado do  $C_{NS}$  pode não se confirmar caso o número de hidrogramas para comparação seja aumentado.

Figura 28 - Resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS) aplicado ao modelo de regressão proposto neste trabalho, para a estimativa do  $t_c$  na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



## 5 CONCLUSÃO

- O tempo de concentração mínimo, médio e máximo encontrado na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória foram, respectivamente, de 90, 172 e 320 minutos;
- Nas situações onde não se dispõe de dados de intensidade da chuva para a estimativa do  $t_c$  na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, a equação empírica recomendável é a de SCS Lag. Contudo, quando se dispuser de dados de intensidade da chuva, e desejar conhecer o comportamento do  $t_c$  da bacia frente há um evento de chuva específico, a equação que se recomenda é a da Onda Cinemática;
- A equação para estimativa do  $t_c$  na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória ( $t_{cBHEG}$ ) mostrou-se consistente, com boa precisão e apresenta duas variáveis hidrológicas: a precipitação total ( $P_t$ ) e o logaritmo da intensidade da precipitação efetiva ( $\text{Log}(i_{Pef})$ ). Sua parametrização é a seguinte:  
$$t_{cBHEG} = 243,230 + 0,509 \cdot P_t + 92,609 \cdot \text{Log}(i_{Pef}) \text{ com } R^2 = 0,76 \text{ e } C_{NS} = 0,88.$$

## REFERÊNCIAS

- AKAN, A. O. Time of concentration formula for pervious catchments. **J. Irrig. Drain Eng.**, [S.l], v.115, n.4, p.733-735,1989.
- AMANTHEA, N.R.; NASCIMENTO, N.O. Urbanização de baixo impacto (LID): Uso de geotecnologias para estimativa do tempo de concentração de bacia em cenário de pré-desenvolvimento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n.1, p. 249 – 266, jan. /mar, 2015.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p.1046 - 1049, 2010.
- ALMEIDA, I.K.; ALMEIDA, A.K; ANACHE, J. A.; et al.. Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review. **Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 4, p.661-671,2014.
- ALMEIDA, I.K.; ANACHE, J.A.A.; ALMEIDA, V.R. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS,20., Bento. **Anais...**, Bento Gonçalves-RS.
- ANDRADE, M.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.17, n.1, p.69–76, 2013.
- BARBOSA, A. M.; FILL, H. D. Modelo de Previsão de Vazão Baseado no Hidrograma Unitário. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l], v.6, n.4, p. 165-174, out/Dez 2001.
- BUTLER, S.S.; Overland-flow travel time versus reynolds number. **J.Hydrol.**,[S.l], v.32, n.1-2, p. 175-182, 1977.
- BORGES, E.B.M.; PINA, N. V. M.; NASCIMENTO, C. F.; et al. **Confecção e calibração de pluviômetro alternativo como subsídio à medição de precipitação**. Universidade Federal da Bahia UFBA/ICADS: Barreiras/BA, 2012.
- BOSZNAY, M. Generalization of SCS curve number method. **J. Irrig. Drain Eng.**, [S.l], v. 115, n.1, p. 139-144, 1989.
- BRITO, J. L. S.; ROSA, R. Elaboração do Mapa de Solos da Bacia do Rio Araguari na Escala de 1: 500.000. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOGRAFIA “PERSPECTIVAS PARA O CERRADO NO SÉCULO XXI”, Universidade Federal de Uberlândia – Instituto de Geografia, 28., Uberlândia. **Anais...**, Uberlândia -MG.

BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. Bureau of Rural Sciences; Australian Government; Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. **International Association of Hydrogeologist Conference**. Camberra, p. 13, 2005.

BRUNO, A.M.A.; et al.. Análise do Tempo de concentração em Função das Características Fisiográficas em Bacias Urbanas. In: **XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011**.

CHAVES, H.M.L.; PIAU, L.P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. **R. Bras. Ci. Solo**, [S.l], v,33, p. 333-343, 2008.

CHEN, C. N.; WONG, T.S.W. Critical rainfall duration for maximum discharge from overland plane. **J. Hydraul. Eng.**, [S.l], v.119, n.9, p. 1040-1045, 1993.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: Mc Graw-Hill Publishing Company, 1988. 572p.

CUNHA, S.F.; SILVA, F.E.O.; MOTA, T.U.; et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n.4, p. 837 – 848, out. /dez., 2015.

DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA F.A.C.; TERRA, V.S.S. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.14, n.1, p.46–54, 2010.

DESBORDES, M.; RAOUS, P. Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques. **La houille blanche**, [S.l], n.1, p. 37-43, 1976.

DINGMAN, S.L. **Physical Hydrology**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646p.

DURANT, P. C. **Avaliação do tempo de concentração da bacia hidrográfica experimental do córrego do glória, em Minas Gerais**.30f, 2016. Monografia do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2016.

EAGLESON, P. S. **Dynamic hydrology**. New York. McGraw-Hill, 462 p., 1970.

ELI, R.N.; LAMONT, S.J. Curve Numbers and Urban Runoff Modeling - Application Limitations. **Low Impact Development: Redefining Water in the City**, [S.l], p.405-418, 2010.

FANG, X.; THOMPSON, D.B.; CLEVELAND, T.G. Time of concentration estimated using watershed parameters determined by automated and manual methods. **J. Irrig. Drain Eng.**, [S.l], v.134, p. 202-211, 2008.

- FARRELL, D. Experimental watersheds: A historical perspective. **J.Soil Water Conserv.**,[S.l], v.50, n.5, p. 432-437, 1995.
- FUREY, P. R.; GUPTA, V. K. A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. **Water Resources Research**,[S.l], v. 37, n. 11, p. 2709-2722, 2001.
- FREEZE, R.A. Streamflow generation. **Rev. Geophys.**, v.12, n.4, p.627-647, 1974.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l], v.11, n.4, p. 99-108, out/dez 2006.
- GENOVEZ, A.M. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- GONZALES, A. L.; et al. Comparison of different base flow separation methods in a low land catchment. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [S.l], v. 6, p. 3483-3515, 2009.
- GOTTSCHALK, L.; et al..Scale aggregation:Comparison of flux estimates from NOPEX. **Jounal of Agricultural and Forest Meteorology**, [S.l], v.98-99, p.103-120,1999.
- HATHAWAY, G.A. Design of drainage facilities. **ASCE transactions**, [S.l], v.110, p. 697-730, 1945.
- HEJDUK, L.; HEJDUK, A.; BANASIK, K. Determination of Curve Number for snowmelt-runoff floods in a small catchment. **International Association of Hydrological Sciences**, [S.l], v. 370, p.167–170, 2015.
- 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.
- HORN, J.F.C.; SILVEIRA, G.L. Monitoramento fluviométrico de duas bacias hidrográficas vizinhas: comparação de vazões em períodos concomitantes. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n.3, p. 809 – 81, jul. /set. 2015.
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans.Am. Geophys. Union**, v.14, p. 446-460, 1933.
- HOTCHKISS, R.H.; McCALLUM, B.E. Peak discharge for small agricultural watersheds. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S.l], v. 121, p. 36-48, 1995.
- HUANG, M.; ZHANG, L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. **Hydrol. Process.**, [S.l], v. 18, p. 1885-1898, 2004.
- JEANS, S. W.; McPHERSON, M. B. Hydrology of urban areas. In: CHOW, V. T. (Org.). **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, section 20, p. 8, 1964.
- KIBLER, D. F. Desk-top methods for urban stormwater calculation. Urban stormwater hydrology, American Geophysical Union, **Water Resources Monograph**,[S.L], v. 7, p. 87–135, 1982.

KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **J. of Civ. Eng.**, v.10, n.6, p. 362, 1940.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.F.; SILVA, R.V. Estimativa morfométrica e hidrológica do tempo de concentração na bacia do campus da UFSC, Florianópolis - SC. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba: UFPR, 2006, p. 1-11

KULANDAISWAMY, V.C.; SEETHARAMAN, S. A note on Barnes' method of hydrograph separation. **J. Hydrol.**, [S.l.], v.9, n.2, p.222-229, 1969.

LEGATES, D.R.; McCABE, G.J. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, [S.l.], v.26, n.1, p.69-86, 1999.

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

LINSLEY, R.K.; ACKERMANN, W.C. Method of predicting the runoff from rainfall. **Trans. ASCE**, [S.l.], v.107, n.1, p. 825-846, 1942.

LOUKAS, A. & QUICK, M.C. Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. **Hydrol. Sci. J.**, v.41, n.1, p.119, 1996.

MAIA, A.L.; AMARAL, I. R.; VERSANI, B.R. Metodologia DPFT de Identificação do Hidrograma Unitário e das Precipitações Efetivas: Estudo de Caso para a Bacia Hidrográfica de Juatuba – MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v. 11, n.1, p.79-90, Jan/Mar 2006.

MANTHEA, N.R.; NASCIMENTO, N.O. Urbanização de baixo impacto (LID): Uso de geotecnologias para estimativa do tempo de concentração de bacia em cenário de pré-desenvolvimento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n.1, p. 249 – 266, jan. /mar. 2015.

MATA-LIMA, H.; SILVA, E.; RAMINHOS, C. Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p.97- 109, 2006.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J. et al.. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n.3, p. 525-536, jul. set., 2007.

McCUEN, 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.

McCUEN, R.H. **Hydrologic analysis and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

McCUEN, R.H.; SPIESS, J.M. Assessment of Kinematic Wave Time of Concentration, **J. Hydraul. Eng.**, [S.l.], v. 121, n. 3 p. 256-266, 1995.

MELLO, A. J. Q. **Rios e chuvas do Brasil: novos métodos e tabelas de hidrologia**, Edição do Autor, Imprensa Editora A M. Cavalcante Cia Ltda, Curitiba, Paraná, 1973.

- MELLO, C.R.; SILVA, A.M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Ed. UFLA, 2013, 455p.
- MENEGASSE, L.; GONÇALVES, J.; FANTINEL, L. Disponibilidades hídricas na província cárstica de Arcos-Pains Doréopolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Águas Subterrâneas**, América do Norte, v. 16, 2002.
- MILLER, C.R.; VIESSMAN, W. JR. Runoff Volumes from Small Urban Watersheds. **Water Resources Research**, [S.l], v.8, n.2, abr. 1972.
- MIRANDA, A.C.R. **Métodos de Separação dos Escoamentos Superficial Direto e Subterrâneo: Estudo de Caso para a Bacia do Rio das Velhas**. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- MIRANDA, A.C.R.; PRUSKI, F.; MARTINEZ, M.A.; 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. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.4, p.1121-1131. 1990.
- MOL, J. M. D. **Estimativa de precipitação por meio de sensoriamento remoto**. 88p, 2005, Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília/DF, 2005.
- MOPU Tecnologia Carreteras, 1987, **Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales**, Textos de la Direccion General de Carreteras, n. 12, Espanha, 124 p.
- 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.; KOBAYAMA, 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.
- NETTO, A.J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; et al.. **Manual de hidráulica**. 8 Ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, p. 669, 1998.
- OGBONNA, S.U. Formula for the Time of Concentration of Runoff. **J. Hydraul. Eng.**, [S.l], v. 130, n.6, p. 576-579, 2004.
- OLIVEIRA, L.F.C.; FIOREZE, A.P. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.1, p.9–15, 2011.

OLIVEIRA, P. C. A. **Diagnóstico Ambiental e Análise da Fragilidade do Relevo da Bacia Hidrográfica do Córrego Pindaíba, Uberlândia - Minas Gerais**. 65p, 2006. Monografia (Graduação em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

OLIVEIRA, P.C.A.; TIRADENTES, L. Análise Espacial da Bacia Hidrográfica do Córrego do Glória, Uberlândia – MG, **Revista Ponto de Vista**, [S.l], v. 3, p. 41 -52, 2006.

PEREIRA, M.A.F.; CAMPO, G.F.N.; KOBAYAMA, M.; et al.. Regionalização com geometria hidráulica e fractal: estudo de caso com hidrograma unitário instantâneo geomorfológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.21, n.2, p. 347-359, abr./jun, 2016.

PETTYJOHN, W.A.; HENNING, R. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. **Water Resources Center Project Completion**, [S.l], n. 552, p. 323, 1979.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

PINTO, N. S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L.S., 1976, **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgar Blücher, 278p.

PLANO **Diretor de Recursos Hídricos: bacia hidrográfica do rio das Velhas: Resumo executivo**. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte, 2005, 288 p.

PONCE, V.M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.l], p. 11-19, jan., 1996.

PORTO, M.F.A.; PORTO, R.L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, São Paulo, v.22, n.63, 2008.

PORTO, R. L. L. Escoamento Superficial Direto. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (org.). Drenagem Urbana. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, p. 107-165, 1995.

PRIETO, E.C. **Os desafios institucionais e municipais para implantação de uma cidade universitária: o Câmpus Glória da Universidade Federal de Uberlândia**. 2005. 274f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

PRUSKI, F.F.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.5, n.2, p.301-307, 2001.

SAMPAIO, S.C.; CORRÊA, M.M.; BÔA, M.A.V., 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.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; et al.. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, v.37, p.1169-1188, 2001.

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

SARTORI, A.; NETO, F.L.; GENOVEZ, A.M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l], v 10, n.4, p 19-29, Out/Dez 2005.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method, *Eng. News Rec.*, [S.l], v. 108, n. 14, p. 501-506, 1932.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; 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.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em Bacias Urbanas e Rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l], v. 10, n. 1, p. 5-23, Jan/Mar 2005.

SILVEIRA, A.L.L. Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21, n.1, p. 46 – 52, jan. /mar. 2015.

SILVEIRA, G. M. **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. 2010.243 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. Pennsylvania: **U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040**, p.46, 1996.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. Springfield: United States Department of Agriculture, 1986.

SOUZA, F.A.O.; SILVA, C.L.; MAGGIOTTO, S.R.; et al.. Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v.16, n.1, p.10–17, 2012.

TOMAZ, P. **Infiltração usando o Método do número da curva CN do SCS**. 22/8/2011.Disponível

em:<[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro\\_infiltracao/capitulo128.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_infiltracao/capitulo128.pdf)> Acesso em:22 jun. 2016.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. EDUSP. Editora da UFRGS, ABRH, p.952,1993.

- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 943p, 2001.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2005.
- TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2014.
- TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, Jan/Mar 2000.
- TUCCI, C. E. M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l], v. 8, n.2, p. 195-199, abr/jun 2003.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n.1, p.135-152, jan/jun 1997.
- VIOLA, M.R; MELLO, C.R.; ACERBI, F.W. Jr; et al.. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.13, n.5, p.581–590, 2009.
- WONG, T.S.W. Assessment of Time of Concentration Formulas for Overland Flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S.l], v.131, n.4, p. 383-387, jul. /ago, 2005.
- WONG, T. S. W. Evolution of Kinematic Wave Time of Concentration Formulas for Overland Flow. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.l], v. 14, n. 7, 2009.
- YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Rev. adm. Púb.**, [S.l], v.27, n.2, p.5-18, 1993.
- YOO, C.; LEE, J.; PARK, C. Method for Estimating Concentration Time and Storage Coefficient of the Clark Model Using Rainfall-Runoff Measurements. **J. Hydrol. Eng.**, [S.l], v.19, n.3, p. 626-634, mar. 2014.
- YOUNG, C.B.; McENROE, B.M. Calibration of Runoff Curve Numbers for a Small Urban Watershed. **World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries**, 2012.
- ZAPPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2002. 167p. Tese Doutorado.
- ZHANG, H. G.; FU, S. H.; FANG, W. H.; et al.. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, [S.l], v.50, p.911-918, 2007.