

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

HIDROGRAMAS DE CHEIA EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NO CERRADO
MINEIRO

NATÁLIA GONÇALVES MENDES

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

NATÁLIA GONÇALVES

HIDROGRAMAS DE CHEIA EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NO CERRADO
MINEIRO

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
2018

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

M538h Mendes, Natalia Gonçalves, 1992-
2018 Hidrogramas de cheia em duas bacias hidrográficas no cerrado
mineiro / Natalia Gonçalves Mendes. - 2018.
75 f. : il.

Orientador: Hudson de Paula Carvalho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1310>
Inclui bibliografia.

1. Qualidade Ambiental - Teses. 2. Hidrologia - Teses.
3. Infiltração - Teses. 4. Escoamento - Teses. I. Carvalho, Hudson de
Paula. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 574

NATÁLIA GONÇALVES MENDES

HIDROGRAMAS DE CHEIA EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NO CERRADO
MINEIRO

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”.

Uberlândia, 16 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Osvaldo Rettore, UFU/MG

Prof. Dr. Júlio César Neves dos Santos , IFTM/MG

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho, UFU/MG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar força e capacidade para que este trabalho se tornasse possível.

Aos meus pais, pelo apoio, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem quando precisei ao longo dessa caminhada.

Ao Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho, pela orientação, pela tranquilidade, por compartilhar seus conhecimentos, sua experiência profissional e pessoal durante toda a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, especialmente à Letícia pela parceria e trocas de conhecimentos ao longo do mestrado.

À técnica, Márcia Batistela, pela ajuda em campo, disponibilidade, além dos momentos de descontração tão necessários.

Aos meus amigos, pelo incentivo, especialmente à Natália e ao Lucas, pelo companheirismo ao longo desses dois anos, pela torcida, pelos momentos de diversão e por estarem sempre presentes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Bacia Hidrográfica	13
2.2 Vazão Máxima	14
2.3 Hidrograma Unitário.....	15
2.4 Método Soil Conservation Service	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Área de Estudo	22
3.1.1 Bacia Experimental do Córrego Glória	22
3.1.2 Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha	24
3.2 Material Cartográfico e imagem de Satélite	26
3.3 Monitoramento hidrológico da Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha	27
3.3.1 Dados Pluviométricos.....	27
3.3.2 Dados de nível dos Córregos Água Vermelha e Glória.....	30
3.3.3 Obtenções das curvas chaves nas seções de controle das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha	31
3.4 Hidrogramas observados	34
3.4.1 Estimativa do Escoamento Superficial	34
3.4.2 Determinação da precipitação efetiva.....	37
3.4.2.1 Estimativa da precipitação efetiva pelo índice ϕ	38
3.4.2.2 Estimativa da precipitação efetiva pelo SCS	40
3.5 Convolução do Hidrograma	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Eventos de chuva e vazão.....	57
4.2 Hietogramas de chuva efetiva pelo índice ϕ	48
4.3 Relações entre a duração e a Intensidade da Chuva	48
5. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Número CN para áreas urbanas (USDA, 1986)	18
TABELA 2: Número CN áreas agrícolas (USDA, 1986)	19
TABELA 3: Número CN para outras áreas em geral (USDA, 1986)	20
TABELA 4: Coordenadas geográficas das estações fluviométrica e meteorológica localizadas na BHEGL.	22
TABELA 5: Características fisiográficas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.	22
TABELA 6: Coordenadas geográficas das Estações Fluviométrica e Meteorológica localizadas na BHEAV.	25
TABELA 7: Características da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha. .	25
TABELA 8: Tipos de cobertura com seus respectivos valores do número da curva (CN) da BHEGL.	44
TABELA 9: Tipos de cobertura com seus respectivos valores do número da curva (CN) da BHEAV.	45
TABELA 10: Exemplo de cálculo do hidrograma unitário por meio da convolução.	46
TABELA 11: Informações relacionadas à chuva e ao escoamento na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), em cada hidrograma.	48
TABELA 12: Informações relacionadas à chuva e ao escoamento na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), em cada hidrograma.	48
TABELA 13: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.	58
TABELA 14: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS- ϕ , bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.	58
TABELA 15: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS modificado, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.	59
TABELA 13: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.	60

TABELA 14: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS- ϕ , bem como seus respectivos erros absoluto e relativo..... 61

TABELA 15: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS modificado, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo..... 61

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, das estações hidrométrica e meteorológica.	23
FIGURA 2: Mapa de solos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG.....	24
FIGURA 3: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, assim como da estação hidrométrica e pluviométrica.	25
FIGURA 4: Mapa de tipos de solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, Uberlândia – MG.	26
FIGURA 5: Estação meteorológica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	27
FIGURA 6: Estação hidrométrica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha	28
FIGURA 7: Estação pluviométrica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha	29
FIGURA 8: Sensor de nível instalado na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória..	30
FIGURA 9: Sensor de nível instalado na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha	31
FIGURA 10: Ilustração do método de Simpson para o cálculo da área da seção dos córregos....	32
FIGURA 11: Curva chave do córrego Água Limpa.....	34
FIGURA 12: Curva chave do Córrego Glória.....	33
FIGURA 13: Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (adaptado de MELLO e SILVA, 2013)	35
FIGURA 14: Uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL). ...	43
FIGURA 15: Uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV).....	44
FIGURA 16: Hietogramas de chuva total e o índice ϕ de cada evento ocorrido na BHEGL.	50
FIGURA 17: Hietogramas de chuva total e do índice ϕ de cada evento ocorrido na BHEAV.....	53
FIGURA 18: Hidrogramas observados na seção de controle da BHEGL e hidrogramas estimados pelos métodos SCS- ϕ e SCS modificado	63
FIGURA 19: Hidrogramas observados na seção de controle da BHEGL e hidrogramas estimados pelos métodos SCS- ϕ e SCS modificado	66

RESUMO

MENDES, NATÁLIA GONÇALVES. **Hidrogramas de cheia em duas bacias hidrográficas em Uberlândia-MG**. p.74.2018. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG

O monitoramento dos recursos hídricos vem aumentando nos últimos anos em bacias de grande e médio porte as quais possuem um banco de dados extenso de vazão e precipitação. Sendo nessas bacias onde ocorrem os principais aproveitamentos hídricos do país. Em contra partida, o monitoramento hidrológico nas pequenas bacias são escassos o que dificulta a pesquisa relacionada à chuva e à vazão. Há diferentes métodos ou modelos para a estimativa vazão máxima e hidrogramas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estimar a vazão máxima através de hidrogramas decorrentes de dois métodos de precipitação efetiva, sendo pelo índice ϕ e SCS, nas Bacias Hidrográficas dos Córregos Glória e Água Vermelha, ambas situadas em Uberlândia – MG. Além disso, o trabalho objetivou comparar os resultados obtidos por meio destes métodos com os valores de vazões máximas observadas em onze hidrogramas obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória e nove hidrogramas na Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha. Os resultados provenientes dos hidrogramas nas duas bacias mostraram que o método do hidrograma unitário triangular do SCS superestimou os resultados de vazão de pico nas bacias estudadas, resultado em erros relativos médios de mais de 666,89%. Quando se utilizou a precipitação efetiva estimada pelo índice ϕ , no lugar da precipitação efetiva estimada tradicionalmente pelo método HUT-SCS, os valores das vazões de pico se aproximaram daquelas medidas nas bacias estudadas, e o erro relativo médio ficou abaixo de 156%. Além disso, quando se utilizou o método da hidrógrafa unitária triangular do SCS, com ajuste in loco para o tempo de ascensão do hidrograma, os valores das vazões de pico estimadas se aproximaram daquelas medidas nas bacias estudadas, com erro relativo médio abaixo de 2,17%.

Palavras-chave: hidrógrafa unitária, método CN, escoamento superficial, índice ϕ

MENDES, NATÁLIA GONÇALVES. **Full-flow hydrograms in two hydrographic watershed in Uberlândia-MG.p. 73.2018. Dissertation** (Master in Environmental and Environmental Quality) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia – MG.

The monitoring of water resources has been increasing in recent years in large and medium-sized basins which have an extensive database of flow and precipitation and are also where the main water resources of the country occur. On the other hand, hydrological monitoring in small watersheds is scarce, which makes rain and flow research difficult. There are different methods that estimate the maximum flow rate as the hydrograph. In this context, the objective of this work is to estimate the maximum flow through hydrographs due to two methods of effective precipitation, being ϕ and SCS, in the Glória and Água Vermelha Watersheds, both located in Uberlândia - MG. The results obtained using these methods were compared with the maximum flow values observed in 12 hydrograms obtained in the Glória Stream Experimental Hydrographic Watershed and 13 hydrograms in the Água Vermelha Stream Experimental Watershed. The results from the hydrographs in the two watersheds show that, in general, the two models were able to adequately estimate the hydrographs due to the rainfall events analyzed, and it was commonly observed that the peak flow through the ϕ index and SCS was very close with that observed in the basins. It was observed a predominance of higher maximum precipitation intensities for the Glória Stream Experimental Hydrographic Watershed, because the rainfall duration in this basin was lower and thus helping to understand the reason ϕ index higher than those obtained in the Water Stream Experimental Hydrographic Watershed Água Vermelha.

Keywords: hydrological modeling, surface runoff, water resources

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, com o crescimento populacional; e o aumento das atividades urbanas e agrícolas, a preocupação relacionada com a disponibilidade da água vem crescendo. Este recurso é vital para a manutenção da vida e das atividades humanas. O impacto da sua escassez já está presente em diversas regiões do planeta. Diante disso, a gestão e o monitoramento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas de maneira aprofundada tornam-se extremamente necessária.

No Brasil e no mundo o monitoramento dos recursos hídricos vem aumentando nos últimos anos em bacias de grande e médio porte as quais possuem um banco de dados extenso de vazão e precipitação. Nessas bacias são onde constroem-se os principais aproveitamentos hídricos do país. Em contrapartida, os monitoramentos hidrológico em pequenas bacias são escassos, o que dificulta o entendimento dos processos relacionados à chuva e às vazões.

Neste contexto, vários pesquisadores estão buscando metodologias desenvolvidas em outros países, para principalmente estimativas de vazões. Contudo, esses locais possuem características de clima, precipitação, tipo e uso do solo diferentes das condições brasileiras. Assim, estas metodologias podem resultar em dados não confiáveis quando comparados com a realidade do nosso país.

A vazão máxima é um parâmetro importante a ser determinada em uma bacia hidrográfica. Normalmente, essas vazões ultrapassam os valores de deflúvio normais para a bacia. Este parâmetro hidrológico é primordial para o dimensionamento de estruturas hidráulicas como bueiros, vertedores, galerias de drenagem entre outros. A determinação da vazão máxima está relacionada diretamente com o escoamento superficial direto (ESD) e com o escoamento subterrâneo. O ESD corresponde à água que percorre superficialmente a bacia e é gerada pelo o excesso de chuva. Esse escoamento faz com que o nível do curso d'água aumente, podendo causar prejuízos de grande extensão, seja no ambiente rural ou no urbano.

O Hidrograma Unitário é uma metodologia bastante utilizada para estimativa da vazão em curso d'água. Este método foi introduzido por Sherman em 1932 e fundamenta-se na relação linear e diretamente proporcional entre o comportamento das vazões e as precipitações efetivas.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo estimar a vazão de pico em duas bacias hidrográficas experimentais, por meio da hidrógrafa unitária triangular do Soil Conservation Service (SCS), usando duas formas de estimativa da precipitação efetiva: o recomendado pelo SCS, em função do CN, e o índice ϕ . Além disso, foi proposta uma alteração no tempo de ascensão

do hidrograma unitário triangular do SCS, visando melhorar o desempenho desse modelo na conformação da hidrógrafa e na estimativa da vazão de pico. Por fim, os hidrogramas gerados e as vazões de pico estimadas foram comparadas com os hidrogramas e vazão de pico observadas nos hidrogramas das bacias experimentais estudadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bacia Hidrográfica

A Bacia Hidrográfica é uma área de captação natural de chuva em que o fluxo da sua rede de drenagem converge para um único ponto de saída da bacia, denominada como seção de controle ou exutório. A delimitação da bacia é feita a partir de seus limites geográficos, ou seja, normalmente são os pontos mais altos da bacia conhecidos como divisores de água.

Conforme TUCCI (2014), a bacia é considerada como um sistema físico em que a entrada é o volume de água precipitada e a saída é o volume de água escoado pelo exutório. Considera-se que a água precipitada, até chegar ao exutório, sofre algumas perdas ao longo do caminho, pois parte da água da chuva é interceptada pela vegetação, evapotranspirada e também infiltrada pelo solo.

A área de drenagem, perímetro, forma, declividade do rio, tipo e uso do solo são algumas características físicas da bacia hidrográfica que auxiliam nos estudos hidrológicos. Estas características podem ser obtidas por mapas, fotografias aéreas e imagens de satélites a partir de Sistemas de Informações Geográficas – SIG (SILVEIRA, 2010).

A pesquisa em pequenas bacias se reveste de grande importância, pois pode testar e validar modelos de previsão hidrológica como também a influência de diferentes usos do solo na determinação das vazões de pico, bem como ter um estudo mais detalhado de processos físicos, químicos e biológicos do regime hídrico das bacias. A pesquisa também surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água (ANDRADE et al., 2013).

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos, a bacia hidrográfica é considerada unidade territorial para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). O processo de gerenciamento e planejamento ambiental de bacia foi inicialmente direcionado à solução de problemas relacionados ao recurso água, priorizando o controle de inundações, irrigação, navegação, abastecimento público e industrial (FORBES e HODGE, 1971).

O gerenciamento na bacia hidrográfica é um grande desafio para as gerações presentes e futuras. As práticas de gestão de bacias hidrográficas são mudanças no uso da terra e cobertura vegetal, com o objetivo de reabilitar as terras degradadas e proteger os sistemas de solo e água (ALEMAYEHU et al., 2009)

Neste sentido, o aumento da demanda pelos recursos hídricos aumenta os impactos associados à bacia, como erosão do solo, perda da qualidade da água, sedimentação dos cursos d'água, entre outros. Portanto, verifica-se a necessidade de aplicar o gerenciamento e o planejamento dos recursos hídricos em longo prazo e o conhecimento dos parâmetros hidrológicos da bacia como o tempo de concentração, a precipitação, o escoamento superficial direto e a vazão máxima.

2.2 Vazão Máxima

A vazão é um parâmetro importante para os estudos hidrológico, sendo definida como o volume de água que passa por uma determinada seção transversal por unidade de tempo, a qual flui para um curso d'água variando no tempo e no espaço, ou seja, a vazão corresponde à taxa de escoamento. Por sua importância econômica e ambiental, a vazão é uma das variáveis hidrológicas mais estudadas (SANTOS, 2016).

De acordo com Pinto et al. (1976), a vazão máxima, conhecida como vazão de pico ou vazão de enchente, são vazões que excedem a capacidade normal das seções de escoamento nos cursos d'água, ou seja, vazões que ultrapassam os valores normais para determinada bacia. Já para Tucci (2014), vazão máxima é conceituada como um valor associado a um risco de ser igualada ou ultrapassada. Por isso sua associação a diferentes tempos de retorno ou de recorrência.

A determinação da vazão máxima é importante para as ações de controle e atenuação das cheias numa determinada área, dimensionamento de pontes, obras hidráulicas de drenagem urbana, perímetro de irrigação, diques e extravasores de barragens, entre outros (TUCCI, 2014). As vazões máximas possuem uma relação estreita com as alterações da cobertura do solo. Quando as ações humanas promovem afetam a infiltração da água da chuva pelo solo, normalmente aceleram o escoamento e a aumentam a vazão máxima nos cursos d'água.

Existem diferentes métodos para determinação da vazão máxima. Como exemplos: método Racional, método de Nakayasu, método SCS - Soil Conservation Service e método de Clark. O método Racional tem sido amplamente utilizado para estimar inundações em pequenas bacias hidrográficas rurais. O método de Nakayasu foi desenvolvido aplicando-se um hidrograma unitário adimensional, baseado no método de Horner e Flynt para estimar a vazão máxima em pequenas bacias urbanas do Japão (HORNER e FLYNT, 1936; JUNG e MOON, 2001; Lee et al., 2004). O

método SCS é amplamente utilizado para estimar inundações de projeto para pequenas e médias bacias hidrográficas. Já o método de Clark foi desenvolvido em 1945, em que a precipitação é matematicamente transportada para a saída da bacia hidrográfica através de dois componentes: um hidrograma de translação e a determinação de um reservatório linear (KANG. et.al, 2013).

As previsões das vazões máximas também podem ser com base no ajuste de uma distribuição estatística, na regionalização de vazões ou ainda com base na precipitação. As distribuições de probabilidade são ajustadas às séries históricas de vazões anuais ou parciais. Quando não possuem dados ou a série histórica é pequena, utiliza-se a regionalização de vazões ou de precipitações. Já a estimativa da vazão máxima por meio de precipitações é realizada através de modelos hidrológicos (TUCCI, 2014).

2.3 Hidrograma Unitário

O conceito de hidrograma unitário ou hidrógrafa hunitária - HU foi proposto inicialmente por Sherman (1932). Mais tarde, Snyder (1938) sugeriu uma HU sintética para previsão de enchentes com base em características geomorfológicas de drenagem da bacia. Kirpich (1940) e Clark (1945) também propuseram hidrogramas com metodologias diferentes. Posteriormente, o antigo serviço de conservação do solo dos Estados Unidos, conhecido como Soil Conservation Service (SCS), atualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS), desenvolveu uma metodologia para estimativa da hidrógrafa unitária, conhecida como hidrograma unitário triangular (HUT). Essa metodologia é muito usada atualmente no mundo inteiro.

O hidrograma unitário é a variação da vazão ao longo do tempo, o qual consiste em uma representação gráfica, colocando no eixo das abscissas o tempo, e no eixo das ordenadas o valor correspondente de vazão. Ele representa o comportamento hidrológico da bacia antes, durante e após os eventos de chuva, e tem como principal função, estimar o comportamento das cheias na bacia.

Para Chow (1964) o hidrograma unitário é resultante de uma unidade de excesso de precipitação uniformemente distribuída espacialmente e temporariamente sobre a bacia hidrográfica durante todo o período de excesso de precipitação especificado.

O conceito de HU sofreu muitas mudanças ao longo do tempo e é denominado como hidrograma unitário instantâneo (HUI), hidrograma unitário instantâneo geomorfológico (HUIG),

hidrograma unitário sintético (HUS) (BHUYAN et. al, 2015). Ainda segundo esses autores, ele se baseia na duração da chuva e nas propriedades de córrego e da bacia hidrográfica.

O hidrograma está relacionado com dois princípios fundamentais: o princípio da proporcionalidade e o princípio da superposição. O escoamento superficial é gerado por uma precipitação efetiva ocorrida em uma determinada duração. Como os hidrogramas de escoamento superficial estão relacionados com a precipitação efetiva de mesma duração, pode-se considerar que as ordenadas dos hidrogramas são proporcionais à intensidade da chuva efetiva (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). O princípio da superposição considera que os hidrogramas são gerados por sucessivas precipitações efetivas cada um com a mesma duração, e por meio da superposição dos hidrogramas é gerado um hidrograma resposta das precipitações efetivas.

O hidrograma pode ser caracterizado por três partes: a ascensão, a região de pico e recessão (TUCCI, 2014). De acordo com Mello e Silva (2013), a ascensão está relacionada com o início do ESD como resposta ao excesso de precipitação. A região de pico do hidrograma representa a vazão máxima que atinge a seção de controle após a ocorrência do escoamento. A região de recessão representa o término do ESD e o início do escoamento subterrâneo.

Por meio do hidrograma pode-se extrair vários parâmetros como a vazão de pico, o escoamento superficial direto e o escoamento subterrâneo. Estes parâmetros dependem das condições meteorológicas, hidrológicas e geomorfológicas, as quais influenciam diretamente no formato do hidrograma.

O conhecimento das características do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica é fundamental para a análise geoambiental da bacia e para a gestão dos seus recursos naturais (SANTOS et.al., 2013). O escoamento superficial que ocorre na bacia hidrográfica é influenciado por muitos fatores, como clima, geologia, topografia e vegetação (WARD e ROBINSON, 2000, KOMATSU et al., 2008a, SHINOHARA et al., 2009). As atividades humanas que alteram a cobertura do solo podem afetar o regime de escoamento em uma bacia hidrográfica (YUE e HASHINO, 2005, KOMATSU et al., 2008b, 2009b, YAO et al., 2009), o que, por sua vez, poderia alterar os riscos de seca e também aumentar os volumes escoados, ao mesmo tempo em que ocorre a redução do tempo de concentração, provocando assim hidrogramas de cheias cada vez mais críticos (CASTRO, 2013). A obtenção do escoamento superficial nas seções de controle das bacias é desafiadora, pois normalmente dependem de séries históricas longas e contínuas (POOL et.al, 2017).

O ESD é a água que escoar pela superfície da bacia hidrográfica até a seção de controle, provocado pelo excesso de precipitação, conhecida também como precipitação efetiva. Segundo Mello e Silva (2013), o ESD é em função da saturação do solo com redução da sua capacidade de infiltrar como também de armazenar água. A sua ocorrência se verifica quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração da água no solo. Já o escoamento subterrâneo é oriundo do acúmulo de água no aquífero que é responsável pela alimentação do curso d'água nos períodos de estiagem.

Há várias metodologias para a separação do escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo. Segundo Bosch et. Al. (2017) o método mais utilizado para a separação dos escoamentos é o método linear que consiste em traçar uma reta entre o ponto de ascensão (início do escoamento) até o ponto de recessão (fim do escoamento). O ESD fica acima dessa reta e o escoamento subterrâneo está abaixo da mesma.

2.4 Método SCS (Soil Conservation Service)

O método da Hidrógrafa Unitária Triangular - HUT ou método de Curva-Número (CN) foi apresentado pelo Soil Conservation Service - SCS, em 1972. Atualmente este método SCS é documentado pelo Manual Nacional de Engenharia dos Estados Unidos (NEH, 2018), e essa agência é denominada por Natural Resources Conservation Service (NRCS).

De acordo com Beskow et al. (2009), este método é bastante conhecido e aplicado para estimar o ESD tanto em eventos isolados de chuva quanto em modelos de simulação hidrossedimentológica.

Este método foi originalmente desenvolvido para facilitar a avaliação hidrológica das bacias hidrográficas na América do Norte sujeitos a mudanças no uso da terra, principalmente a urbanização (THOMAS e NISBET, 2016). Posteriormente o método foi generalizado para outros tipos de ocupação por utilizar poucos parâmetros, os quais estão relacionados com as características físicas da bacia. As vantagens deste método incluem sua simplicidade e o uso do número CN como um dos parâmetros (PONCE e HAWKINS 1996; BHUYAN et al. 2003).

Wilken (1978), McCuen (1984) e Genovez (2001), recomendam o modelo SCS para bacias com áreas menores do que 2.600 km². Contradizendo a menção anterior, Ramos (1999) considera o método pouco flexível em relação às constantes de atenuação de picos, por isso sugere que sua

aplicação para bacias com áreas entre 3 e 250 km². Foi concebida, sobretudo, para utilização em pequenas bacias, através de dados de bacias experimentais com vários tipos e uso do solo e técnicas de plantio (SALBEGO, 2015).

O principal parâmetro relacionado com este método é a determinação do CN ou número da curva. Os valores de CN podem ser consultados nas Tabelas 1, 2 e 3 publicadas pelo United States Department of Agriculture (USDA) e está relacionado com três fatores: grupo do solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente do solo (NEH, 2018).

TABELA 1: Número CN para áreas urbanas (USDA, 1986)

Tipo de cobertura do solo e condição hidrológica	Número da curva por grupo hidrológico de solo			
	A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desenvolvidas (vegetação estabelecida)				
Espaço aberto (gramados , parques, campos de golfe , cemitérios, etc.)				
Más condições (cobertura de grama 50%)	68	79	86	89
Condições razoáveis (cobertura de grama entre 50 e 75%)	49	69	79	84
Boas condições (cobertura de grama superior a 75%)	39	61	74	80
Áreas Impermeáveis				
Lotes pavimentadas de estacionamento , telhados , calçadas , etc.	98	98	98	98
Ruas e estradas				
Pavimentadas; calçadas e galerias pluviais	98	98	98	98
Pavimentadas, com valas abertas	83	89	92	93
Cascalho	76	85	89	91
Barro	72	82	87	89
Áreas Urbanas				
Áreas paisagísticas naturais (permeáveis)	63	77	85	88
Áreas paisagísticas artificiais (Barreira de plantas daninhas impermeável, arbusto do deserto com areia de 1 a 2 polegadas ou cascalho e as fronteiras da bacia)	96	96	96	96
Distritos Urbanos				
Área comercial	89	92	94	95
Área Industrial	81	88	91	93

Área residencial por tamanho do lote				
1/8 acre	77	85	90	92
1/4 acre	61	75	83	87
1/3 acre	57	72	81	86
1/2 acre	54	70	80	85
1 acre	51	68	79	84
2 acre	46	65	77	82
Áreas urbanas em desenvolvimento				
Áreas recentemente gradeadas	77	86	91	94

TABELA 2: Número CN áreas agrícolas (USDA, 1986)

(continua)

Descrição da cobertura			Número da curva por grupo hidrológico de solo			
Cobertura	Tratamento	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Alqueive	Solo descoberto	-	77	86	91	94
	Cobertura Vegetal	Pobre	76	85	90	93
		Boa	74	83	88	90
Culturas em fileiras	Linha reta	Pobre	72	81	91	98
		Boa	67	78	85	89
	Linha reta e cobertura vegetal	Pobre	71	80	87	90
		Boa	64	75	82	85
	Com curvas de nível	Pobre	70	79	84	88
		Boa	65	75	82	86
	Curvas de nível e cobertura vegetal	Pobre	69	78	83	87
		Boa	64	74	81	85
	Curvas de nível e terraços	Pobre	66	74	80	82
		Boa	62	71	78	81
	Curvas de nível, terraço e cobertura vegetal	Pobre	65	73	79	81
		Boa	61	70	77	80
Pequenos grãos	Linha reta	Pobre	65	76	84	88
		Boa	63	75	83	87

TABELA 2: CONT.

Linha reta e cobertura vegetal	Pobre	64	75	83	86
	Boa	60	72	80	84
Com curvas de nível	Pobre	63	74	82	85
	Boa	61	73	81	84
Curvas de nível e cobertura vegetal	Pobre	62	73	81	84
	Boa	60	72	80	83
Curvas de nível e terraços	Pobre	61	72	79	82
	Boa	59	70	78	81
Curvas de nível, terraço e cobertura vegetal	Pobre	60	71	78	81
	Boa	58	69	77	80

TABELA 3: Número CN para outras áreas em geral (USDA, 1986)

Descrição da cobertura	Condição Hidrológica	Número da curva por grupo hidrológico de solo			
		A	B	C	D
Pasto, pastagem, ou gama - contínuo forragem para pastagem	Pobre	68	79	86	89
	Razoável	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
Gramma de prado - contínua , protegido da pastagem e geralmente cortada para feno	-	30	58	71	78
Mistura de ervas daninhas, grama e vegetação rasteira	Pobre	48	67	77	83
	Razoável	35	56	70	77
	Boa	30	48	65	73
Matas com grama combinada (pomar ou fazenda com árvores)	Pobre	57	73	82	86
	Razoável	43	65	76	82
	Boa	32	58	72	79
Matas	Pobre	45	66	77	83
	Razoável	36	60	73	79

(continua)

TABELA 3: CONT.

	Boa	30	55	70	77
Quintas, pistas, calçadas em torno de lotes	-	59	74	82	86

São definidos quatro grupos do solo os quais estão relacionados com 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).

Para a determinação da cobertura do solo foram apresentados três grupos principais de cobertura do solo: áreas urbanas, áreas agrícolas e outras áreas em geral, incluindo áreas com vegetação original de diferentes estratos. Para o reconhecimento das classes da cobertura do solo nas áreas a serem estudadas no método HUT-SCS, os métodos mais comuns são o reconhecimento de campo, fotografias aéreas e mapas de uso do solo (NEH, 2018).

O método considera também a influência da umidade do solo antecedente – AMC ao evento de chuva, a partir de três classes em função da chuva acumulada nos cinco dias anteriores (P_5) (Nunes; 2015), sendo elas: AMC I, 0 a 13 mm; AMC II, 13 a 53 mm; e AMC III, superior a 53 mm. Recentemente, Michel et al. (2005) apontou várias inconsistências no procedimento de contagem da variação da umidade do solo com o antecedente de cinco dias que está por trás do método SCS-CN.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas experimentais, a Bacia do Córrego Glória e a Bacia do Córrego Água Vermelha.

3.1.1 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória - BHEGL é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari e se localiza na porção leste da cidade de Uberlândia – MG. O córrego Glória é afluente da margem direita do Rio Uberabinha, principal rio da cidade, que por sua vez é afluente do Rio Araguari (OLIVEIRA, 2006).

Na Tabela 1 estão reunidas as informações da localização geográfica das estações fluviométrica e meteorológica da bacia. Já na Tabela 2 estão compiladas as informações ligadas às características fisiográficas da bacia. A Figura 1 ilustra a localização da BHEGL, assim como a disposição das estações ao longo da bacia.

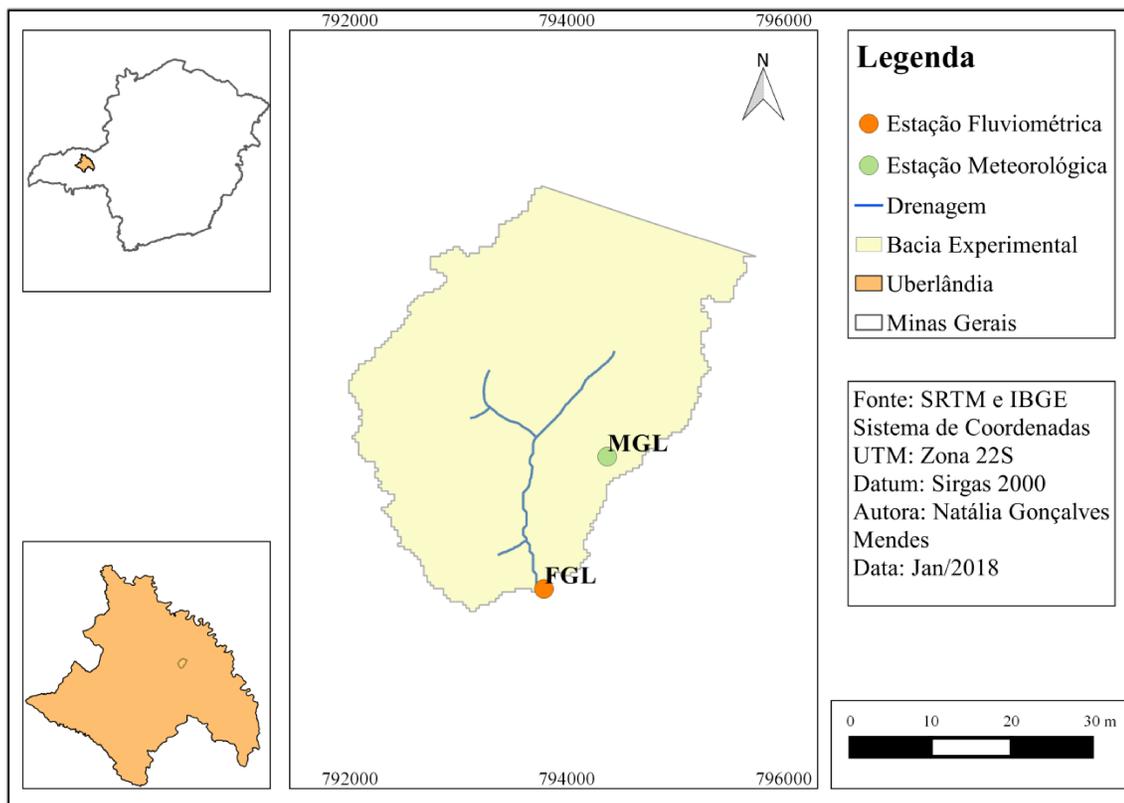
TABELA 4: Coordenadas geográficas das estações fluviométrica e meteorológica localizadas na BHEGL.

Estação	Latitude	Longitude
Fluviométrica	18°58'17,98" S	48°12'36,07" W
Meteorológica	18°12'16,8" S	48°12'16,8" W

TABELA 5: Características fisiográficas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.

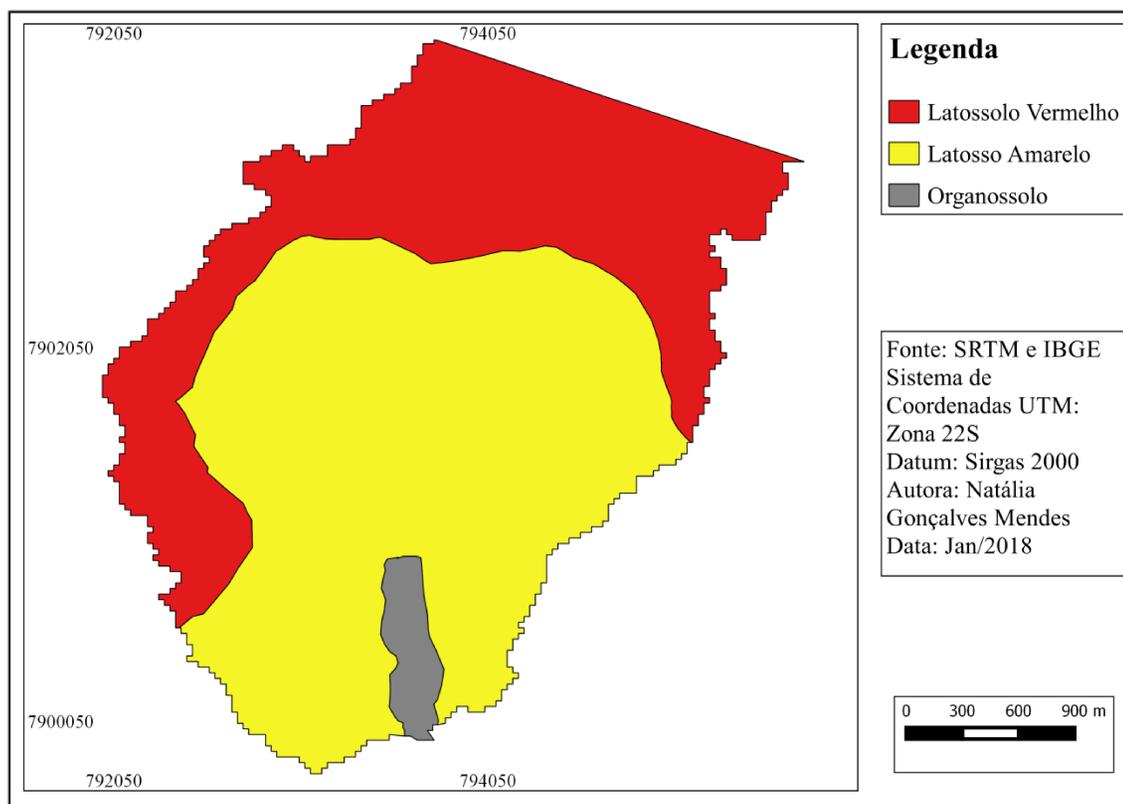
Área (km ²)	8,66
Comprimento do curso principal (km)	2,65
Declividade da bacia (%)	5,40
Comprimento da bacia (km)	3,75
Coefficiente de compacidade (adimensional)	1,62

FIGURA 1: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, das estações hidrométrica e meteorológica.



O enquadramento das classes de solo da BHEGL foi obtido do trabalho de Cruz et al. (2010). Esses autores analisaram e classificaram o solo da bacia, seguindo os padrões e propostas do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), sendo os mesmos classificados em latossolo vermelho, latossolo amarelo e organossolo (Figura 2).

FIGURA 2: Mapa de solos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG



3.1.2 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego da Água Vermelha - BHEAV é sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. O córrego Água Vermelha é afluente do Rio Tijucu, um dos principais afluentes do Rio Paranaíba.

Na Tabela 3 estão reunidas as informações da localização geográfica das estações fluviométrica e pluviométrica da bacia. Na Tabela 4 estão compiladas as informações ligadas às características fisiográficas da bacia. A Figura 3 ilustra a localização da BHEAV, assim como a disposição das estações ao longo da bacia.

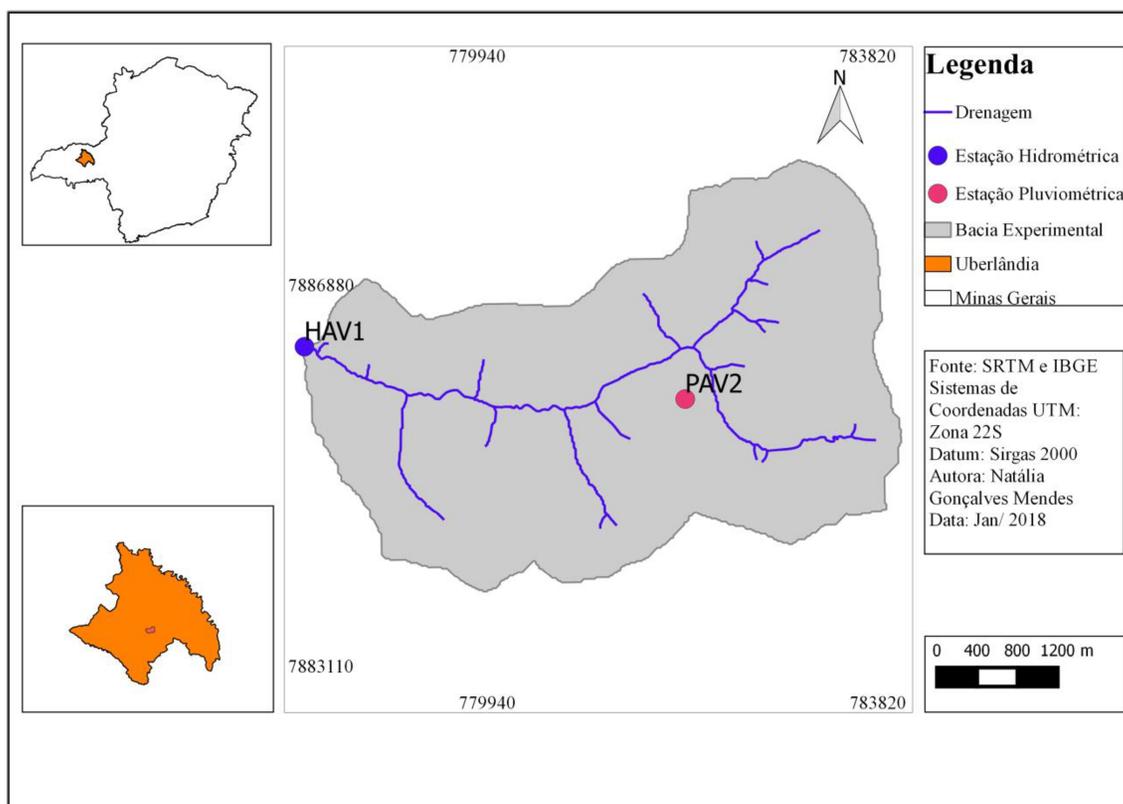
TABELA 6: Coordenadas geográficas das Estações Fluviométrica e Meteorológica localizadas na BHEAV.

Estação	Latitude	Longitude
Hidrométrica	19°05'51,5" S	48°21'22.3" W
Pluviométrica	19°06'8,32" S	48°21'12.93" W

TABELA 7: Características da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha.

Área (km ²)	16,35
Comprimento do curso principal (km)	6,55
Declividade da Bacia (%)	6,7
Comprimento da Bacia (km)	6,02
Coefficiente de Compacidade (adimensional)	0,16

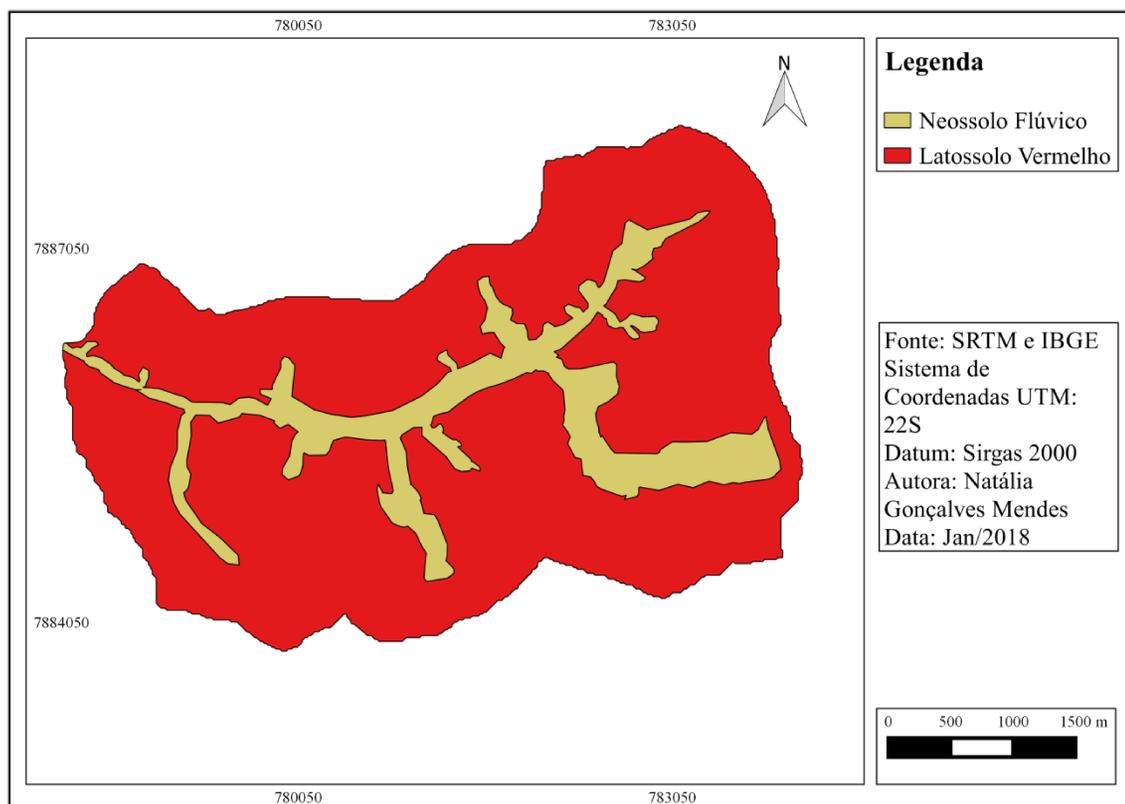
FIGURA 3: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, assim como da estação hidrométrica e pluviométrica.



O enquadramento das classes de solo da BHEAV (Figura 4) foi obtido com base na publicação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAIA, 1982) denominado Levantamento Detalhado

dos Solos da Estação Experimental Regional do Triângulo Mineiro. Os solos foram classificados em Neossolo Flúvico e Latossolo Vermelho.

FIGURA 4: Mapa de tipos de solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, Uberlândia – MG.



3.2 Material Cartográfico e imagem de Satélite

A delimitação das bacias hidrográficas e a extração das redes de drenagens foram obtidas pelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 metros. O SRTM é um modelo digital de elevação (MDE) disponibilizado pela NASA no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Os dados foram processados pelo software de Sistema de Informação Geográfica Qgis 2.8.9.

A determinação do uso do solo foi realizada no Qgis 2.8.9 por meio de imagens do Google Earth[®]. Concomitantemente, foram obtidas verdades de campo por meio de dispositivos GPS do modelo eTrex Vista HCX, o que possibilitou reforçar e corrigir as informações obtidas com a classificação de uso do solo realizada em ambiente computacional.

3.3 Monitoramento hidrológico das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha

3.3.1 Dados pluviométricos

Os pluviômetros foram instalados a uma altura padrão de 1,5 m do solo e distante de casas, árvores e outros obstáculos que podem interferir na captação da chuva.

Os dados de chuvas na BHGL foram obtidos por pluviômetros de balsa na estação meteorológica (Figura 5) entre outubro de 2015 a fevereiro de 2016.

FIGURA 5: Estação meteorológica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



Na BHEAV foram instaladas uma estação hidrométrica e uma pluviométrica. Nessa bacia os dados de chuvas foram adquiridos por pluviômetros de balsa nas estações hidrométrica (Figura 6) e pluviométrica (Figura 7) entre janeiro de 2017 a maio de 2017.

FIGURA 6: Estação hidrométrica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha



FIGURA 7: Estação pluviométrica instalada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha



As estações de monitoramento, tanto da BHEAV quanto da BHEGL, dispõem de sistemas de coleta e armazenamento de dados (*data logger*) em um intervalo de tempo de aquisição de 5 minutos. A coleta dos dados armazenados foi realizada por meio de computadores portáteis.

O cálculo da chuva média sobre a BHEAV foi realizado pelo método de Thiessen. No traçado do polígono de Thiessen sobre essa bacia, visando identificar a área de influência de cada pluviômetro, foram consideradas duas estações para o cálculo da chuva média: a Estação Hidrométrica do Córrego Água Vermelha-HAV1, localizada junto à seção de controle, com peso de 29,42% e a Estação Pluviométrica do Córrego Água Vermelha-PAV2, localizada próxima ao

centroide da bacia, com peso de 70,53% (Figura 3). Em relação à BHEGL, não foi necessário esse cálculo, visto que nessa bacia, durante o período de condução deste trabalho, contava com apenas um pluviômetro, localizado na estação meteorológica da bacia (MGL) (Figura 1). Sendo assim, esse pluviômetro cobriu 100% da área da BHEGL.

3.3.2 Dados do nível de água dos Córregos Água Vermelha e Glória

Para o monitoramento do nível da água do córrego Glória o instrumento utilizado foi um transdutor de pressão, marca Keller AG[®], modelo DCX-22 AA, do tipo absoluto, com transdutor de pressão (Figura 8). O instrumento utilizado para o monitoramento do nível da água do córrego Água Vermelha (Figura 9) foi um sensor ultrassônico, da Xi'an Gavin Electronic Technology Co., Ltd., modelo GUT740. Ambos os instrumentos foram integrados com um *datalogger* para o armazenamento e processamento dos dados. Os coletores de dados foram programados para realizarem uma coleta a cada cinco minutos. Antes da instalação no campo, os sensores foram calibrados no Laboratório de Hidrologia – HIDRO, da Universidade Federal de Uberlândia.

FIGURA 8: Sensor de nível instalado na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



FIGURA 9: Sensor de nível instalado na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha



3.3.3 Obtenções das curvas chaves nas seções de controle das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha

Após a instalação dos instrumentos de medição do nível da água nas bacias estudadas foram realizadas medições de velocidade da água com o micromolinete fluviométrico modelo MCN-1 da JCTM. Esse instrumento possui uma haste vertical que apoia no fundo do córrego e uma hélice. A hélice converte o movimento de fluxo de água em um movimento de rotação, e com o auxílio de um contador digital, é determinado, num intervalo de tempo, o número de voltas realizado. Após saber o número de rotações por segundo realizado pela hélice, foi utilizada a Equação 1 para a obtenção da velocidade da água na seção de medição.

$$V = 0,02290369 + 0,06409488 * H$$

Equação 1

Em que:

V = velocidade média da água, em $m\ s^{-1}$ e

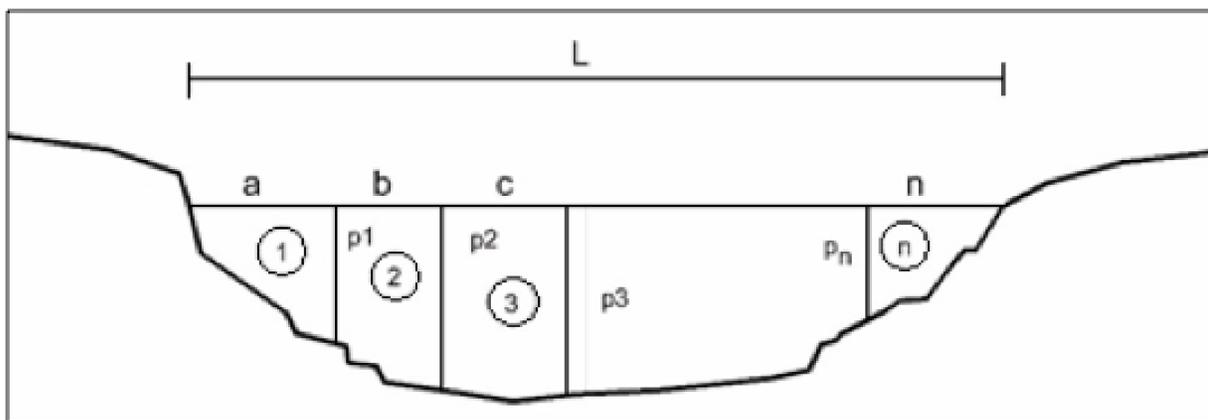
H = média do número de rotações por segundo (rps).

Para obter uma média da velocidade da correnteza de forma coerente, foi necessário realizar medições da velocidade do fluxo em diferentes seções transversais ao longo do canal, e em cada seção medir em diferentes verticais.

As campanhas das velocidades foram realizadas em datas distintas para determinar as vazões dos Córregos Glória e Água Vermelha. Para tal fim, foram obtidas as distâncias em intervalos iguais de 20 cm de uma margem até a outra. Para obter uma média da velocidade de forma coerente foi necessário definir, para cada intervalo de 20 cm, duas medidas de velocidade, sendo uma a 80% e outra a 20% de profundidade a partir da superfície da água no Córrego Glória. No córrego Água Vermelha as medidas foram tomadas a 40% e 20% de profundidade a partir da superfície da água.

Após a obtenção dos valores da média da velocidade do fluxo para cada profundidade em cada trecho do córrego, foi possível calcular a área utilizando a metodologia de Simpson (Figura 10).

FIGURA 10: Ilustração do método de Simpson para o cálculo da área da seção dos córregos.



De acordo com esse método, calcula-se a área entre cada setor delimitado por duas verticais de acordo com a Equação 2.

$$A = \frac{p_1 a}{2} + \frac{p_1 + p_2}{2} b + \frac{p_2 + p_3}{2} c + \dots + \frac{p_n n}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

p_n = profundidade da seção de controle, em m;

$a+b+c+\dots+n = L$ = largura do rio, em m.

Em seguida, a vazão foi calculada multiplicando-se a área de cada setor pela sua velocidade média (Equação 3), que é calculada pela média das velocidades médias das verticais que delimitam os setores.

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

Após a determinação da vazão para cada campanha na seção de controle, esta foi correlacionada com o respectivo nível da água (cota) e assim, foi possível construir a curva chave dos córregos Glória e Água Vermelha, as quais estão explicitadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Estas medições foram realizadas em situações em que os cursos d'água apresentaram condições de vazões baixas, médias e altas. A equação da curva chave foi estimada no software SigmaPlot 12.0.

FIGURA 11: Curva chave do Córrego Glória.

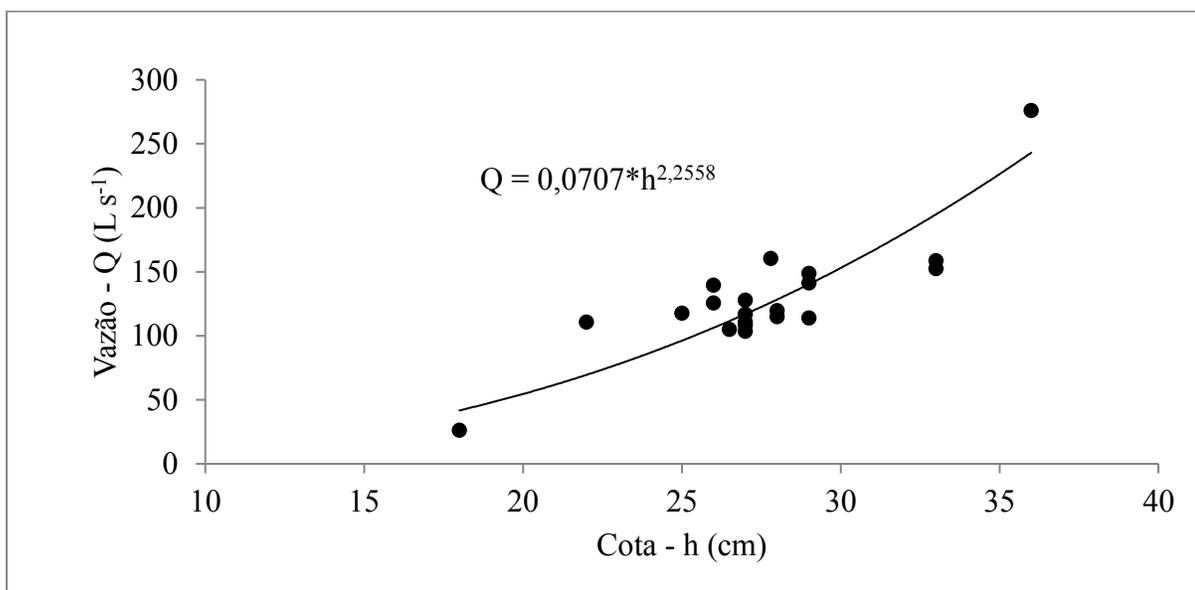
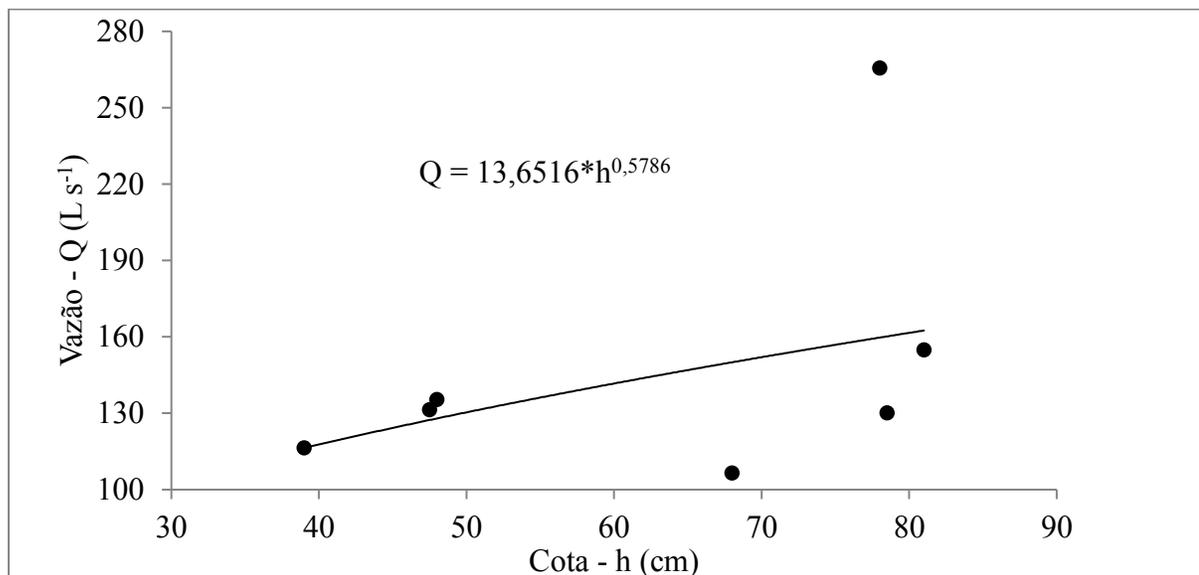


FIGURA 12: Curva chave do córrego Água Limpa.



As séries históricas de níveis de água obtidos pelo sensor ultrassônico instalado nas bacias foram posteriormente convertidas em séries de vazões por meio das curvas chaves. Esses dados junto com os dados de precipitação obtidos pelos pluviômetros compuseram a base de dados utilizados nesta pesquisa.

3.4 Hidrogramas observados

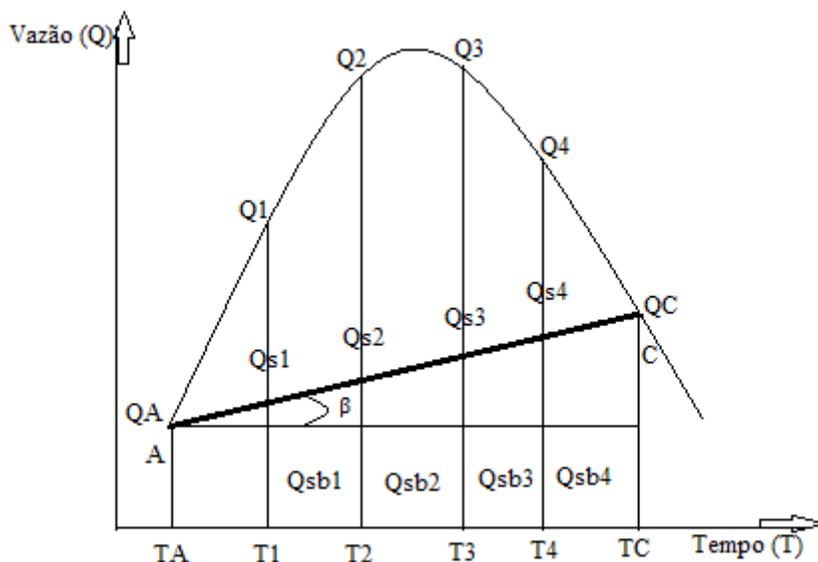
O hidrograma representa a relação da vazão com o tempo a partir de um evento de chuva, mostrando o comportamento hidrológico de uma bacia antes, durante e após eventos de chuva.

Muitas informações hidrológicas estão correlacionadas com o hidrograma, como o escoamento superficial direto (ESD), a precipitação efetiva e a vazão de pico, as quais são bastante variáveis e dependentes das condições meteorológicas, geomorfológicas e hidrológicas de cada bacia hidrográfica. Estas variáveis serão detalhadas neste trabalho.

3.4.1 Estimativa do escoamento superficial

A metodologia utilizada para separar o escoamento superficial direto do escoamento subterrâneo foi aquela descrita por Mello e Silva (2013), onde se utiliza uma reta que une os pontos de inflexão do hidrograma (A e C), conforme explicitado na Figura 13.

FIGURA 13: Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (adaptado de MELLO e SILVA, 2013)



O ponto A ou ponto de ascensão é onde o ESD se inicia. Ele é determinado visualmente por meio de uma mudança brusca (ascendência do hidrograma) na inclinação da curva do escoamento. O ponto C, conhecido também como ponto de declínio, é o ponto onde o ESD termina. Neste ponto considera-se que o escoamento subterrâneo volta a ter predominância sobre o fluxo do rio ou córrego. O ponto C é mais difícil de ser determinado quando comparado com o ponto A, pois o retorno da vazão do rio à estabilidade não é um processo tão imediato quanto o verificado na ascensão.

Neste trabalho, a obtenção do ponto C foi determinada na planilha de dados de vazão, por meio do logaritmo da divisão da vazão seguinte pelo logaritmo da vazão anterior (Equação 4), a fim de suavizar a amplitude da vazão e assim encontrar o valor quando a vazão se estabiliza, sendo então o ponto C. Esse procedimento foi recomendado por Chow (1964).

$$\frac{\text{Log } Q_i}{\text{Log } Q_{i-1}}$$

Equação 4

Em que:

Log Q_i : vazão atual; em $L s^{-1}$;

Log Q_{i-1} : vazão anterior; em $L s^{-1}$.

O ESD foi estimado por meio da regra dos trapézios. Esta metodologia consiste em multiplicar a vazão em cada instante pelo intervalo de tempo entre as medições (neste trabalho, o intervalo foi de 5 minutos). A área do hidrograma foi dividida em retângulos, nesse caso específico, retângulos de altura igual à vazão e largura igual ao intervalo de tempo entre as medições (Figura 13).

Para a separação do escoamento superficial direto e subterrâneo, foi realizada uma aproximação linear entre os pontos A e C, dada pela reta AC, representada na Figura 13. Em seguida, foi calculada a inclinação da reta AC por meio da Equação 5.

$$m = \operatorname{tg}(\beta) = \frac{(QC-QA)}{(TC-TA)} \quad \text{Equação 5}$$

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 em cada intervalo de tempo das vazões (neste trabalho foi considerado 5 min. = 300 segundos), conforme explicitado na Equação 6.

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

Onde:

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

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

O valor de J foi acrescentado ao escoamento base a partir de QA. As vazões subterrâneas foram calculadas a partir de J conforme detalhado na Equação 7.

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

Onde:

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

As vazões equivalentes ao escoamento superficial direto foram calculadas pela diferença entre a vazão total e a respectiva vazão subterrânea, restando, desta forma, apenas o escoamento superficial (Equação 8).

$$Q_{S1} = Q1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q3 - Q_{SB3} \dots \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$Q_{S1,2,\dots}$ = vazão superficial direta nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L s^{-1}$;

$Q_{1,2,\dots}$ = vazão medida pelo linígrafo nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L s^{-1}$.

Por fim, somando-se as vazões superficiais e multiplicando-se pelo intervalo de tempo, foi possível obter o volume de escoamento superficial direto, conforme explicitado na Equação 9.

$$ESD = \sum_{i=1}^N (Q_{S1} \cdot \Delta T) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

ESD = volume do escoamento superficial direto, em litros;

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

Q_{Si} = vazões provenientes da contribuição do escoamento superficial direto, em $L s^{-1}$;

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

3.4.2 Determinação da precipitação efetiva

A precipitação efetiva (Pe) foi estimada para cada evento de chuva nas duas bacias hidrográficas, tomando como base duas metodologias: por meio do índice ϕ , de acordo com as recomendações de Mello e Silva (2014) e, pela metodologia proposta pelo Soil Conservation Service – SCS (NEH, 2018).

3.4.2.1 Estimativa da precipitação efetiva pelo índice ϕ

A precipitação total representa toda a chuva que caiu na bacia em determinado evento. A precipitação efetiva é a precipitação que contribui para o escoamento superficial, pois parte da precipitação total é infiltrada, outra fica retida na vegetação e outra é escoada. No cálculo da precipitação efetiva foi necessário subtrair a parcela de chuva que foi perdida, a qual não influenciou a vazão do rio. Para o cálculo da precipitação efetiva foi preciso determinar o índice ϕ que é uma taxa média de infiltração.

O índice ϕ corresponde à taxa média de infiltração durante o ESD ocasionado por um evento isolado de chuva, de modo que é representado sobreposto ao hietograma de Pe por uma reta paralela ao eixo do tempo, indicando que a área do hietograma acima desta reta corresponde ao ESD, ou Pe total. De acordo com Mello e Silva (2013), o índice ϕ é obtido a partir da análise combinada do hidrograma de ESD e do hietograma de Pe's, de modo a satisfazer a condição de que a área do hietograma de Pe's acima da linha seja equivalente à área abaixo do hidrograma de ESD.

$$\phi = \frac{(Pt - ESD)}{No} \Delta t \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

ϕ = 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 = duração da chuva, em minutos;

Δt = intervalo de tempo de medida da chuva, considerada como 5 minutos.

Considerou-se neste caso, que a taxa de absorção máxima de água pelo solo como sendo igual ao valor de ϕ . Considerou-se que se em determinado intervalo de tempo, a precipitação total fosse maior que o valor de ϕ , essa quantidade de água contribuiria para o escoamento superficial na bacia. Porém, se no intervalo de tempo subsequente a precipitação fosse menor que ϕ , essa quantidade de água não absorvida anteriormente, poderia ser absorvida no intervalo de tempo posterior. Neste trabalho, foi adotada a metodologia para estimativa da Pe conforme detalhado por Silveira (2016). Essa autora descreveu a metodologia de cálculo em quatro etapas, conforme se segue:

Etapa 1

Calcular a diferença entre a precipitação total e o índice ϕ , usando: $P_t - \phi$. Após isso, definiu-se que os tempos que possuem excessos, ocorrem onde $P_t - \phi > 0$, ou seja, neste intervalo de tempo ocorreu escoamento, pois a precipitação é maior que a capacidade de absorção de água do solo. Essa etapa está representada na Equação 11.

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

Onde:

E_p = excesso da precipitação, em mm;

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

Por outro lado, foram considerados como um bônus de absorção de água pelo solo, os intervalos de tempo onde não havia escoamento, pois, a precipitação naquele intervalo de tempo foi menor que a capacidade de infiltração. Considerou-se, nestes casos, que a água infiltraria no solo. A Equação 12 representa matematicamente este processo.

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

Onde:

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

Etapa 2

Nesta etapa, calculou-se o bônus médio em relação ao número de excessos da precipitação, isto é, os intervalos onde houve infiltração e onde houve escoamento. Para tanto, os bônus foram somados e em seguida, divididos pelo número de eventos de precipitação onde ocorreram excessos, ou seja, escoamento. A Equação 13 explica matematicamente esta etapa.

$$B_{O_m} = \frac{\sum B_o}{N_{E_p}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

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

N_{E_p} = número de excessos da precipitação.

Etapa 3

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

Etapa 4

Nesta última etapa, foram repetidas as etapas 2 e 3 sucessivamente, até acabarem os bônus, ou seja, até restar somente valores de escoamento. Ao final, a somatória dos excessos foi considerada como a precipitação efetiva.

3.4.2.2 Estimativa da precipitação efetiva e da vazão de pico pelo método do Soil Conservation Service (SCS)

O método SCS é um dos métodos mais simples e mais utilizados para estimar a chuva efetiva resultante de um evento de chuva (Collischonn e Dornelles, 2015). Neste método, a estimativa da precipitação efetiva está diretamente relacionada com as características da bacia hidrográfica. Sendo assim, o cálculo da precipitação efetiva foi realizado por meio da Equação 14.

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia+S)} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Q = precipitação efetiva, em mm;

P = precipitação total do evento, em mm;

S = potencial de armazenamento de água no solo, em mm.

A partir de um evento de chuva ocorre algumas perdas iniciais, pois parte da chuva é interceptada pela vegetação, outra é infiltrada, evapotranspirada e por fim escoada pelo solo até chegar à seção de controle. Diante disso, as perdas iniciais correspondem a 20% do potencial de armazenamento de água no solo de acordo com Equação 15.

$$Ia = 0,2 \cdot S \quad \text{Equação 15}$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 14, obtêm-se a Equação 16.

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

Q = precipitação efetiva, em mm;

P = precipitação total do evento, em mm e

S = potencial de armazenamento de água no solo, em mm.

A equação é válida para a condição de $P \geq 0,2S$, devido às perdas iniciais, ou seja, quando a precipitação for menor que 20% do potencial de armazenamento, não ocorre o escoamento e assim a precipitação efetiva é nula. Neste trabalho, foram selecionados somente aqueles eventos de chuva que obedeceram a essa condição.

A determinação do armazenamento (S), determinada pela Equação 17, depende de uma única variável denominada de curva número (CN).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 17}$$

A determinação da vazão de pico pelo método SCS será obtida por meio da Equação 18, conforme parametrização de NEH (2018).

$$qp = \frac{0,208 \cdot A \cdot Q}{Ta} \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

qp = vazão de pico, em $m^3 s^{-1}$;

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

Ta = tempo de ascensão do hidrograma, em horas.

O tempo de ascensão (Ta) do hidrograma foi estimado por meio da Equação 19 (Collischonn e Dornelles, 2015).

$$Ta = tp + \frac{d}{2} \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

t_p = representa o tempo de pico do hidrograma, em horas;

d = duração da chuva área da bacia hidrográfica, em km^2 .

O intervalo de tempo adequado para a elaboração da chuva de projeto (d) e para os cálculos de convolução com o hidrograma unitário deve ser entre 5 e 10 vezes menor do que o tempo de concentração (t_c) da bacia. Usualmente, considera-se 7 vezes menor do que t_c (Collischonn e Dornelles, 2015). Neste trabalho o valor de “ d ” foi de 5 minutos, equivalente à frequência de armazenamento dos dados de vazão e chuva das bacias estudadas.

O tempo de pico do hidrograma (t_p) foi considerado como sendo 60% do valor do tempo de concentração das bacias estudadas ($t_p = 0,6 \cdot t_c$), conforme recomendação de NEH (2018). Neste trabalho, essa porcentagem foi denominada de índice de ajuste do tempo de ascensão (T_a), pois o seu valor se relaciona diretamente com essa variável, que por sua vez afeta inversamente o valor da vazão de pico (q_p). Além disso, nos casos onde a vazão de pico do hidrograma unitário do SCS não fossem iguais àqueles do hidrograma da bacia (considerado aqui como hidrograma observado), foi proposto um novo valor para esse índice.

O tempo de concentração das bacias hidrográficas foi estimado por meio da Equação 20, conforme parametrização de NEH (2018).

$$t_c = 3,42 \cdot \left(\frac{1000}{CN_m} - 9 \right)^{0,7} \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5} \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

t_c = tempo de concentração, em min;

CN_m = valor do número da curva médio da bacia hidrográfica (parâmetro CN), adimensional;

L = comprimento do curso d’água principal da bacia, em km;

S = declividade dada pela razão entre o desnível máximo do canal hidráulico da bacia e o seu comprimento, em m m^{-1} .

3.4.2.3 Determinação do parâmetro CN

A estimativa do parâmetro CN foi apresentado na tabela contida em NEH (2018). Para tanto, foram considerados o grupo hidrológico de solo, o tipo de cobertura, a condição hidrológica e a condição de umidade do solo antecedente. Os valores de CN variam de 1 a 100. Esta escala

retrata as condições de cobertura e solo, variando desde uma cobertura impermeável (limite superior) até uma cobertura completamente permeável (limite inferior).

Ressalta-se que foi encontrada dificuldade na determinação dos usos do solo das tabelas apresentadas em NEH (2018), pois se trata de um método desenvolvido com base em bacias hidrográficas com condições diferentes das que são encontradas no Brasil. Diante disso, foi necessário aproximar os fatores considerados pelo método à realidade das bacias estudadas.

Os usos do solo nas bacias dos córregos Glória e Água Vermelha estão representados nas Figuras 14 e 15, respectivamente. O número CN foi atribuído a cada classe de ocupação do solo encontrada nas bacias, de acordo com NEH (2018), e relacionado a porcentagem de área ocupada por cada uso da BHEGL (Tabela 8) e BHEAV (Tabela 9).

FIGURA 14: Uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL).

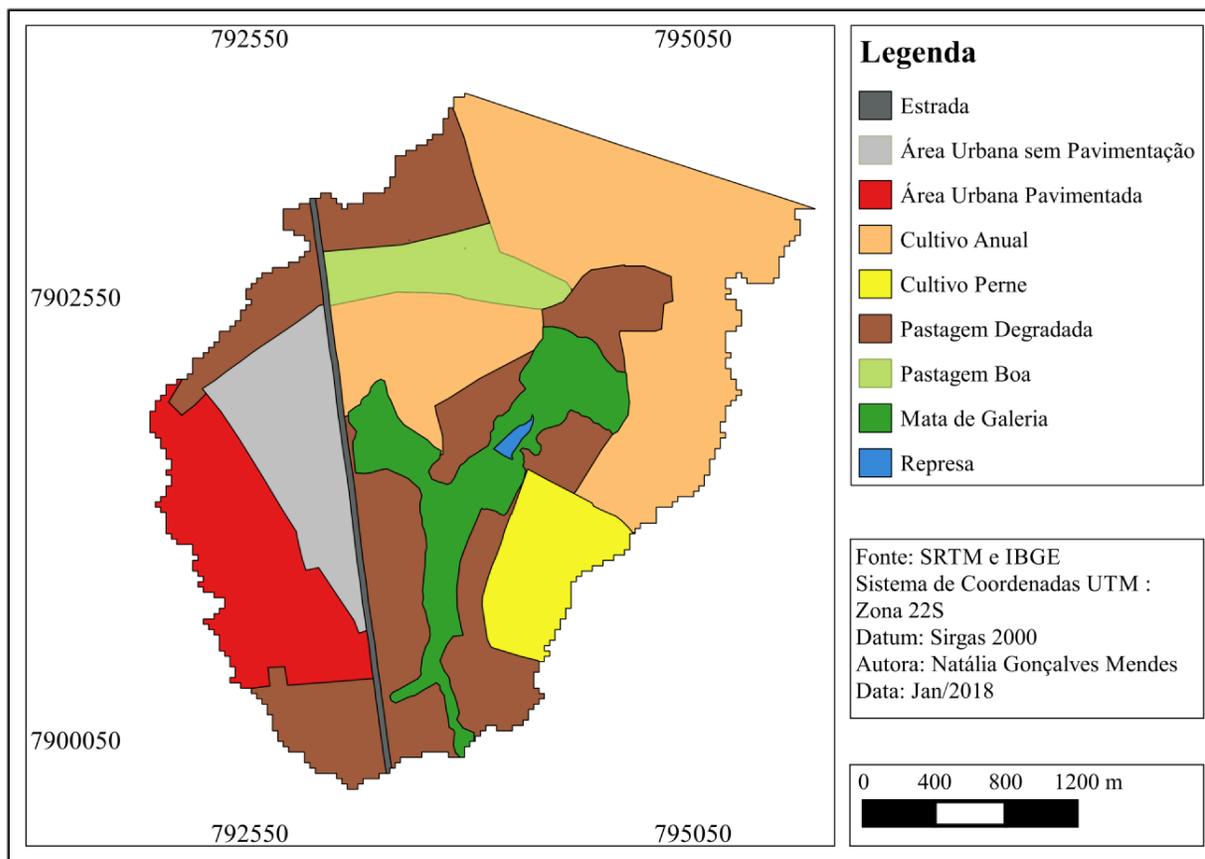


TABELA 8: Tipos de cobertura com seus respectivos valores do número da curva (CN) da BHEGL.

Uso do Solo	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	Área (%)	CN
Área urbana sem pavimentação	C	0,73	8,42	87
Área urbana pavimentada	C	1,04	11,99	98
Cultivo anual	C	2,66	30,71	81
Cultivo perene	C	0,51	5,87	81
Pastagem degradada	C	2,44	28,12	86
Pastagem boa	C	0,41	4,70	74
Mata de galeria	C	0,86	9,97	70
Represa	C	0,02	0,22	98
CN médio (CNm)				83,60

FIGURA 15: Uso do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV)

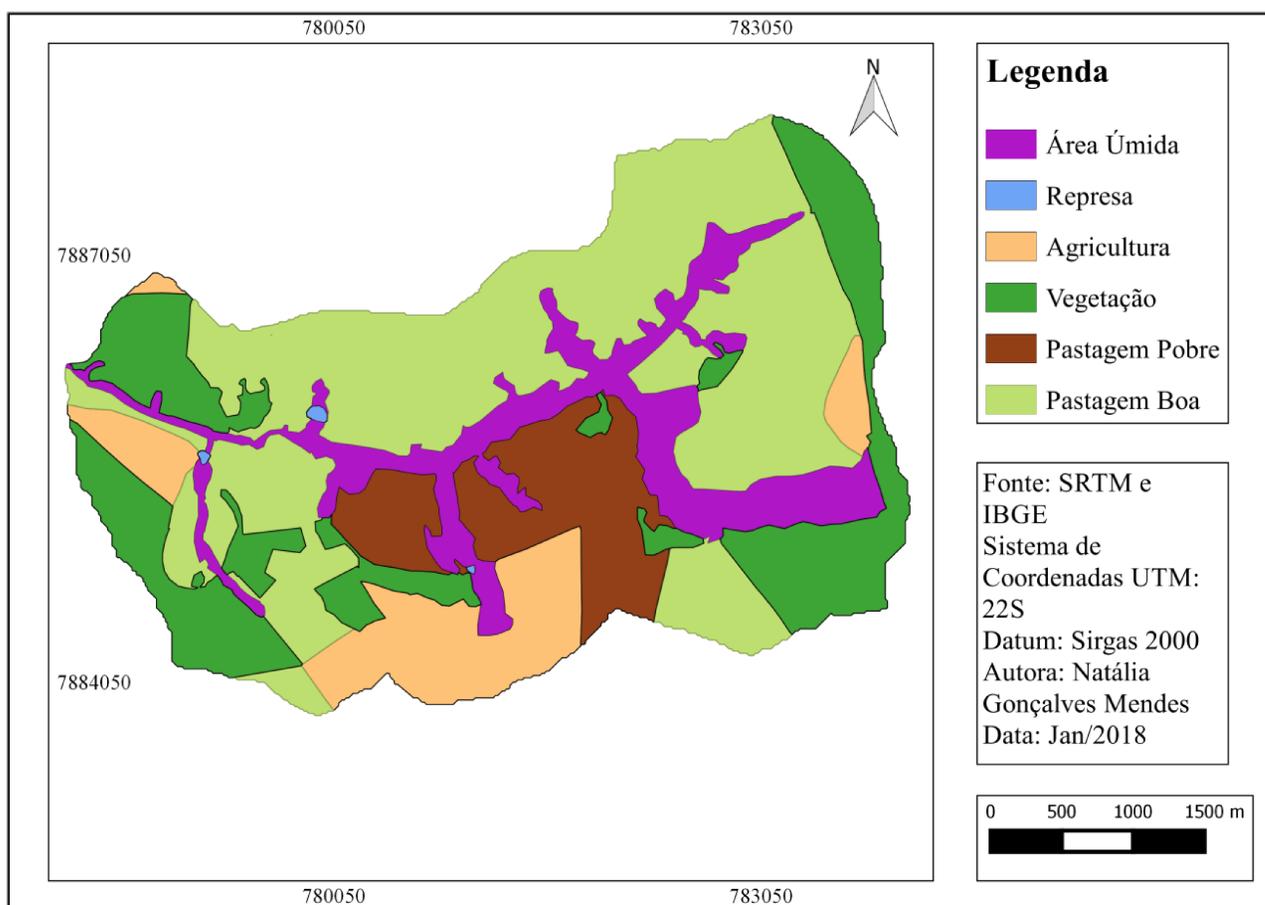


TABELA 9: Tipos de cobertura com seus respectivos valores do número da curva (CN) da BHEAV.

Uso do solo	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	Área (%)	CN
Área úmida	B	2,28	13,97	98
Vegetação	B	3,45	21,11	55
Agricultura	B	1,78	10,89	72
Represa	B	0,02	0,14	98
Pastagem boa	B	7,04	43,08	61
Pastagem pobre	B	1,77	10,82	79
CN médio (CNm)				68,10

O método considera também a umidade do solo antecedente (AMC – Antecedent Moisture Content). Os valores de CN foram corrigidos de acordo com a AMC, determinada com base nos valores de chuva dos cinco dias antecedentes ao evento estudado. A correção foi feita da seguinte maneira:

Condição I: chuvas nos últimos 5 dias < 13 mm;

Condição II: chuvas nos últimos 5 dias entre 13 e 53 mm;

Condição III: chuvas nos últimos 5 dias > 53 mm

O CN foi determinado, a partir das tabelas contidas em NEH (2018) de acordo com a condição II. A classificação das condições I e III foi estabelecida por meio das Equações 21 e 22.

$$CN (I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN (II)} \quad \text{Equação 21}$$

$$CN (III) = \frac{23 \cdot CN (II)}{10 + 0,13 \cdot CN (II)} \quad \text{Equação 22}$$

3.5 Convolução do hidrograma

A partir da precipitação efetiva calculada pelos métodos do índice ϕ e do SCS, foi possível calcular os hidrogramas resultantes dos eventos de chuva selecionados. Esse cálculo é feito através da convolução.

Convolução é um operador que a partir de duas funções, produz-se uma terceira. A definição de convolução é muito importante no estudo de sistemas lineares invariantes no tempo, como exemplo o hidrograma unitário (Collischonn e Dornelles, 2015). Esse método é baseado nos princípios da proporcionalidade e da superposição, que os aplicando, é possível obter os hidrogramas de diferentes eventos de chuva, por meio do escoamento superficial direto obtido na

bacia. Neste trabalho a convolução foi calculada por meio da Equação 23 (Collischonn e Dornelles, 2015).

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m \cdot h_{n-m+1} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

P_m : Precipitação efetiva do bloco m (mm);

h : é a ordenada do ESD ($L s^{-1} mm^{-1}$);

Q_n : vazão do ESD no intervalo de tempo n ($L s^{-1}$);

A convolução discreta simplesmente compreendida por meio de um exemplo, quando colocada na forma matricial (Tabela 7). Neste exemplo foram considerados três blocos de chuva efetiva.

TABELA 10: Exemplo de cálculo do hidrograma unitário por meio da convolução.

Vazão ($L s^{-1} mm^{-1}$)	Blocos de chuva efetiva			Hidrograma final ($L s^{-1}$)
	P_1 (mm)	P_2 (mm)	P_3 (mm)	
h_1	$P_1 \cdot h_1$			$P_1 \cdot h_1$
h_2	$P_1 \cdot h_2$	$P_2 \cdot h_1$		$P_1 \cdot h_2 + P_2 \cdot h_1$
h_3	$P_1 \cdot h_3$	$P_2 \cdot h_2$	$P_3 \cdot h_1$	$P_1 \cdot h_3 + P_2 \cdot h_2 + P_3 \cdot h_1$
h_4	$P_1 \cdot h_4$	$P_2 \cdot h_3$	$P_3 \cdot h_2$	$P_1 \cdot h_4 + P_2 \cdot h_3 + P_3 \cdot h_2$
h_5	$P_1 \cdot h_5$	$P_2 \cdot h_4$	$P_3 \cdot h_3$	$P_1 \cdot h_5 + P_2 \cdot h_4 + P_3 \cdot h_3$
h_6	$P_1 \cdot h_6$	$P_2 \cdot h_5$	$P_3 \cdot h_4$	$P_1 \cdot h_6 + P_2 \cdot h_5 + P_3 \cdot h_4$
h_7	$P_1 \cdot h_7$	$P_2 \cdot h_6$	$P_3 \cdot h_5$	$P_1 \cdot h_7 + P_2 \cdot h_6 + P_3 \cdot h_5$
h_8	$P_1 \cdot h_8$	$P_2 \cdot h_7$	$P_3 \cdot h_6$	$P_1 \cdot h_8 + P_2 \cdot h_7 + P_3 \cdot h_6$
		$P_2 \cdot h_8$	$P_3 \cdot h_7$	$P_2 \cdot h_8 + P_3 \cdot h_7$
			$P_3 \cdot h_8$	$P_3 \cdot h_8$

3.6 Avaliação estatística do desempenho da hidrógrafa proposta pelo Soil Conservation Service (SCS)

A avaliação estatística do desempenho da hidrógrafa unitária triangular do Soil Conservation Service (aqui denominada somente como SCS) será dada por meio da comparação dos valores da vazão de pico estimadas pelo modelo SCS, conforme parametrização proposta por

NEH (2018), considerando $T_a = 0,6 \cdot t_c + [(t_c/7)/2]$. Nos casos onde a vazão de pico obtidas por essa metodologia não fossem iguais àsquelas do hidrograma da bacia (considerado aqui como hidrograma observado), foi proposto um novo valor para a constante 0,6. Neste trabalho, essa constante foi denominada de índice de ajuste do tempo de ascensão (X_{T_a}). O valor adequado do índice X_{T_a} , para cada hidrograma de cada bacia, foi obtido alterando-se o seu valor até que a vazão de pico dada por meio da metodologia SCS, após a convolução, se aproximasse da vazão de pico do hidrograma observado. Caso fosse necessário ajustar um novo valor para X_{T_a} , diferente, portanto, daquele recomendado por NEH (2018), a hidrógrafa unitária do SCS foi denominada de SCS modificado.

Além disso, este trabalho objetiva também, avaliar o desempenho do modelo original de hidrógrafa unitária proposta por SCS usando o valor da chuva efetiva estimada pelo índice ϕ . Portanto, foi gerada uma outra hidrógrafa, denominada de SCS- ϕ . O valor da vazão de pico obtido por meio dessa metodologia também foi comparado com a vazão de pico do hidrograma observado, do SCS e do SCS modificado.

A metodologia utilizada para avaliar a vazão de pico das hidrógrafas SCS, SCS modificado e SCS- ϕ frente à vazão de pico obtida no hidrograma observado, foi dos erros absolutos e relativo, conforme explicitado nas Equações 24 e 25, respectivamente. O erro relativo é dado pela razão do erro absoluto pelo valor mais verdadeiro ou provável, expresso em porcentagem.

$$EA = qp_{calc} - qp_{obs} \quad \text{Equação 24}$$

$$ER = \frac{EA}{qp_{obs}} \cdot 100 \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

EA = erro absoluto, em min.;

ER = erro relativo, em %;

qp_{cobs} = vazão de pico observada (tida como verdadeira), obtida no hidrograma, $L s^{-1}$;

qp_{calc} = vazão de pico calculada por meio dos hidrogramas SCS e SCS modificado, em $L s^{-1}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relações entre a duração e a intensidade das chuvas nas bacias estudadas

A partir dos dados da precipitação total em cada evento, foi obtida a média da intensidade das precipitações, as precipitações antecedentes dos últimos cinco dias (P5) e os tempos de duração das mesmas dos onze eventos na BHEGL (Tabela 8) e dos nove eventos na BHEAV (Tabela 9).

TABELA 11: Informações relacionadas à chuva e ao escoamento na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), em cada hidrograma.

Data dos eventos (hidrogramas)	Duração da chuva (min)	P5 (mm)	Intensidade média de chuva (mm h ⁻¹)	Chuva total (mm)	ESD ¹ (mm)	Índice ϕ (mm)	Q _{scs} ² (mm)
31/10/15	20	19,8	29,8	12,40	0,07	0,07	0,11
03/11/15	150	70	6,66	17,20	0,23	0,23	4,78
29/11/15	185	4,4	12,67	33,80	1,49	1,49	0,78
30/11/15	15	39,4	36,6	12,20	0,05	0,05	0,09
06/12/15	215	50,4	4,74	17,40	0,26	0,26	0,96
20/12/15	235	29,6	10,00	30,00	0,91	0,91	5,72
28/12/15	30	13,8	26,40	15,40	0,14	0,14	0,53
04/01/16	105	13,4	10,69	19,60	0,31	0,31	1,55
19/01/16	195	130,6	6,00	20,00	0,50	0,50	6,56
09/02/16	40	32,4	20,27	15,20	0,17	0,17	0,49
29/02/16	40	36,6	9,48	15,80	0,17	0,17	0,60

Nota: ¹Este valor se refere ao escoamento superficial direto obtido diretamente no hidrograma da bacia em cada evento de chuva; ²Se refere à chuva efetiva calculada segundo parametrização do SCS (Equação 16).

TABELA 12: Informações relacionadas à chuva e ao escoamento na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), em cada hidrograma.

Data dos eventos (hidrogramas)	Duração (min)	P5 (mm)	Intensidade média de chuva (mm h ⁻¹)	Chuva total (mm)	ESD ¹ (mm)	Índice ϕ (mm)	Q _{scs} ² (mm)
13/01/2017	175	68,75	9,5	28,50	0,13	0,13	4,72
15/01/2017	200	64,00	4,1	14,00	0,06	0,06	0,24
02/02/2017	130	20,50	13,44	30,25	0,11	0,11	0,40
03/02/2017	250	75,25	6,27	28,75	0,05	0,05	4,83
04/02/2017	205	105,00	14,36	50,25	0,13	0,13	17,38
27/02/2017	185	30,00	8,13	25,75	0,03	0,03	0,03
05/03/2017	205	35,00	11,5	40,25	0,11	0,11	2,00
08/04/2017	80	21,25	28	39,75	0,11	0,11	1,89
22/05/2017	295	45,25	6,19	32,00	0,07	0,07	0,53

Nota: ¹Este valor se refere ao escoamento superficial direto obtido diretamente no hidrograma da bacia em cada evento de chuva; ²Se refere à chuva efetiva calculada segundo parametrização do SCS (Equação 16).

Analisando os resultados contidos na Tabela 8, pode observar que na BHEGL as durações das chuvas foram entre 20 e 235 minutos e as médias das intensidades entre 4,74 e 36,60 mm h⁻¹. Em relação à BHEAV (Tabela 9), as durações das chuvas variaram entre 80 e 295 minutos e as médias das intensidades entre 4,10 e 28,00 mm h⁻¹.

Em relação à BHEGL (Tabela 8) verifica-se que as chuvas de menores durações apresentaram intensidades maiores como no caso dos eventos ocorridos em 31/10/2015 e 30/11/2015. Entretanto, na BHEAV (Tabela 9) nem sempre os tempos de durações de chuvas menores resultaram em médias de intensidades destas precipitações maiores. Isso pode ser explicado pelo pequeno volume de precipitação nesses eventos gerando então intensidades menores como observado em 15/01/2017, onde a média da intensidade da precipitação foi quase 40% menor, quando comparado com a média da intensidade do evento ocorrido em 22/05/2017. De acordo com Ponce (1995), essas variações ocorrem devido às características dos eventos hidrológicos que apresentam grande variabilidade espacial e temporal.

Como, foi observado por meio das Tabelas 8 e 9, que as durações das precipitações na BHEGL foram menores que às observadas na BHEAV, isso influenciou nos valores de vazões máximas verificadas nessas duas bacias. Ademais, nota-se também a semelhança nos valores de ESD e índice ϕ , para as duas bacias estudadas. Esse resultado era esperado pois, o índice ϕ foi ajustado em função do ESD obtido nos hidrogramas das bacias. Por outro lado, nota-se a acentuada discrepância entre os valores de ESD e a precipitação efetiva estimada pelo modelo SCS (Q_{scs}). Essa condição afeta o desempenho do modelo de hidrógrafa indicado pelo SCS na etapa de convolução do hidrograma.

4.2 Hietogramas de chuva efetiva pelo índice ϕ

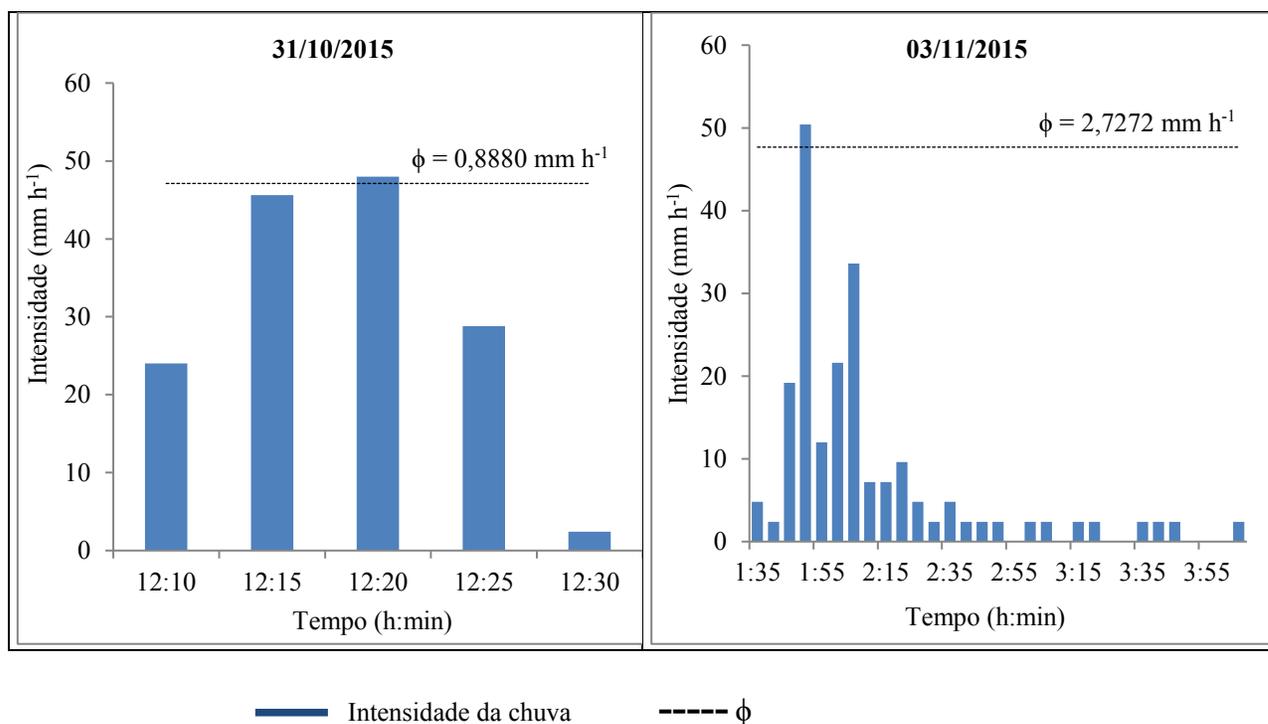
A metodologia do índice ϕ foi estimada para cada evento analisado e esses resultados estão compilados na Figura 16, para os eventos ocorridos na BHEGL e, na Figura 17, para os eventos ocorridos na BHEAV.

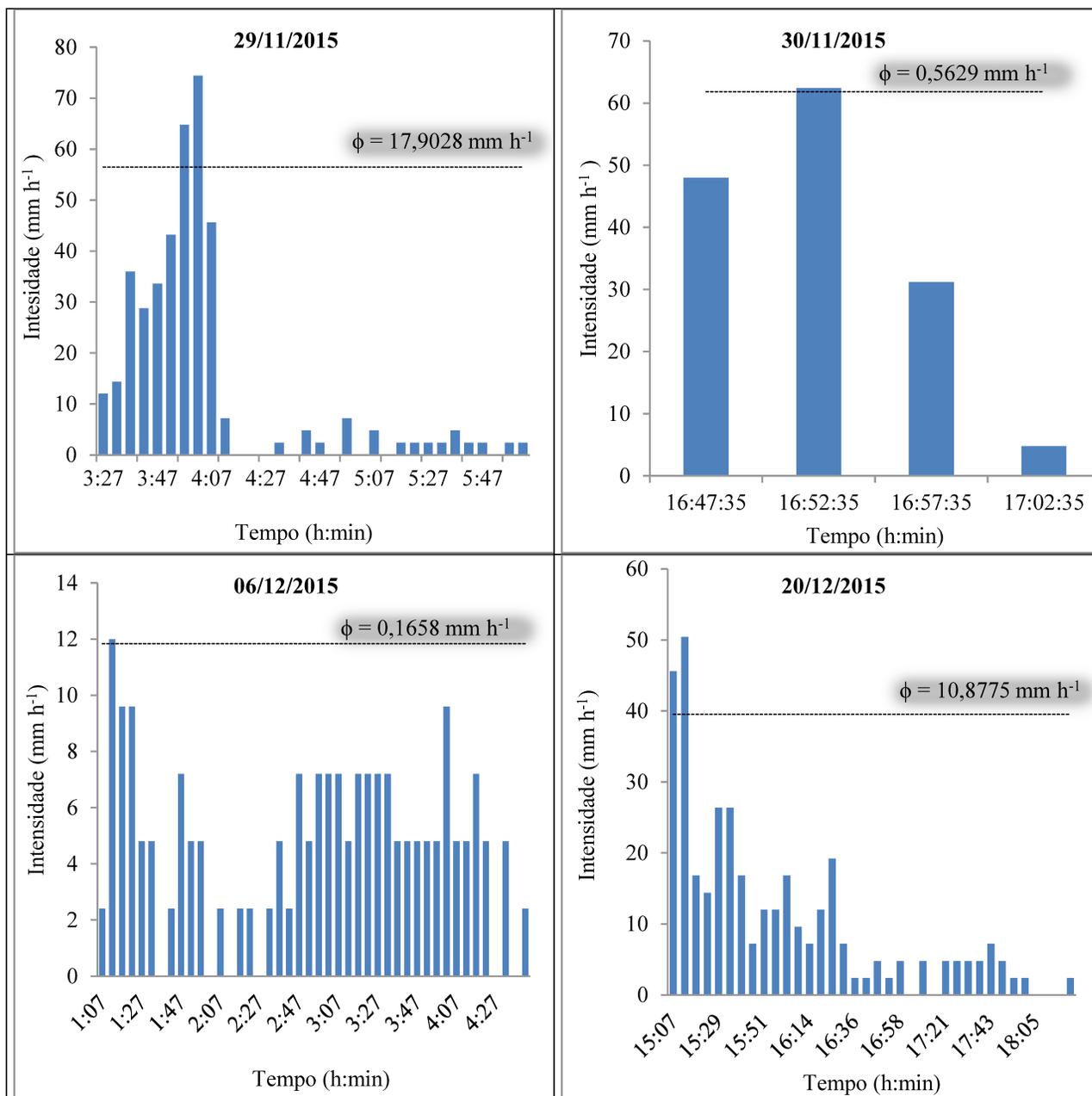
Os valores para o índice ϕ foram altamente variáveis com o evento (Figuras 18 e 19). Com base nas Figuras 16 e 17. Analisando os eventos da BHEGL (Figura 16), constatou-se que os valores de intensidade do índice ϕ variaram entre 0,89 e 17,90 mm h⁻¹. No caso da BHEAV (Figura 17), os valores do índice ϕ variaram de 0,11 a 1,52 mm h⁻¹. Com base nas Figuras 16 e 17, pôde-se constatar que não houve uma tendência clara de variação do índice ϕ com a precipitação total.

Assim, uma precipitação total de grande magnitude não necessariamente implica em um valor elevado de índice ϕ , pois o tempo de duração desta pode ser longo, fazendo com a intensidade média de precipitação do evento seja baixa. Isso foi também constatado por Nunes (2015). Entretanto, segundo Zakia (1998) esses casos evidenciam o fato de que a maior parte da chuva que caiu sobre a bacia não infiltrou, e sim foi escoada para a seção de controle.

Além disso, foi possível observar que a BHEGL apresentou, de modo geral, eventos de precipitação com duração bastante inferior àqueles ocorridos na BHEAV. Foi constatada uma predominância de intensidades máximas de chuva mais elevadas para a BHEGL, pois a duração da precipitação nesta bacia foi pequena, influenciando, portanto, nos valores do índice ϕ .

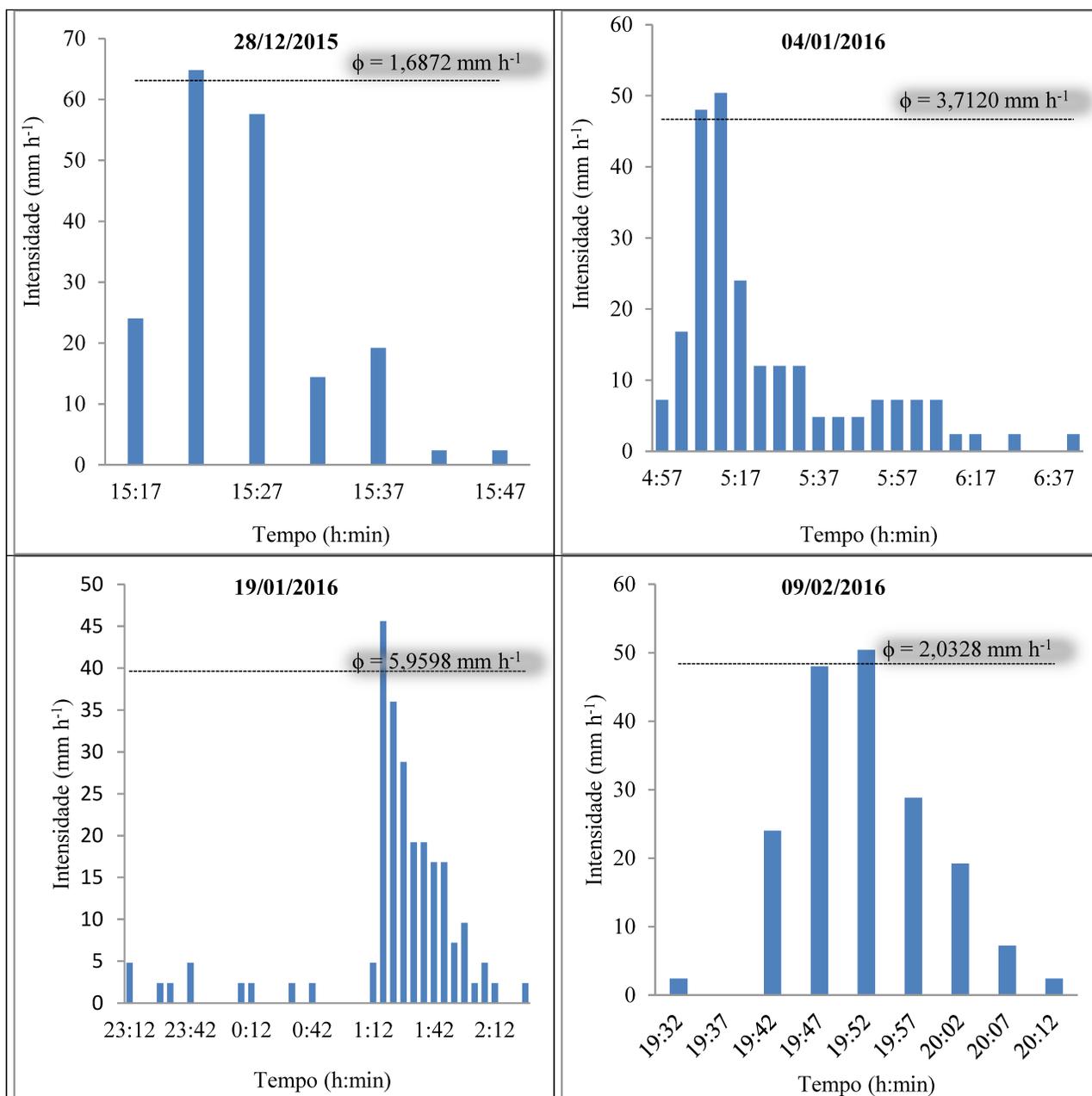
FIGURA 16: Hietogramas de chuva total e o índice ϕ de cada evento ocorrido na BHEGL.





— Intensidade da chuva

----- ϕ



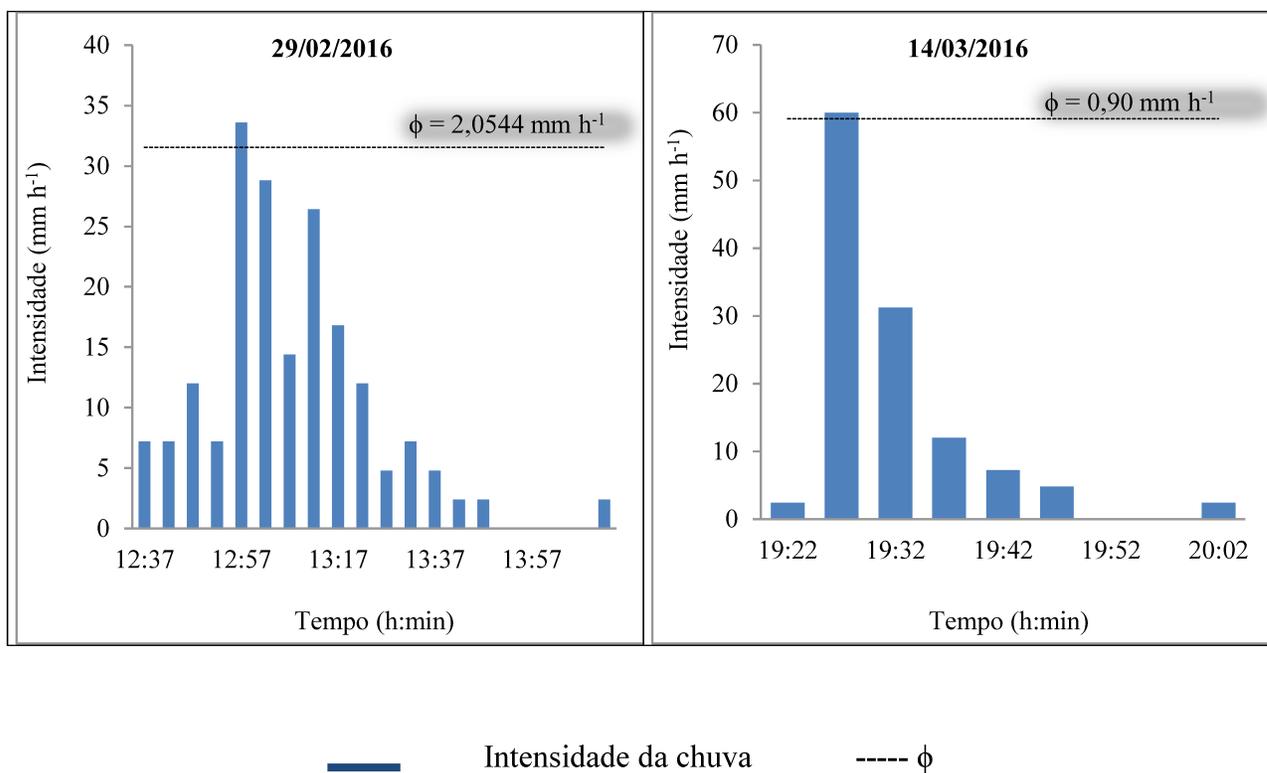
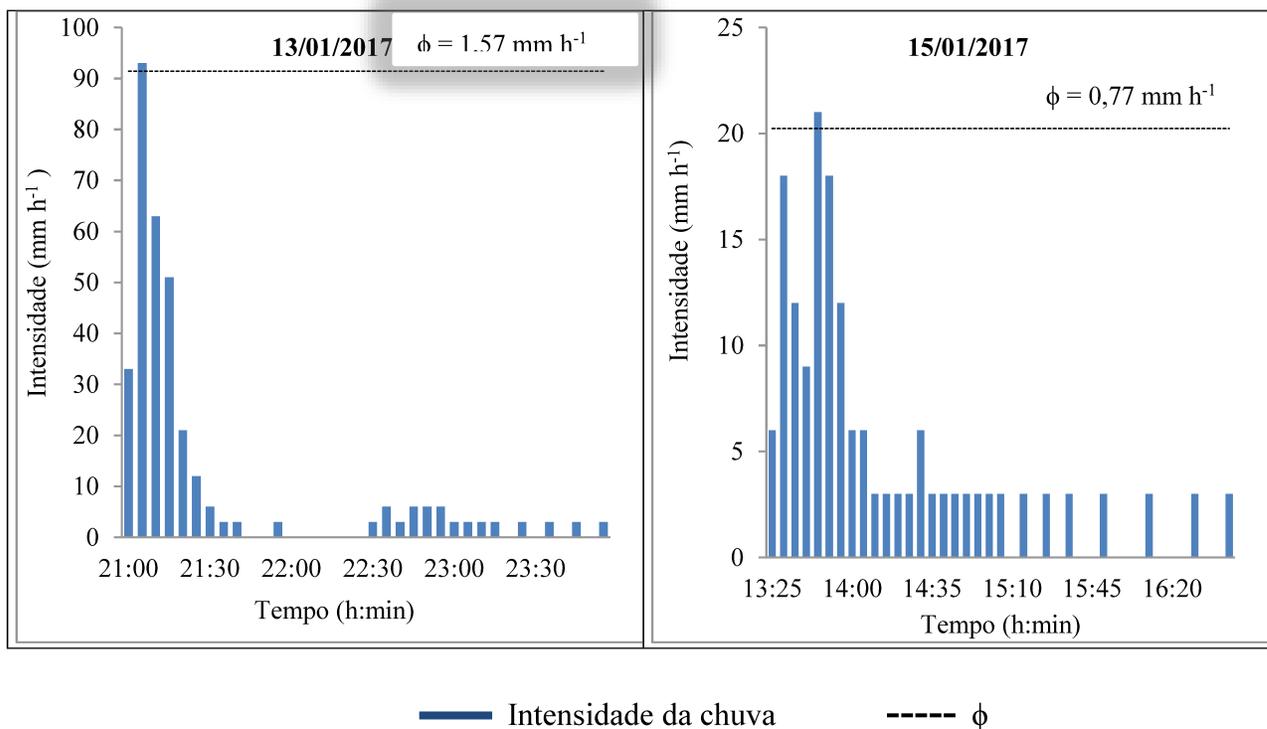
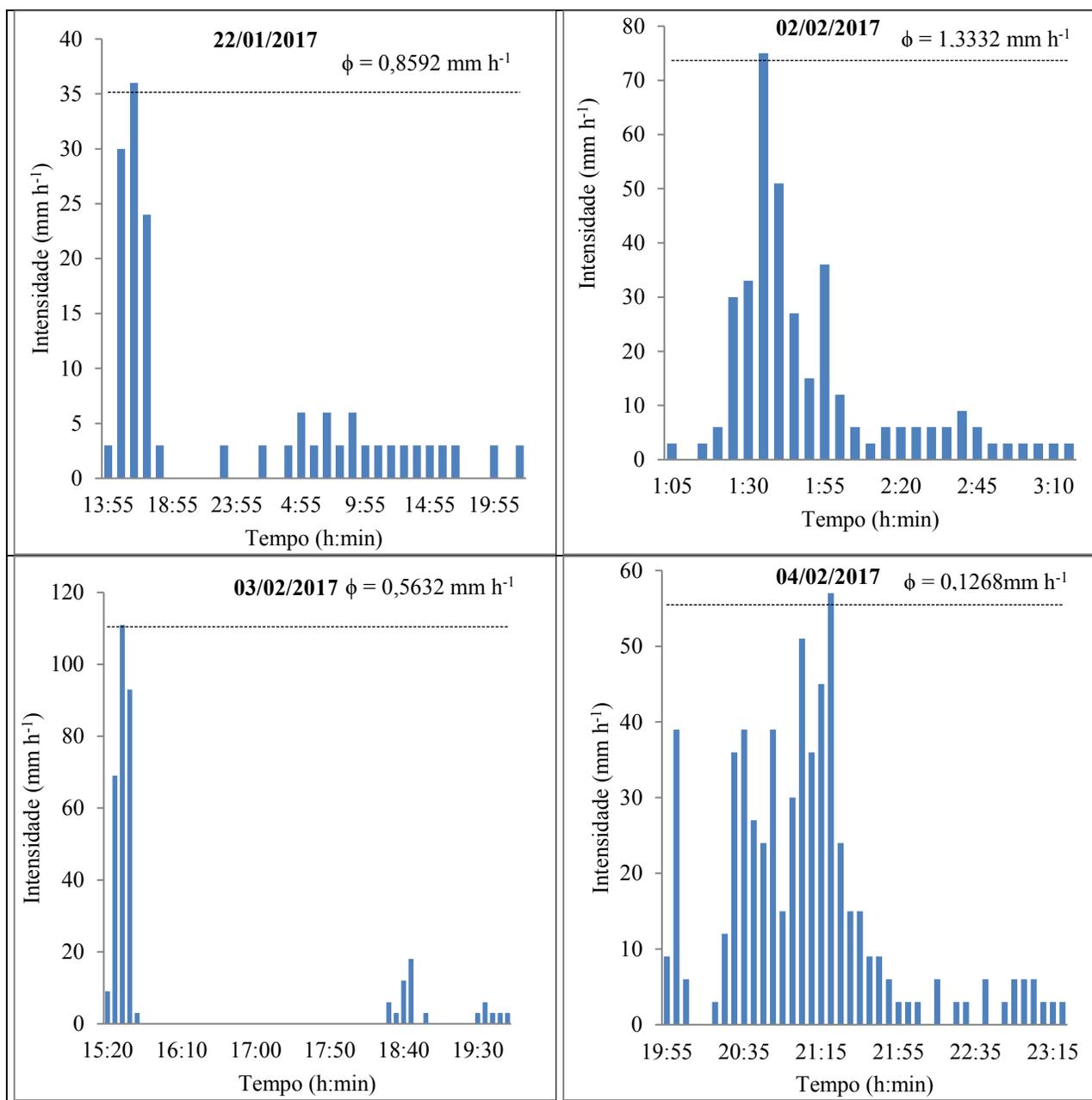


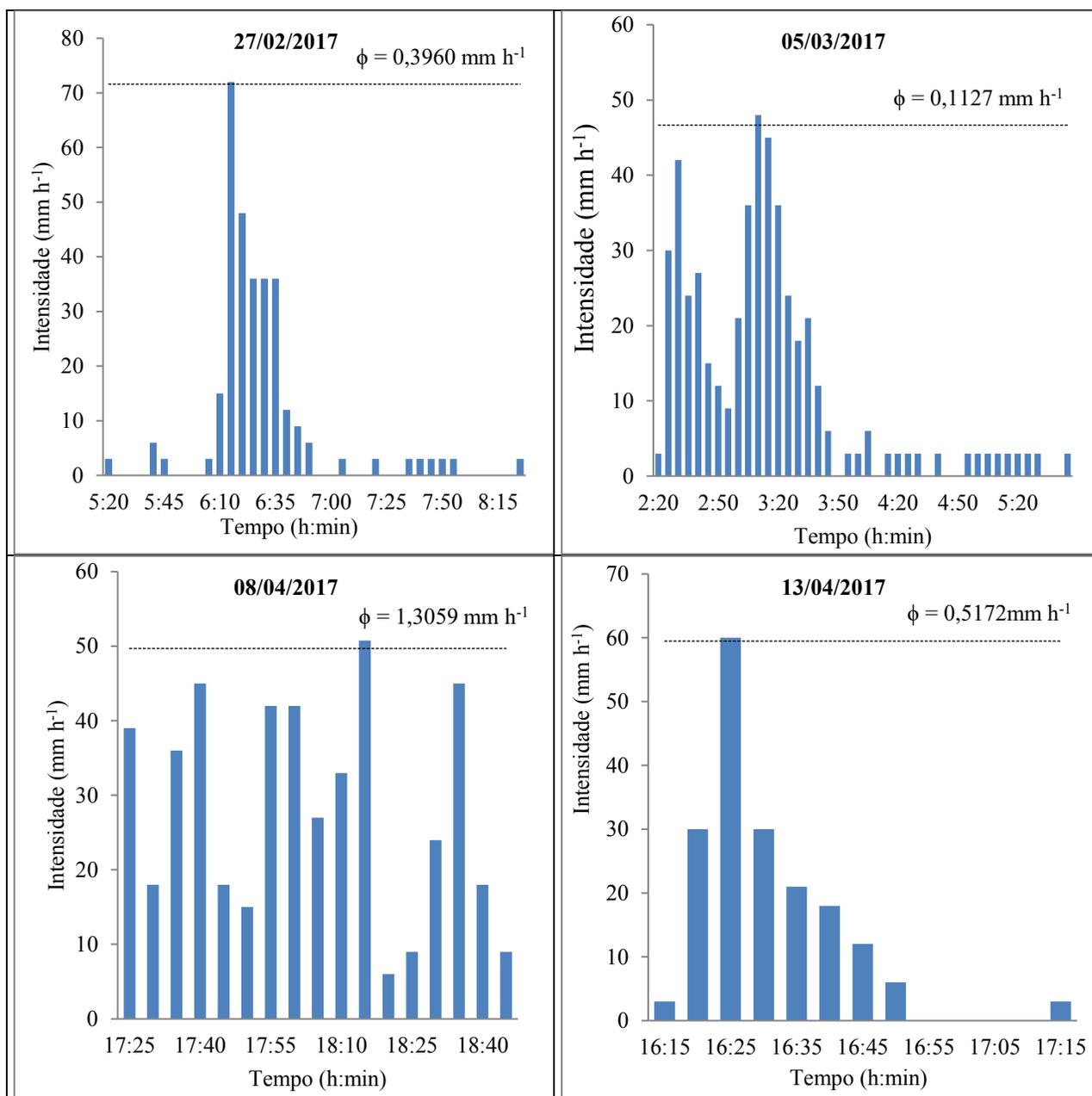
FIGURA 17: Hietogramas de chuva total e do índice ϕ de cada evento ocorrido na BHEAV.

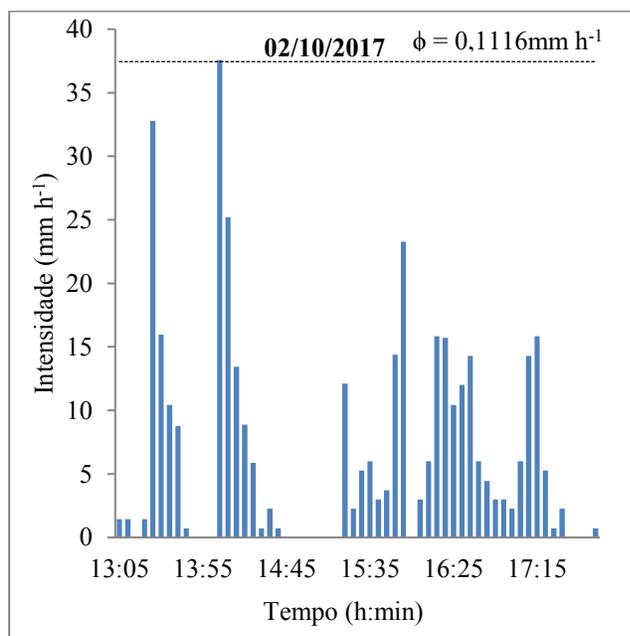
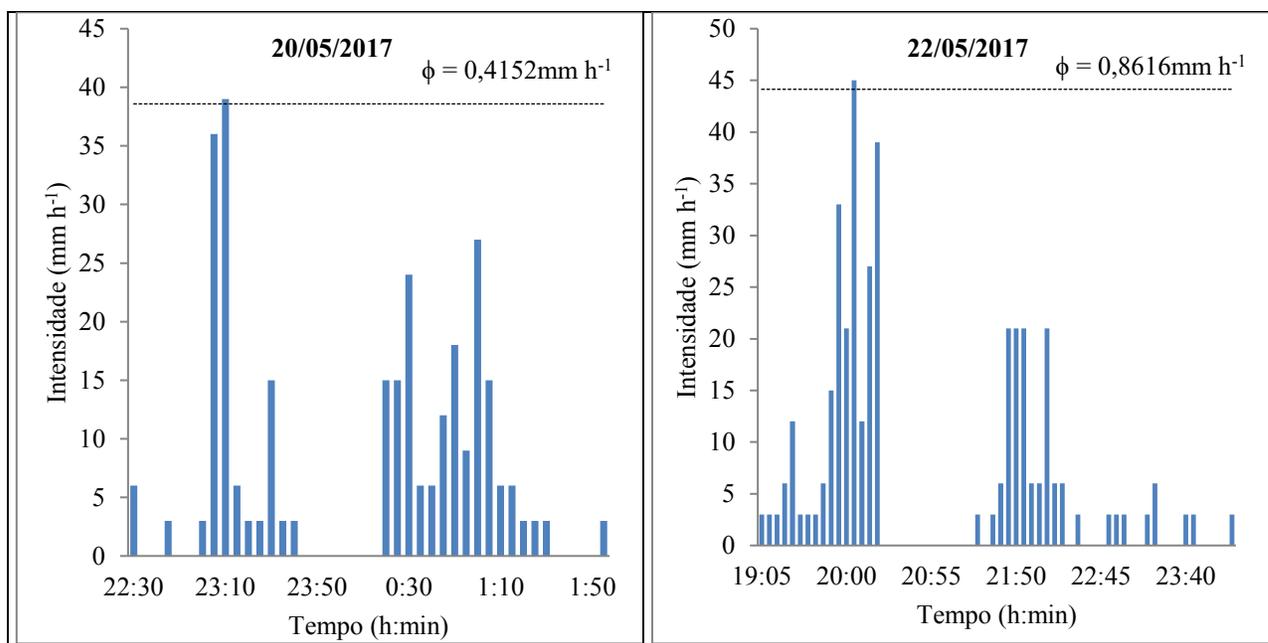




— Intensidade da chuva

----- ϕ





— Intensidade da chuva - - - - ϕ

4.3 Vazões de pico e hidrogramas das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória (BHEGL) e Água Vermelha (BHEAV)

Neste trabalho foram selecionados diferentes cenários de resposta hidrológica das bacias monitoradas. Todos os eventos de chuva selecionados foram aqueles onde se observou precipitação efetiva dada pelo modelo do SCS (obedecendo às Equações 15 e 16).

Na BHEGL onze eventos foram selecionados no período de outubro de 2015 a fevereiro de 2016, com diferentes valores de precipitação. Em relação à BHEAV o monitoramento resultou em nove eventos entre janeiro a maio de 2017.

Após a determinação dos pontos de ascensão e recessão foi possível determinar o ESD e os hidrogramas de cada evento. Os hidrogramas foram construídos de forma que possibilitasse observar o comportamento da vazão ao longo do tempo em resposta a cada evento de chuva. Os hidrogramas foram estimados por dois diferentes métodos de estimativa da chuva efetiva: o método do índice ϕ e do SCS.

Nas Tabelas 10, 11 e 12 estão compilados para a BHEGL, respectivamente, os resultados comparativos da vazão de pico observado (obtido pelo monitoramento da vazão na bacia) e o estimado pelo SCS; o observado e o estimado pelo SCS com a chuva efetiva calculada pelo índice ϕ (SCS- ϕ) e; o observado e o estimado pelo SCS com alteração dos valores do tempo de ascensão do hidrograma (SCS modificado).

Analisando os resultados contidos na Tabela 10, nota-se que as vazões de pico estimadas pelo SCS, seguindo a parametrização contida em NEH (2018), mostrou-se muito diferente daquela observada na estação fluviométrica da bacia. Os erros relativos em módulo ultrapassaram os 666%, sugerindo cuidado na utilização da HUT-SCS para estimativa de vazão de pico, principalmente naqueles projetos hidráulicos que envolvem custos elevados. Por outro lado, nota-se também, que o uso da HUT-SCS promoveria uma segurança acentuada à obra, uma vez que superestima sobremaneira a vazão de pico. Essa discrepância pode ser atribuída à diferença marcante entre o escoamento superficial de direto (ESD) medido e a precipitação efetiva estimada pelo modelo SCS (Q_{scs}). A magnitude dessa diferença pode ser visualizada nas Tabelas 8 e 9.

TABELA 13: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	CNm ¹	Vazões de pico		Erros	
		Observada (L s ⁻¹)	SCS (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
31/10/15	83,56	338,66	202,98	-135,68	-40,06
03/11/15	92,12	297,20	9.946,40	9.649,20	3.246,70
29/11/15	68,10	2.294,51	798,16	-1.496,35	-65,21
30/11/15	83,56	185,62	180,60	-5,02	-2,70
06/12/15	83,56	236,99	1.454,77	1.217,78	513,85
20/12/15	83,56	980,65	8.082,71	7.102,06	724,22
28/12/15	83,56	232,13	963,22	731,09	314,95
04/01/16	83,56	389,21	2.556,98	2.167,77	556,97
19/01/16	92,12	663,44	10.369,31	9.705,87	1.462,96
09/02/16	83,56	402,93	1.001,48	598,55	148,55
29/02/16	83,56	331,33	1.191,64	860,31	259,65
Média	83,71	...	...	...	...
Média |E _{Ai}|²	...	...	...	3.060,88	...
Média |E _{Ai}|³	...	...	...	...	666,89

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ¹CNm se refere ao valor do número da curva médio em cada evento de chuva dessa bacia; ^{2,3}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.

Por outro lado, na Tabela 11, é possível visualizar o bom desempenho do modelo SCS quando a precipitação efetiva foi estimada pelo índice ϕ . O erro relativo em módulo foi de 50,53%, atestando o bom desempenho dessa metodologia. Contudo, a estimativa do índice ϕ em projetos hidráulicos não é simples e exigirá, por parte do projetista, dados de hidrogramas do rio onde a obra será realizada, o que nem sempre existe.

TABELA 14: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS- ϕ , bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	Vazões de pico		Erros	
	Observada (L s ⁻¹)	SCS- ϕ (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
31/10/15	338,66	135,98	202,68	59,85
03/11/15	297,20	573,15	275,95	92,85
29/11/15	2.294,51	1791,22	503,29	21,93
30/11/15	185,62	86,19	99,43	53,57
06/12/15	236,99	441,36	204,37	86,24
20/12/15	980,65	1.665,16	684,51	69,80
28/12/15	232,13	258,36	26,23	11,30
04/01/16	389,21	568,21	179,00	45,99
19/01/16	663,44	1.237,01	573,57	86,45
09/02/16	402,93	311,15	91,78	22,78
29/02/16	331,33	314,59	16,74	5,05

Média $|E_{Ai}|^1$	...	...	259,78	...
Média $|E_{Ai}|^2$	...	...	...	50,53

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ^{1,2}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.

Na Tabela 12 estão compilados os resultados obtidos pela HUT-SCS com alteração do índice de ajuste do tempo de ascensão (X_{Ta}). No modelo de HUT-SCS comumente se adota esse índice como sendo 0,6 (60% do tempo de concentração da bacia). Analisando os resultados contidos na Tabela 12, observa-se que a alteração de X_{Ta} promoveu uma melhora importante no resultado da vazão de pico do método SCS (aqui denominada de SCS modificada), quando comparada com a vazão de pico obtida na bacia. O erro relativo absoluto foi de 2,17%. Apesar disso, nota-se, por meio da Tabela 12, que os valores de X_{Ta} obtidos foram muito variáveis, o que dificulta a indicação de um valor médio confiável.

TABELA 15: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS modificado, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	X_{Ta}^1	Vazões de pico		Erros	
		Observada (L s ⁻¹)	SCS modificado (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
31/10/15	0,36	338,66	338,52	-0,14	-0,04
03/11/15	40	297,20	316,96	19,76	6,65
29/11/15	0,12	2.294,51	2.386,83	92,32	4,02
30/11/15	0,57	185,62	185,61	-0,01	-0,01
06/12/15	2,9	236,99	241,22	4,23	1,78
20/12/15	3,6	980,65	994,16	13,51	1,38
28/12/15	2,5	232,13	225,36	-6,77	-2,92
04/01/16	3,2	389,21	382,92	-6,29	-1,62
19/01/16	5,5	663,44	688,72	25,28	3,81
09/02/16	1,4	402,93	404,51	1,58	0,39
29/02/16	2,2	331,33	327,12	-4,21	-1,27
Média	5,67	...	...	...	...
Média $|E_{Ai}|^2$	...	...	...	15,83	...
Média $|E_{Ai}|^3$	...	...	...	...	2,17

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ¹Constante denominada de índice de ajuste do tempo de ascensão; ^{2,3}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.

Nas Tabelas 13, 14 e 15 estão compilados para a BHEAV, respectivamente, os resultados comparativos da vazão de pico observado e o estimado pelo SCS; o observado e o estimado pelo

SCS com a chuva efetiva calculada pelo índice ϕ (SCS- ϕ) e; o observado e o estimado pelo SCS com alteração dos valores do tempo de ascensão do hidrograma (SCS modificado).

Analisando os resultados contidos na Tabela 13, nota-se que as vazões de pico estimadas pelo SCS, seguindo a parametrização contida em NEH (2018), também se mostrou muito discrepante daquela observada na estação fluviométrica da bacia (erro relativo em módulo de 2.253,17%). Esse comportamento pode ser explicado pela diferença marcante entre o escoamento superficial de direto (ESD) e a precipitação efetiva estimada pelo modelo SCS (Q_{SCS}). Espera-se que quanto maior o CN, maior o percentual de volume escoado. Todavia, exceção ocorreu para o evento 08/04/2017 com um CN inferior comparado com os eventos 13/01/2017 e 03/02/2017, mas com um volume de escoamento superficial direto maior (Tabela 9). Desta forma, Barros et al. (2016) perceberam que apesar do CN remeter ao processo de infiltração, tal fenômeno não está exclusivamente associado a tal parâmetro.

TABELA 16: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	CNm ¹	Vazões de pico		Erros	
		Observada (L s ⁻¹)	SCS (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
13/01/2017	83,08	84,08	1.045,32	961,24	1.143,24
15/01/2017	83,08	56,26	495,62	439,36	780,95
02/02/2017	68,60	75,90	1.158,77	1.082,87	1.426,71
03/02/2017	83,08	49,04	479,20	430,16	877,16
04/02/2017	83,08	149,17	11.611,11	11.461,94	7.683,81
27/02/2017	68,10	23,75	85,29	61,54	259,12
05/03/2017	68,10	83,77	3.441,71	3.357,94	4.008,52
08/04/2017	68,10	112,19	3.477,35	3.365,16	2.999,52
22/05/2017	68,10	80,48	965,34	884,86	1.099,48
Média	74,81	...	...	...	...
Média |EAi|²	...	...	...	2.449,45	...
Média |EAi|³	...	...	...	...	2.253,17

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ¹CNm se refere ao valor do número da curva médio em cada evento de chuva desta bacia; ^{2,3}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.

Na Tabela 14, é possível visualizar o bom desempenho do modelo SCS quando a precipitação efetiva foi estimada pelo índice ϕ . O erro relativo em módulo foi de 155,22%, atestando o bom desempenho dessa metodologia.

TABELA 17: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS- ϕ , bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	Vazões de pico		Erros	
	Observada (L s ⁻¹)	SCS- ϕ (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
13/01/2017	84,08	355,17	271,09	322,42
15/01/2017	56,26	173,65	117,39	208,66
02/02/2017	75,90	197,08	121,18	159,66
03/02/2017	49,04	127,45	78,41	159,89
04/02/2017	149,17	344,57	195,40	130,99
27/02/2017	23,75	58,51	34,76	146,36
05/03/2017	83,77	199,92	116,15	138,65
08/04/2017	112,19	193,05	80,86	72,07
22/05/2017	80,48	127,37	46,89	58,26
Média |EAi|¹	...	...	118,01	...
Média |EAi|²	...	...	...	155,22

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ^{1, 2}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.

Na Tabela 15 estão compilados os resultados obtidos pela HUT-SCS com alteração do índice de ajuste do tempo de ascensão (X_{Ta}). Analisando os resultados contidos nessa tabela, observa-se, assim como verificado na BHEGL, que a alteração de X_{Ta} promoveu uma melhora importante no resultado da vazão de pico do método SCS, quando comparada com a vazão de pico obtida na bacia. O erro relativo absoluto foi de 1,37%. Apesar disso, nota-se, por meio da Tabela 15, que os valores de X_{Ta} obtidos na BHEAV foram apresentaram menor variação do que aqueles estimados para a BHEGL (Tabela 12).

TABELA 18: Resultados da vazão de pico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), obtidas no hidrograma da bacia (Observado) e pelo método SCS modificado, bem como seus respectivos erros absoluto e relativo.

Data dos hidrogramas	X_{Ta}^1	Vazões de pico		Erros	
		Observada (L s ⁻¹)	SCS modificado (L s ⁻¹)	Absoluto (EA) (L s ⁻¹)	Relativo (ER) (%)
13/01/2017	3,70	84,08	83,67	-0,41	-0,49
15/01/2017	3,10	56,26	57,5	1,24	2,20
02/02/2017	2,40	75,90	74,88	-1,02	-1,34
03/02/2017	3,10	49,04	50,55	1,51	3,08
04/02/2017	9,00	149,17	147,81	-1,36	-0,91
27/02/2017	1,55	23,75	23,33	-0,42	-1,77
05/03/2017	5,10	83,77	84,88	1,11	1,33
08/04/2017	4,45	112,19	113,08	0,89	0,79
22/05/2017	2,65	80,48	80,15	-0,33	-0,41
Média	3,79	...	...	...	...
Média |EAi|²		...	...	0,92	...
Média |EAi|³		...	...	...	1,37

Nota: a simbologia “...” indica que o valor numérico não foi calculado; ¹Constante denominada de índice de ajuste do tempo de ascensão; ^{2,3}Os valores médios expostos provém do cálculo de EA e ER a partir dos valores estimados de erro absoluto e relativo, de cada data, em módulo.

Nas Figuras 18 e 19 estão plotados os hidrogramas obtidos na BHEGL e BHEAV, respectivamente. Por meio dessas figuras é possível notar também, os comportamentos dos hidrogramas SCS, SCS- ϕ e SCS modificado. Em relação SCS- ϕ , nota-se o bom ajuste do mesmo em relação ao hidrograma observado. No entanto, verifica-se que este método promoveu um atraso maior para a vazão de pico nas duas bacias.

No que diz respeito ao modelo SCS modificado, nota-se (Figuras 18 e 19) que o ajuste do novo valor para o índice do tempo de ascensão do hidrograma (X_{Ta}) promoveu uma melhora acentuada no desempenho do modelo de HUT do SCS, principalmente na BHEAV. Neste caso, essa melhora está ligada com as características físicas da bacia e refletidas no comportamento da vazão. Na BHEAV o córrego demora a responder ao evento de chuva e, da mesma forma, é lento para voltar à cota antes da chuva. Por outro lado, o córrego principal da BHEGL reflete rapidamente o escoamento superficial da bacia, tanto na subida quando na descida da sua cota. Isso pode ser explicado que a BHEAV por ter coeficiente de compacidade (Kc) próximo à zero tem menor propensão a grandes enchentes, como reflexo de seu formato alongado. Diferente que ocorre com a BHEGL que possui um coeficiente de compacidade (Kc) próximo a 1,5 e segundo Mello e Silva (2013) coeficiente de compacidade próximo a este valor tem maior propensão de ocorrência de enchentes.

Ainda é possível verificar que o comportamento da vazão nem sempre é estável, havendo casos em que a ascensão do hidrograma acontece em dois momentos. Esse comportamento pode ser explicado pela distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia que pode não ser atingida de forma uniforme pela chuva que gerou o hidrograma. Além disso, esse comportamento pode estar relacionado com a diferença no tempo e no volume de escoamento oriundos das sub-bacias, conforme relatado em NEH (2018).

Nos resultados provenientes dos hidrogramas nas duas bacias foram verificados que, de forma geral, os modelos foram capazes de estimar de forma adequada os hidrogramas decorrentes dos eventos de chuva analisados, com exceção do modelo SCS. Foi possível constatar que a vazão de pico pelo SCS- ϕ e pelo SCS modificado foi bem próxima daquele observado nas bacias.

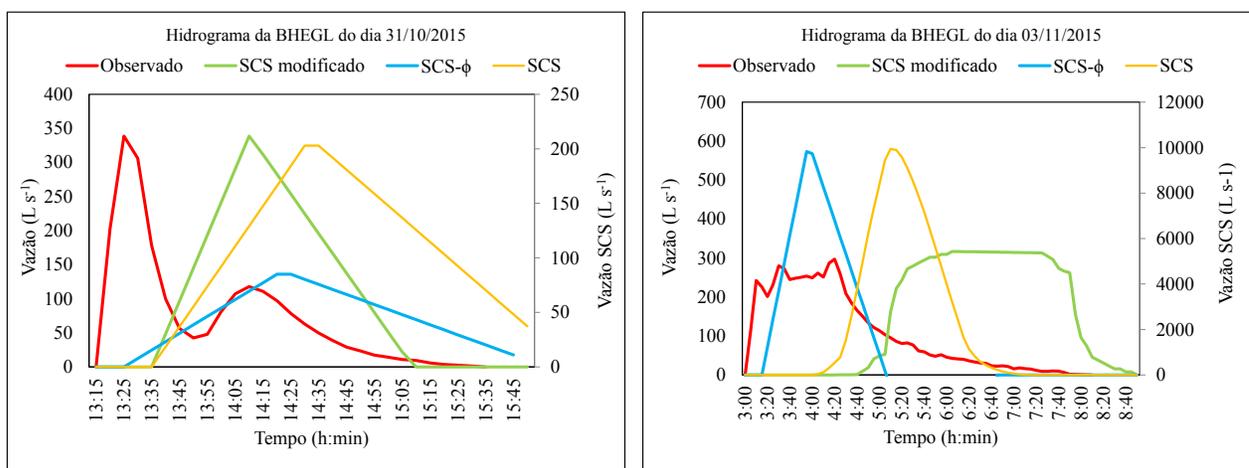
Nota-se que alguns hidrogramas apresentaram mais de um pico de vazão, tanto na BHEAV quanto na BHEGL, os quais ocorrem devido ao número de sucessivas chuvas efetivas. Leandro et.al (2013) constataram em seus estudos que os hidrogramas obtiveram quatro picos de vazões

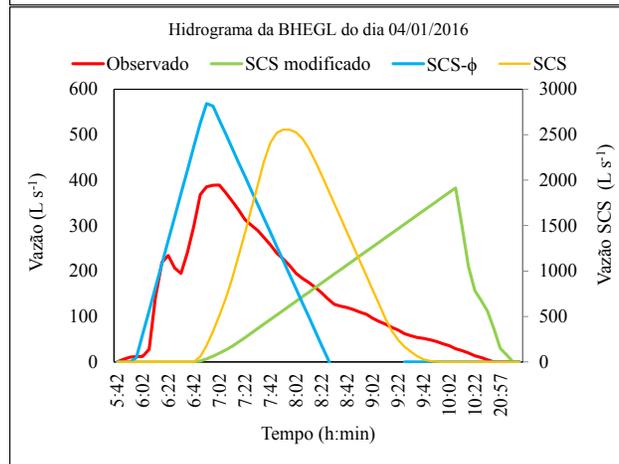
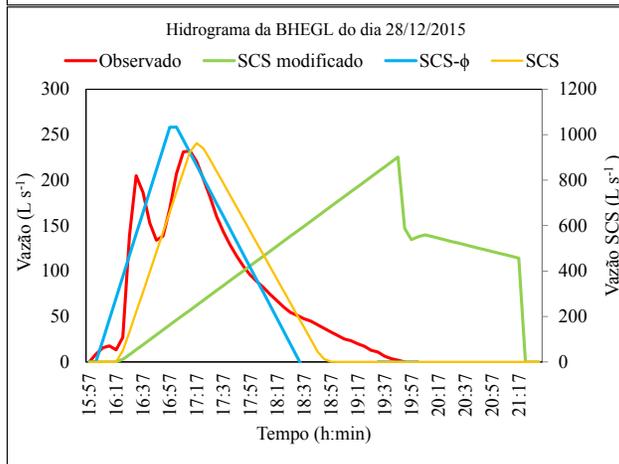
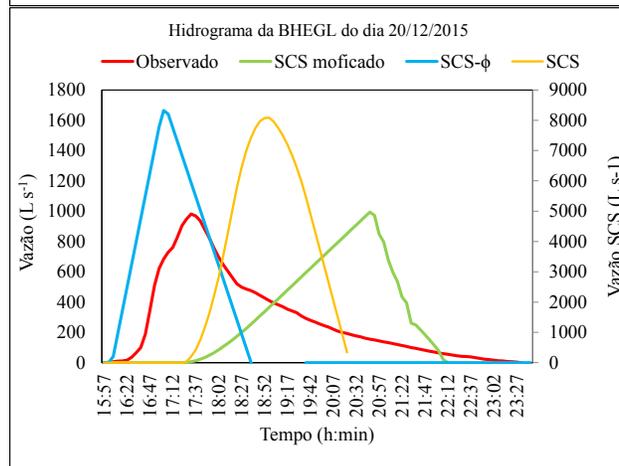
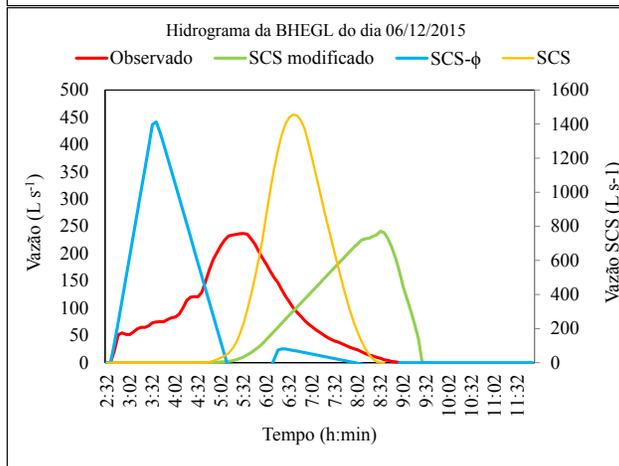
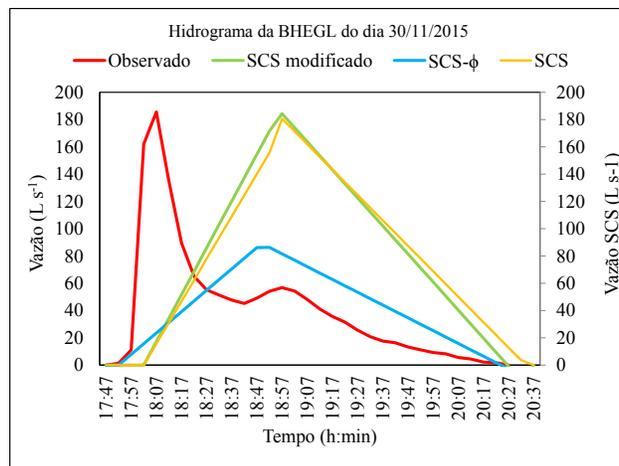
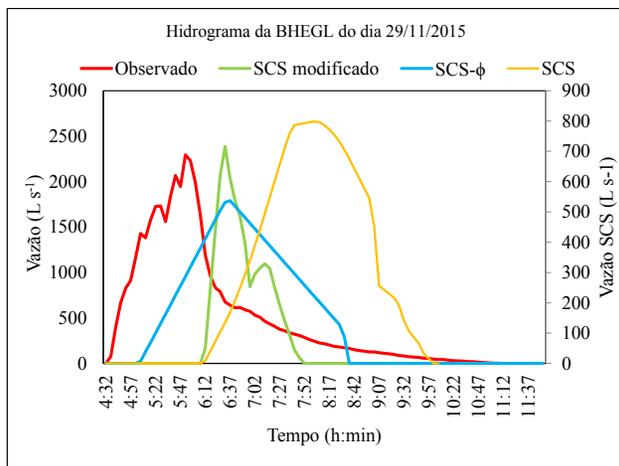
consecutivos, devido a dois eventos de chuva bastante próximos. Sendo assim, a distribuição temporal da precipitação na bacia influencia diretamente a forma dos hidrogramas.

Os resultados da vazão de pico foram superiores para a BHEGL (Figura 18) quando comparados à BHEAV (Figura 19). Isso pode ser explicado pela área impermeável na BHEGL e também pelo fato de a mesma possui maior declividade, quando comparada com a BHEAV, resultando o aumento do escoamento superficial e consequentemente nos maiores valores de vazão de pico. Mishra et. al. (2014) também verificaram que bacias com declividades maiores resultaram em escoamento superficiais elevados.

Deve ser ressaltado que o modelo de hidrógrafa HUT-SCS foi desenvolvido para determinadas condições de bacias hidrográficas norte-americanas. Ele é amplamente empregado no Brasil na área de engenharia hidrológica (NUNES, 2015). Como pôde ser observado nos resultados deste estudo, o método SCS, como descrito em NEH (2018), para a estimativa da vazão de pico não foi adequado para as bacias hidrográficas analisadas, promovendo na grande maioria dos casos, uma superestimativa da vazão de pico. Diferente dos resultados aqui obtidos, Santos (2010) verificou que as vazões máximas obtidas por meio do método SCS foram subestimadas em relação aos valores medidos na bacia hidrográfica. Kang et.al. (2013) avaliaram a vazão de pico por diferentes métodos em duas bacias da Coreia e também concluíram que o método superestimou a vazão máxima.

FIGURA 18: Hidrogramas observados na seção de controle da BHEGL e hidrogramas estimados pelos métodos SCS- ϕ , SCS e SCS modificado





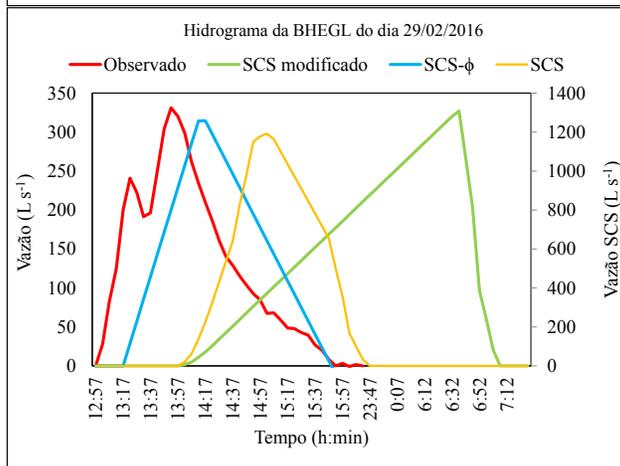
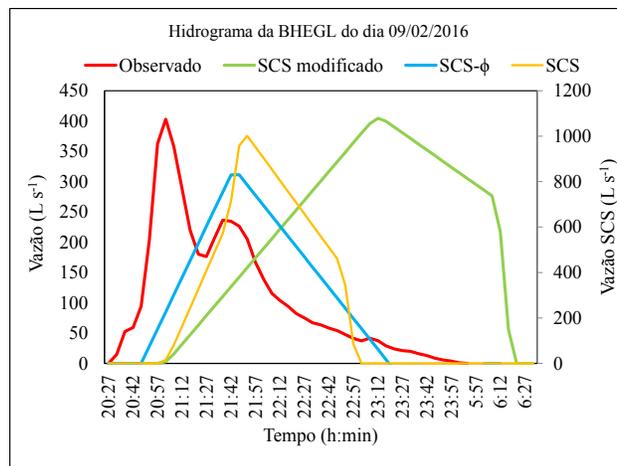
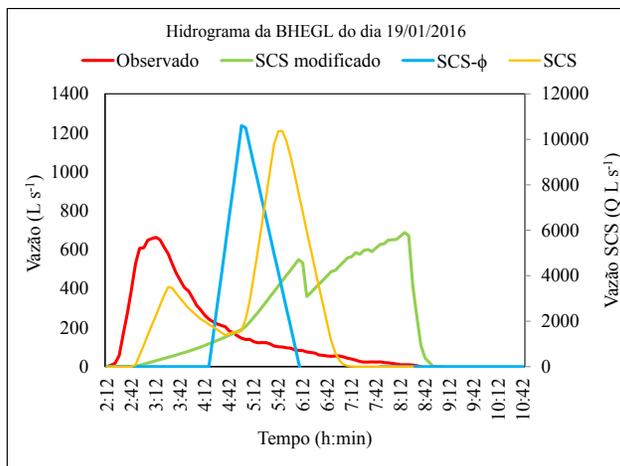
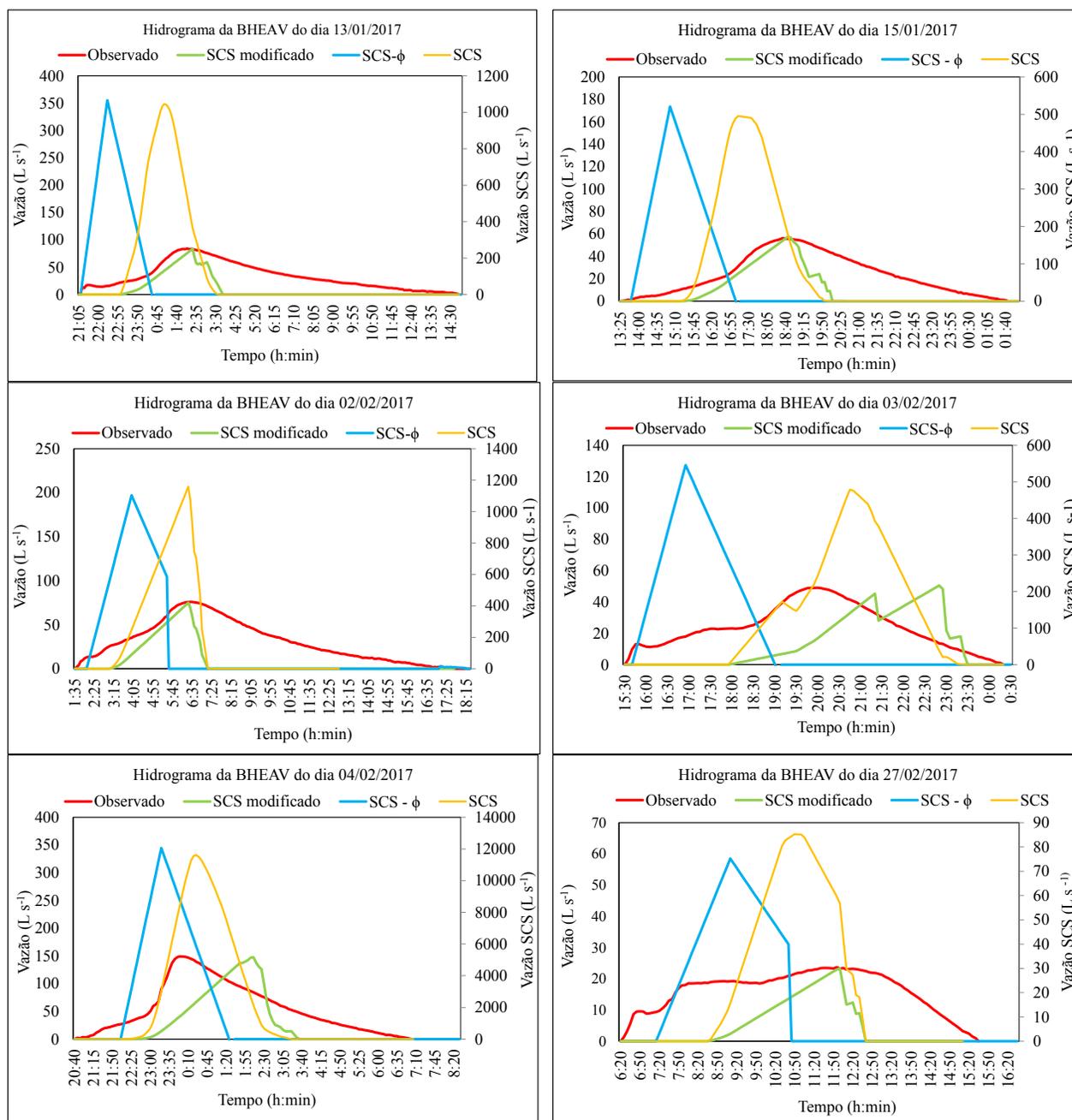
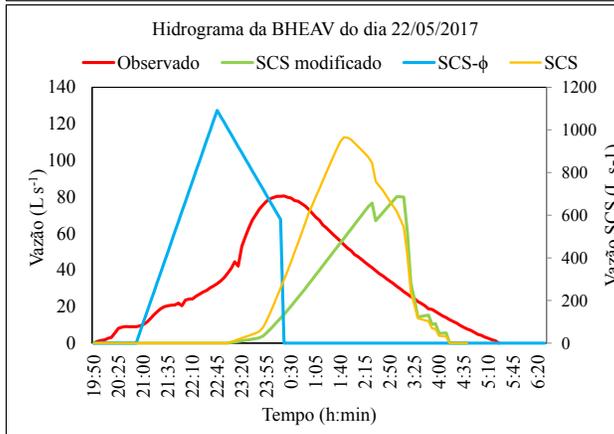
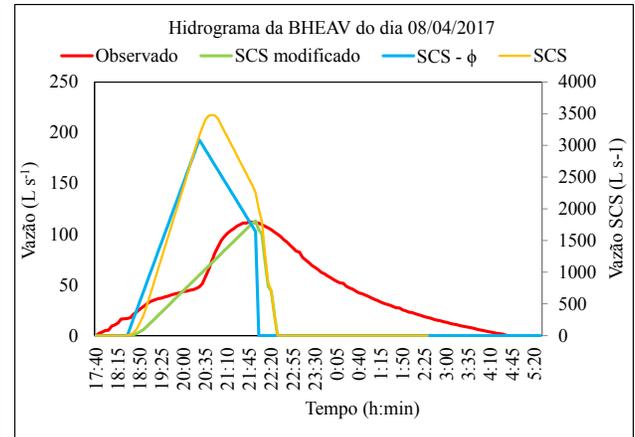
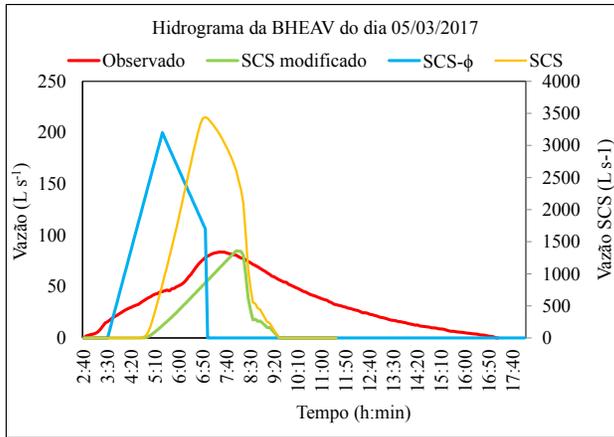


FIGURA 19: Hidrogramas observados na seção de controle da BHEAV e hidrogramas estimados pelos métodos SCS- ϕ , SCS e SCS modificado





5. CONCLUSÕES

Os resultados provenientes dos hidrogramas nas duas bacias mostraram que o método do hidrograma unitário triangular do SCS superestimou os resultados de vazão de pico nas bacias estudadas, resultado em erros relativos médios de mais de 666,89%. Quando se utilizou a precipitação efetiva estimada pelo índice ϕ , no lugar da precipitação efetiva estimada tradicionalmente pelo método HUT-SCS, os valores das vazões de pico se aproximaram daquelas medidas nas bacias estudadas, e o erro relativo médio ficou abaixo de 160%. Além disso, quando se utilizou o método da hidrógrafa unitária triangular do SCS, com ajuste para o tempo de ascensão do hidrograma, os valores das vazões de pico estimadas se aproximaram daquelas medidas nas bacias estudadas, com erro relativo médio abaixo de 2,17%.

REFERÊNCIAS

- ALEMAYEHU, F. et al. The impacts of watershed management on land use and land cover dynamics in Eastern Tigray (Ethiopia). **Journal Resource Conservation and Recycling**, [S.l.], v. 53, p. 192–198, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344908002036?via%3Dihub>>. Acesso em: 4 dez. 2017. DOI : 10.1016/j.resconrec.2008.11.007.
- ANDRADE, M.A. et al. 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. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Samuel_Beskow/publication/262429900_Hydrological_simulation_in_a_watershed_with_predominance_of_Oxisol_in_the_Upper_Grande_river_region_MG_-_Brazil/links/53f1e6860cf2711e0c460dcf.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2018.
- BARROS, A. M. et al. Variabilidade e causas na geração de vazão em bacias urbanas: estudo de caso do riacho do sapo, Maceió-AL. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, Salvador, v. 4, n. 2, p. 220-231, 2016. Disponível em: <<https://portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/15636/12935>>. Acesso em: 24 jan. 2018. ISSN: 2317-563X.
- BESKOW, S. et al. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009. Disponível em : <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000100018&lng=pt&lng=pt> Acesso em: 6 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100018>.
- BHUYAN, M. K. et al. Flood Hydrograph with Synthetic Hydrograph. **Journal Water Resources Mangement**. [S.l.], v 29. p. 5765-5782, Sept. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11269-015-1145-1>>. Acesso em: 5 nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1145-1>
- BHUYAN, S.J. et.al. Watershed-scale AMC selection for hydrologic modeling. **Trans ASAE**, St. Joseph, Mich. v. 46, p.237–244, 2003. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=12981&CID=t2003&v=46&i=2&T=1>>. Acesso em: 9 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.12981>.
- BOSCH, D. D. et.al .Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, New York, Elsevier, etc, v. 10. p.110-121, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581816301501?via%3Dihub>> Acesso em: 15 jan. 2018. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.02.002.
- BRASIL. **Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm> .Acesso em: 5 set. 2017.

CASTRO, A. S. et al. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 263-273, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Andre_Luiz_Lopes_Da_Silveira/publication/305306473_Avaliacao_da_Evolucao_do_Comportamento_Quantitativo_de_Pavimentos_Permaveis_no_Contr ole_do_Escoamento_Superficial/links/57c8279008aec24de044d486/Avaliacao-da-Evolucao-do-Comportamento-Quantitativo-de-Pavimentos-Permeaveis-no-Controle-do-Escoamento-Superfici al.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2018.

CHOW, V. T. **Handbook of applied hydrology**: Sec 14. New York: McGraw-Hill, 1959.

CLARK, C.O., 1945; Storage and the unit hydrograph. Trans.. **The practical research on flood forecasting based on artificial neural networks**. Expert Syst. Appl. 37 (4), 2974–2977. ASCE

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2015. 342 p.

CRUZ, L. M. et. al. Abordagem cartográfica da fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Glória –MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 62, n.03, p. 505-516, 2010. Disponível em: < <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/250/238>>. Acesso em: 5 out. 2017. ISSN 0560-4613.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.

FORBES, F. J; HODGES, R. C. New Approaches to Comprehensive Planning in Canada. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, Va. : The Association, c1997, v. 7, n. 5, 1971. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.1971.tb05026.x/abstract>>. Acesso em: 15 jan. 2018. Doi: 10.1111/j.1752-1688.1971.tb05026.x.

GENOVEZ, A.M. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2001. cap.1, p. 3-13.

HORNER, W.W; FLYNT, F.L. Relation between rainfall and runoff from small urban area. **Transactions of ASCE**, v. 101, p140-183, 1936.

INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ALCOOL - IAIA. **Levantamento Detalhado dos solos da Estação Experimental Regional do Triângulo Mineiro**. Uberlândia: IAIA, 1982, p. 82.

JUNG, S.W., MOON, J.W., 2001. The comparison of existing synthetic unit hydrograph method in Korea. **Journal of Korea Water Resources Association**, [S.l.] v.34, n. 6, p.659-672, 2001. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/264134170_The_Comparison_of_Existing_Synthetic_Unit_Hydrograph_Method_in_Korea>. Acesso em: 20 dez. 2017.

KANG, M.S. Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds. **Journal of Hydro-environment Research**, [S.l.], v. 7, p. 209-218., 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157064431300004X?via%3Dihub> Acesso em: 18 out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.01.003>.

KIRPICH, Z.P. **Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering**, Texas. The original source for the Kirpich equation. . 10 (6), 362, 1940.

KOMATSU, H; KUME, T; SHINOHARA, Y; MYAZAWA, Y; OTSUKI, K. Did annual runoff and low flow decrease with reduced forestry practices in Japan? **Hydrological Process**, Chichester, Sussex, England : Wiley, c1986. v. 24. p. 2440-2451, 2010. Disponível em: <
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.7657/abstract>>. Acesso em: 22 jan. 2018. DOI: 10.1002/hyp.7657.

LEANDRO, J; LEITÃO; J.P; LIMA, J.L.M.P. Quantifying the uncertainty in the Soil Conservation Service flood hydrographs: a case study in the Azores Islands. **Journal of Flood Risk Management**, [S.l.], v. 6 n. 3, p. 279-288, 2013. Disponível em: <
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfr3.12010/abstract> > Acesso em: 14 dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12010>.

LEE, S.J., Choi, H., Shin, H.B., Park, S.K. An analysis of PMF and critical duration for design of hydraulic structures. **Journal of Korea Water Resources Association**, [S.l.], v. 37, n. 9, p. 707-718, 2004. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/publication/250271683_An_Analysis_of_PMF_and_Critical_Duration_for_Design_of_Hydraulic_Structure>. Acesso em: 13 set. 2017. DOI: 10.3741/JKWRA.2004.37.9.707.

MAIDMENT, D.R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, Inc, 1992.

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. Disponível em: <
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281984%29110%3A7%28887%29>>. Acesso em: 24 jan. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:7\(887\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(887))

MELLO, C. R., SILVA, A. M. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Ed. da Universidade UFLA. 2013, 455 pág.

MICHEL, C; Vazken, A; Perrin, C. Soil Conservation Service curve number method: how to mend a wrong soil moisture accounting procedure. **Water Resources Research**, Washington [etc.] American Geophysical Union, v.41, W02011, p. 1-6, 2005. Disponível em: <
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003191/epdf>>. Acesso em: 12 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004WR003191>.

MISHRA, S. K. et. al. Experimental Verification of the Effect of Slope and Land Use on SCS Runoff Curve Number. **Journal Water Resources Management**, [S.l.], v. 38, p. 3407-3416, 2014. Disponível em: <
<https://link-springer-com.ez34.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs11269-014-0582-6.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2018. DOI: 10.1007/s11269-014-0582-6.

Natural Resources Conservation Service – NRCS. **National Engineering Handbook Hydrology – NHE**. Washington D.C. USDA, 1972. Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>> Acesso em: 30 jan. 2018.

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. Disponível em: <<http://www.coluni.ufv.br/revista-antiga/docs/volume03/analiseEspacial.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2017.

PAIVA, J.B.D; PAIVA, E.M.C **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. ABRH.1.ed. Porto Alegre,2016. ISBN 978-8868-60-2. 628p.

PINTO, N. S. et al. **Hidrologia Básica**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo - SP, 1976.

PONCE, V. M; HAWKINS, R. H, MEMBERS , ASCE..Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v.1, p.11–19, 1996. Disponível em:<<https://www.uvm.edu/~bwemple/HydroModel/ponce1996.pdf><. Acesso em: 23 jan.2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11)).

Ponce, V.M. Managemant of droughts and flood in the semiarid Brazilian northeast. The case for conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, [S.l.], v.50, n.5, p.422-431, 1995. Disponível em: <<http://go-galegroup.ez34.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?&id=GALE|A17524348&v=2.1&u=cap&it=r&p=AONE&sw=w&authCount=1>>. Acesso em: 27 jan. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11)).

POOL, S. et.al.Prediction of hydrographs and flow-duration curves in almost ungauged catchments: Which runoff measurements are most informative for model calibration? **Journal of Hydrology**, Amsterdam, New York, Elsevier, etc, v. 554, p 613-622, 2017.Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S002216941730642X/1-s2.0-S002216941730642X-main.pdf?_tid=f36b95da-0e83-11e8-bd03-00000aab0f27&acdnat=1518282232_57a41e2def45dac52602b11e98c05edd>. Acesso em: 25 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.037>.

RAMOS, F. et al. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH/UFRJ, 1989. 404 p. ISBN 8571080534.

SALBEGO, A. G. Resposta do escoamento superficial a diferentes precipitações na sub-bacia hidrográfica do Arroio Grande. **Anais Inpe**, [S.l.]. v.17. p. 5384-5391, 2015. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.57.16>>. Acesso em: 25 fev 2018.

SANTO, C.A. et al. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do Rio Pardo. **Holos**, Natal-RN. v.7. p. 179-193, 2016. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4892>>. Acesso em : 23 fev. 2018. DOI: 10.15628/holos.2016.4892

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. 2010. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

SANTOS, M.L. et. al. Estudo do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Ivaí, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.] . v.14 . n.13. p. 259-267, 2013. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/290632152_ESTUDO_DO_ESCOAMENTO_SUPERFICIAL_NA_BACIA_HIDROGRAFICA_DO_RIO_IVAI_PARANA_BRASIL>. Acesso em: 12 jan. 2018. DOI: 10.20502/rbg.v14i3.286

SARTORI, A., et al. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v 10, n.4, p 19-29, 2005. Disponível em: <

https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/26/2ad1ccf5cc715b1182f18ada4b78a527_94e5e2ff168aa7bdb82e9438b8838466.pdf>. DOI: 10.21168/rbrh.v10n4.p19-29.

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

SHINOHARA, Y. et.al . Impact of climate change on runoff from a mid-latitude mountainous catchment in central Japan. **Hydrological Processes**, Chichester, Sussex, England : Wiley, c1986. v. 23. p. 1418-1429, 2009. Disponível em:

<http://www-periodicos-capes-gov-br.ez34.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pmetabusca&mn=88&smn=88&type=m&metalib=index.php?option=com_pmetabusca&mn=88&smn=88&type=m&metalib=aHR0cDovL3JucC1wcmltby5ob3N0ZWQuZXhsaWJyaXNncm91cC5jb20vcHJpbW9fbGliemFyeS9saWJ3ZWVvYWN0aW9uL3NIYXJjaC5kbz92aWQ9Q0FQRVNFVjE=&Itemid=119>. Acesso em: 28 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7264>.

SILVEIRA, G.M. **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. 243 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2010.

SILVEIRA, L. B. P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia – MG**. 86 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós- Graduação em Qualidade Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SNYDER, F.F. Synthetic unit-graphs. **Transaction, American Geophysical Union**, [S.l.], v. 19, p. 447–454, 1938. Disponível em: <<http://www.cccounty.us/DocumentCenter/View/3709>>. Acesso em: 15 agosto 2017. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR019i001p00447>.

THOMAS, H; NISBET, T.R. Slowing the flow in pickering: quantifying the effect of catchment woodland planting on flooding using the soil conservation service curve number method. **Journal of Safety and Security Engineering**, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 466–474, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312639012_SLOWING_THE_FLOW_IN_PICKERING_QUANTIFYING_THE_EFFECT_OF_CATCHMENT_WOODLAND_PLANTING_ON_FLOODING_USING_THE_SOIL_CONSERVATION_SERVICE_CURVE_NUMBER_METHOD>. Acesso: 9 jan. 2018. DOI: 10.2495/SAFE-V6-N3-466-474/002

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 4.ed, 2014.

WARD, R.C and ROBINSON, M. **Principles of Hydrology**. McGraw-Hill. London, 2000.

Wilken, P.S. **Engenharia de Drenagem Artificial**. São Paulo: CETESB, 1978.

YAO, H.X. et. al. Runoff reduction by forest growth in Hiji River basin, Japan. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l], v. 54. p. 556-570, 2009. Disponível em: <
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1623/hysj.54.3.556> >. Acesso em: 29 jan. 2018. DOI:
<https://doi.org/10.1623/hysj.54.3.556>

YUE, S. HASHINO, M. Statistical interpretation of the impact of forest growth on streamflow of the Sameura basin, Japan. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, Holland ; Boston : D. Reidel Pub. Co., c1981-, 104. p. 369-384, 2005. Disponível em: <
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-005-1679-4>>. Acesso em: 8 jan. 2018. DOI:
<https://doi.org/10.1007/s10661-005-1679-4>.

ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas**. 99 p. Dissertação (Doutorado). EESC- Universidades de São Paulo, São Carlos, 1998.