

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

**APLICABILIDADE DE MODELOS DE HIDROGRAMA UNITÁRIO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS HIDROLOGICAMENTE DISTINTAS**

Gabriela Schiavon Nunes

Pelotas, 2015

Gabriela Schiavon Nunes

**APLICABILIDADE DE MODELOS DE HIDROGRAMA UNITÁRIO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS HIDROLOGICAMENTE DISTINTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N972a Nunes, Gabriela Schiavon

Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas / Gabriela Schiavon Nunes ; Samuel Beskow, orientador. — Pelotas, 2015.

190 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Hidrologia. 2. Cheias. 3. Modelagem e monitoramento hidrológico. 4. Bacia hidrográfica do Arroio Cadeia. 5. Bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará. I. Beskow, Samuel, orient. II. Título.

CDD : 551.48

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Gabriela Schiavon Nunes

APLICABILIDADE DE MODELOS DE HIDROGRAMA UNITÁRIO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS HIDROLOGICAMENTE DISTINTAS

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 26/08/2015

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras
.....

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras
.....

Prof. Dr. Luis Carlos Timm

Doutor em Agronomia pela Universidade de São Paulo
.....

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola

Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Beskow por todo conhecimento compartilhado e pela paciência ao longo do período de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade de realização do mestrado e aperfeiçoamento profissional.

À minha família por sempre acreditarem em mim e me darem força sempre que precisei ao longo dessa caminhada! E em especial à minha mãe, que sempre dedicou a sua vida pela nossa família!

Aos meus queridos colegas de mestrado Bernardo, Guilherme, Mariana, Caroline e Fernanda pela convivência, pelo apoio, pela parceria e pela amizade!

Ao Técnico em Hidrologia Reginaldo Galski Bonczynski, pelas inúmeras saídas de campo na chuva para medição de vazão no Arroio Cadeia e pelo grande suporte técnico!

Aos colegas do Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, Alice Steinmetz, Cristian Veber, Daiana Minks, Diego Ricci, Edison Lucas, Eduardo Rosa, Everton da Luz, Laura Kerstner, Léo Ávila, Leonardo Corrêa, Maíra Moura, Marcelle Vargas, Marlon Mahl, Nathália Chites, Tamara Caldeira e Zandra Cunha.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, por todo conhecimento compartilhado, e em especial à Prof^a. Idel, pelo apoio e amizade!

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul pela bolsa concedida.

*O correr da vida embrulha tudo, a vida é
assim:
esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.
(Guimarães Rosa)*

Resumo

NUNES, Gabriela Schiavon. Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas. 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

Eventos extremos de precipitação, combinados com aumento da população, intensificação de atividades agrícolas e uso inadequado do solo, têm culminado em inúmeros problemas relacionados a cheias em bacias hidrográficas. A gestão dos recursos hídricos é considerada bastante desafiadora e o monitoramento hidrológico tem sido uma importante ferramenta. No entanto, o monitoramento hidrológico ainda é um fator limitante de modo que comumente técnicos da área de recursos hídricos se deparam com a ausência de dados no local de interesse. No caso da gestão de cheias em bacias hidrográficas, os dados de vazão são substanciais na compreensão do comportamento hidrológico quando da ocorrência de um evento de chuva intensa. Esta carência de dados hidrológicos tem resultado no desenvolvimento de modelos para estimativa de hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD) resultantes de eventos de precipitação. O ESD é o componente mais importante para análise de vazões decorrentes de eventos extremos de chuva. Dentre as técnicas de modelagem de ESD, deve ser destacada a teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI). O objetivo deste trabalho foi avaliar os modelos de HU Triangular (HUT), HU Adimensional (HUA), HUI de Nash (HUIN), HUI de Clark (HUIC), HUI de Nash Geomorfológico (HUING) e HUI de Clark Geomorfológico (HUICG) para determinação do hidrograma de ESD decorrentes de eventos de precipitação em uma bacia hidrográfica localizada no Rio Grande do Sul e outra em Minas Gerais. As informações básicas para utilização de tais modelos de HU e HUI foram as variáveis topográficas extraídas dos modelos digitais de elevação e dados hidrológicos de cada bacia. Foi estabelecida a curva-chave de cada seção de controle no intuito de converter dados linimétricos em dados de vazões. Com base nos eventos chuva-vazão escolhidos para cada bacia, pôde-se constituir o hietograma de cada evento e o hidrograma correspondente. A separação de escoamento foi realizada usando o método das inflexões, enquanto a determinação das precipitações efetivas (P_e 's) foi realizada pelos métodos do Índice ϕ , CN e CN modificado. Foi possível constatar que: i) as suposições da técnica de HU e de HUI foram válidos para a modelagem do hidrograma de ESD para as duas bacias hidrográficas analisadas; ii) houveram diferenças nos hidrogramas de ESD estimados nas duas bacias pelos modelos de HU e HUI empregados; iii) além de ter sido verificado o impacto das diferenças de características fisiográficas entre as bacias, especialmente aquelas vinculadas ao solo, na modelagem de cheias, também foi constatado

que a diferença do padrão de chuvas entre as duas regiões exerceu influência na referida modelagem; iv) o método de determinação de P_e exerceu influência significativa sobre os resultados dos diferentes modelos de HU e HUI, especialmente quando da estimativa de vazões de pico; e v) o modelo HUIC foi o que estimou os hidrogramas de ESD para as duas bacias hidrográficas de forma mais satisfatória, seguido do HUIN, sendo que ambos apresentaram substancial superioridade em relação aos modelos de HU tradicionalmente empregados (HUT e HUA) e também aos modelos de HUING e HUICG.

Palavras-chave: HIDROLOGIA; CHEIAS; MODELAGEM HIDROLÓGICA; MONITORAMENTO HIDROLÓGICO; BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO CADEIA; BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO JAGUARA

Abstract

NUNES, Gabriela Schiavon. Applicability of Unit Hydrograph models in hydrologically different watersheds. 2015. 190 p. Dissertation (Master's Degree in Water Resources) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

Heavy rainfall events in conjunction with increase in population, intensification of agricultural activities and inappropriate land use, have resulted in countless problems related to floods in watersheds. Water resources management is considered challenging and hydrological monitoring has been a fundamental tool. However, this type of monitoring is a limiting factor such that practitioners and engineers have to commonly deal with the inexistence or lack of information in the site of interest. Streamflow data sets are essential for flood management in watersheds in order to allow the understanding of hydrological behavior due to the occurrence of a heavy rainfall event. Such lack of hydrological data has culminated in the development of models for estimation of direct surface runoff (DSR) hydrographs resulting of rainfall events. DSR is the main component when analyzing stream flows originated from extreme rainfall events. Among the existing techniques available for DSR modeling, it should be highlighted the theory of Unit Hydrograph (UH) and of Instantaneous Unit Hydrograph (IUH). The objective of this study was to evaluate the Triangular UH (TUH), Dimensionless UH (DUH), Nash IUH (NIUH), Clark IUH (CIUH), Geomorphological Nash IUH (GNIUH) and Geomorphological Clark IUH (GCIUH) for estimation of DSR hydrographs resulting of extreme rainfall events in a watershed situated in Rio Grande do Sul State and another located in Minas Gerais State. The basic information for use of the aforementioned UH and IUH models were topographical variables extracted from digital elevation models and hydrological data (rainfall and water level). The stage-discharge rating curve of each outlet was obtained in order to convert water levels into streamflow records. Based on the rainfall-streamflow events, which were chosen for each watershed, it was possible to develop the hyetograph of each event and the corresponding hydrograph. DSR separation was performed through the inflexion method, while the determination of effective rainfalls (P_e 's) was done by means of the methods known as ϕ index, CN and Modified CN. The main results and conclusions were: i) the suppositions of UH and IUH were valid for DSR modeling in the studied watersheds; ii) differences among DSR hydrographs estimated by the different models of UH and IUH were found; iii) there was impact of the differences in physiographical characteristics between watersheds, especially those parameters associated with soil, on flood modeling, and it was also observed that the difference in the rainfall patterns between watersheds exerted influence on flood modeling; iv) the method for determination of P_e had substantial influence on the results obtained through

the different UH and IUH models, especially when analyzing the estimation of peak stream flows; and v) CIUH was the most satisfactory model to estimate DSR hydrographs for the watersheds, followed by NIUH, and both presented substantial superiority in relation to the UH models, which are traditionally employed (TUH and DUH), and to the GNIUH and GCIUH.

Key-words: HYDROLOGY; FLOODS; HYDROLOGICAL MODELING; HYDROLOGICAL MONITORING; CADEIA RIVER WATERSHED; JAGUARA CREEK WATERSHED

Lista de Figuras

Figura 1 - Componentes principais do ciclo hidrológico	30
Figura 2 - Características importantes do hidrograma para definição do HU baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ	37
Figura 3 - Princípio da proporcionalidade na teoria do HU baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ	39
Figura 4 - Princípio da superposição de hidrograma baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ	40
Figura 5 - Localização e rede de monitoramento das bacias hidrográficas do arroio Cadeia (BHAC) e do ribeirão Jaguará (BHRJ)	43
Figura 6 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da BHAC	45
Figura 7 – Distribuição dos valores de declividade do terreno da BHAC	46
Figura 8 – Distribuição das classes de solo da BHAC	47
Figura 9 – Distribuição das classes de uso do solo da BHAC	48
Figura 10 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da BHRJ	49
Figura 11 – Distribuição dos valores de declividade do terreno da BHRJ	50
Figura 12 – Distribuição das classes de solo na BHRJ	51
Figura 13 – Distribuição das classes de uso do solo na BHRJ	51
Figura 14 – Área de influência de cada estação de monitoramento de chuva sobre a BHAC, considerando a metodologia dos Polígonos de Thiessen	53
Figura 15 - Ilustração da seção de controle do arroio Cadeia com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e também por réguas limimétricas (a); e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva e de nível da estação modelo <i>Solar SL2000-PNVn</i> , da mesma seção (b)	53
Figura 16 - Estação meteorológica, modelo Davis Vantage Pro2, localizada no município de Canguçu, Rio Grande do Sul	54
Figura 17 - Estação meteorológica instalada na BHRJ, no município de Nazareno - Minas Gerais	55

Figura 18 - Ilustração da seção de controle do ribeirão Jaguara com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas da mesma seção.....	55
Figura 19 - Campanha hidrológica para determinação de descarga líquida usando micromolinete hidrométrico no arroio Cadeia	56
Figura 20 - Curva-chave para a seção de controle da BHAC.....	57
Figura 21 - Hidrogramas Unitários Triangular (cinza) e Adimensional (preto) desenvolvidos pelo SCS, baseado em dados reais da BHRJ	65
Figura 22 - Cascata de reservatórios utilizada no modelo de HUI de Nash	67
Figura 23 - Representação esquemática do processo de translação do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark	71
Figura 24 – Hietogramas de precipitação total e o Índice ϕ ajustado para cada evento ocorrido na BHAC.....	80
Figura 25 – Hietogramas de precipitação total e o Índice ϕ ajustado para cada evento ocorrido na BHRJ	81
Figura 26 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN, para os eventos analisados na BHAC ..	87
Figura 27 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN, para os eventos analisados na BHRJ...	88
Figura 28 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado, para os eventos analisados na BHAC	92
Figura 29 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado, para os eventos analisados na BHRJ.....	93
Figura 30 - Rede hidrográfica da BHAC classificada de acordo com a ordem dos cursos d'água	100
Figura 31 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHAC	100
Figura 32 - Rede hidrográfica da BHRJ classificada de acordo com a ordem dos cursos d'água	101
Figura 33 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHRJ	101

Figura 34 - Curva ajustada, relacionando dados de velocidade e vazão obtidos em campanhas hidrológicas na BHAC (a) e na BHRJ (b).....	102
Figura 35 - Histogramas Tempo-Área (HTA) para a BHAC, considerando o tempo de concentração variando de 2 a 10 horas (a) e de 10,5 a 24,5 horas (b)	106
Figura 36 - Histogramas Tempo-Área (HTA) para a BHRJ, para um tempo de concentração variando de 1 a 10 horas	106
Figura 37 - Isócronas para a BHAC considerando o tempo de concentração de 5 horas	110
Figura 38 - Isócronas para a BHRJ considerando o tempo de concentração de 2,5 horas	110
Figura 39 - Histograma tempo-área (HTA) acumulado, empregado na modelagem do HUICG para BHAC	111
Figura 40 - Histograma tempo-área (HTA) acumulado, empregado na modelagem do HUICG para BHRJ.....	111
Figura 41 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUT para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e	114
Figura 42 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHRJ e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUT para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e	115
Figura 43 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUA para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e	116
Figura 44 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHRJ e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUA para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e	117
Figura 45 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIN seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC.....	119
Figura 46 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIN seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ	120

Figura 47 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUING seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC.....	122
Figura 48 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUING seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ	123
Figura 49 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIC seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC.....	126
Figura 50 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIC seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ	127
Figura 51 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUICG seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC.....	129
Figura 52 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUICG seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ	130
Figura 53 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Nash-Stucliffe (C_{NS}), segundo classificação proposta Moriasi <i>et al.</i> (2007), considerando os eventos ocorridos na BHAC e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados	140
Figura 54 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Nash-Stucliffe (C_{NS}), segundo classificação proposta Moriasi <i>et al.</i> (2007), considerando os eventos ocorridos na BHRJ e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados	141
Figura 55 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Erro Relativo da Vazão de Pico (ER_{Qp}), segundo classificação proposta Van Liew <i>et al.</i> (2007), considerando os eventos ocorridos na BHAC e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados.....	141
Figura 56 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Erro Relativo da Vazão de Pico (ER_{Qp}), segundo classificação proposta Van Liew <i>et al.</i> (2007), considerando os eventos ocorridos na BHRJ e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados.....	142

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias para a BHAC, destacando a vazão total (Q_{TOTAL}) máxima, precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes (P_5), intensidade média do evento (i_m), intensidade média máxima de 30 minutos ($i_{m30'}$) e intensidade média máxima de 60 minutos ($i_{m60'}$)	76
Tabela 2 – Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias para a BHRJ, destacando a vazão total (Q_{TOTAL}) máxima, precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes (P_5), intensidade média do evento (i_m), intensidade média máxima de 30 minutos ($i_{m30'}$) e intensidade média máxima de 60 minutos ($i_{m60'}$)	77
Tabela 3 – Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHAC .	78
Tabela 4 – Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHRJ ..	78
Tabela 5- Valores calibrados do Número da Curva (CN) para obtenção dos hietogramas de precipitação efetiva pelo método do CN	84
Tabela 6 - Valores calibrados do potencial de armazenamento de água no solo (S) (mm) para determinação dos hietogramas de precipitação efetiva pelo método do CN Modificado	89
Tabela 7 - Parâmetros dos modelos de HUT e HUA, considerando os eventos ocorridos na BHAC.....	94
Tabela 8 - Parâmetros dos modelos de HUT e HUA, considerando os eventos ocorridos na BHRJ	95
Tabela 9 - Parâmetros do HUIN ajustados para a BHAC a partir das 3 metodologias de determinação de P_e	97
Tabela 10 - Parâmetros do HUIN ajustados para a BHRJ a partir das 3 metodologias de determinação de P_e	97
Tabela 11 - Resultados encontrados para os parâmetros n e k do HUIN em estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas	98
Tabela 12 - Caracterização da rede de drenagem da BHAC e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A).....	102

Tabela 13 - Caracterização da rede de drenagem da BHRJ e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)	102
Tabela 14- Velocidade empregada, para cada evento analisado, para a obtenção do parâmetro k do modelo de HUING e seu respectivo valor, para a BHAC e para a BHRJ.....	103
Tabela 15 - Parâmetros do HUIC ajustados para cada evento analisado na BHAC, considerando as três metodologias de estimativa da P_e	107
Tabela 16 - Parâmetros do HUIC ajustados para cada evento analisado na BHRJ, considerando as três metodologias de estimativa da P_e	107
Tabela 17 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ	133
Tabela 18 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN	134
Tabela 19 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado	135
Tabela 20 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHRJ, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ	136
Tabela 21 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN	137

Tabela 22 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado	138
Tabela 23 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ	139
Tabela 24 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN	139
Tabela 25 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN Modificado	139

Lista de Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas
AMC	Antecedent Moisture Content
BHAC	Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia
BHRJ	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguará
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CN	Número da Curva
ENVI	Environment for Visualizing Images
ESD	Escoamento Superficial Direto
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HTA	Histograma Tempo-Área
HU	Hidrograma Unitário
HUA	Hidrograma Unitário Adimensional
HUI	Hidrograma Unitário Instantâneo
HUIC	Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark
HUIG	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorgológico
HUIGC	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark
HUIGN	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash
HUIN	Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
NRCS	Natural Resources Conservation Services
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UHE	Usina Hidrelétrica
USDA	United States Department of Agriculture

Lista de Símbolos

P_e	Precipitação efetiva
P_u	Precipitação efetiva unitária
Q	Vazão
H	Nível da lâmina de água
K_{A-C}	Constante de depleção do método da reta A-C
P	Precipitação total
Q_{ESD}	Deflúvio oriundo da precipitação efetiva
S	Capacidade de armazenamento de água no solo
I_a	Perdas por abstração inicial
CN	Número da Curva
M	Umidade antecedente do solo
λ	Coeficiente de abstração inicial
t_{lag}	Tempo de retardo da bacia hidrográfica
L	Comprimento do curso d'água principal
X	Declividade média da bacia hidrográfica
q_p	Vazão de pico unitária
A	Área da bacia hidrográfica
t_a	Tempo de ascensão do hidrograma
q	Vazão por unidade de precipitação efetiva unitária
t	Intervalo de tempo
t_p	Tempo de pico
X	Função de gama precisa do fator de pico
FP	Fator de pico
$u(t)$	Ordenadas do HUI de Nash
k	Parâmetro do HUI de Nash
N	Parâmetro do HUI de Nash
Γ	Função gama
$m_{1(HUI)}$	Primeiro momento de HUI
m_{1S}	Primeiro momento do hidrograma de saída
m_{1E}	Primeiro momento do hidrograma de entrada
$m_{2(HUI)}$	Segundo momento de HUI
m_{2S}	Segundo momento do hidrograma de saída

m_{2E}	Segundo momento do hidrograma de entrada
Q_i	Vazão de escoamento superficial direto
P_i	Precipitação efetiva no intervalo de tempo i
R_A	Razão entre as áreas das bacias
R_B	Razão de bifurcação
R_L	Razão de comprimento
V	Velocidade dinâmica
Q_{i+1}	Ordenada do HUIC
C_0	Coeficiente de ponderação do HUIC
C_1	Coeficiente de ponderação do HUIC
$R_{E(i)}$	Precipitação efetiva uniformemente distribuída
R	Coeficiente de armazenamento da bacia hidrográfica
t	Intervalo de simulação
t_c	Tempo de concentração
C_{NS}	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
$Q_{i_{obs}}$	Vazão observada do HESD no tempo $t=i$
$Q_{i_{sim}}$	Vazão simulada do HESD no tempo $t=i$
$\overline{Q_{obs}}$	Vazão média observada
$\overline{Q_{sim}}$	Vazão média simulada
r	Coeficiente correlação dados observados e simulados
ER_{Qp}	Erro relativo na estimativa de vazão de pico
Q_{pobs}	Vazão de pico observada

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.1	Objetivos Específicos	26
1.2	Hipóteses	26
2	Revisão de Literatura	28
2.1.	Abordagem introdutória	28
2.2.	Ciclo Hidrológico e Bacias Hidrográficas	29
2.3.	Eventos hidrológicos extremos	33
2.4.	SIG e Recursos Hídricos	33
2.5.	Modelagem chuva-vazão	35
2.6.	Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)	38
3	Material e Métodos.....	43
3.1.	Bacias hidrográficas analisadas.....	43
3.1.1	Bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).....	43
3.1.2	Bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ)	48
3.2.	Monitoramento hidrológico	52
3.3.	Hietogramas e hidrogramas observados para modelagem	58
3.4.	Hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD).....	58
3.5.	Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (P_e)	59
3.5.1.	Índice ϕ	60
3.5.2.	Método do Número da Curva (CN)	60
3.5.3.	Método CN Modificado por Mishra <i>et al.</i> (2003)	62
3.6.	Modelagem de hidrograma unitário (HU) e de hidrograma unitário instantâneo (HUI)	63
3.6.1.	Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)	64
3.6.2.	Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)	66

3.6.3. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN).....	68
3.6.4. Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC).....	70
3.6.5. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC).....	72
3.7. Análise de desempenho	73
4 Resultados e Discussão.....	76
4.1. Eventos hidrológicos empregados.....	76
4.2. Separação de escoamento e chuva efetiva total	77
4.3. Hietogramas de chuva efetiva.....	79
4.3.1. Índice ϕ	79
4.3.2. Método do Número da Curva (CN)	83
4.3.3. Método do Número da Curva Modificado (CN Modificado).....	89
4.4. Modelagem do Hidrograma Unitário.....	94
4.4.1. Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)	94
4.4.2. Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)	96
4.4.3. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUING).....	99
4.4.4. Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC).....	105
4.4.5. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUICG).....	109
4.5. Desempenho dos modelos de Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).....	112
5 Considerações finais.....	146
Referências	148
Apêndices.....	158

1 Introdução

A água é um recurso natural indispensável à vida e estratégico ao desenvolvimento econômico de uma região, todavia, o crescimento populacional em demasia, aliado à variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica, tem alarmado diferentes esferas da sociedade no que tange à sua oferta em quantidade e qualidade. Nas últimas décadas, eventos extremos de precipitação, combinados com aumento da população, intensificação de atividades agrícolas e uso inadequado do solo, têm culminado em inúmeros problemas relacionados a cheias em bacias hidrográficas. Frente a este cenário, a gestão dos recursos hídricos vem sendo um tanto quanto desafiadora e o monitoramento hidrológico tem sido uma importante ferramenta para a tomada de decisões em bacias hidrográficas.

No Brasil, o monitoramento hidrológico ainda é um fator limitante. A rede hidrométrica básica da Agência Nacional de Águas (ANA) geralmente contempla bacias hidrográficas de grande e médio porte, haja vista que nelas ocorrem os principais aproveitamentos hídricos do país, os quais concernem à geração de energia hidrelétrica e à captação e armazenamento de água para abastecimento e irrigação. Já o monitoramento em pequenas bacias, quando ocorre, geralmente é de responsabilidade de grupos de pesquisa vinculados a universidades ou de empresas privadas.

Neste contexto, comumente projetistas e gestores de recursos hídricos se deparam com a ausência de séries históricas no local de interesse e, em se tratando da gestão de cheias em bacias hidrográficas, os dados de vazão são substanciais na compreensão do comportamento hidrológico quando da ocorrência de um evento de chuva intensa.

A carência ou inexistência de dados monitorados de vazão em cursos d'água de interesse vem resultando no desenvolvimento de modelos hidrológicos, principalmente com vistas à estimativa da vazão máxima e da sequência temporal de vazões oriundas de um evento de precipitação. Em uma bacia hidrográfica, a vazão que flui em um curso d'água pode consistir de escoamento superficial direto (ESD), escoamento subsuperficial e escoamento de base, sendo a primeira parcela gerada pelo excesso de chuva que escoar sobre a superfície, normalmente a principal responsável por elevar a vazão, e

por consequência o nível d'água nos rios, ocasionando cheias. Neste contexto, destacam-se as técnicas de modelagem de ESD.

Dentre as técnicas de modelagem de ESD, deve ser destacada a teoria do Hidrograma Unitário (HU), proposta pelo engenheiro americano Le Roy K. Sherman em 1932. Esta teoria é fundamentada na existência de uma relação linear diretamente proporcional entre o comportamento das vazões e as precipitações que geram o ESD (também denominadas precipitações efetivas) e na existência de sobreposição das vazões produzidas por eventos de precipitação sucessivos. A teoria de Sherman baseia-se num comportamento linear e invariante no tempo, permitindo avaliar a resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva, contudo, esse conceito foi aprimorado quando se propôs que a resposta da bacia seria independente da duração, fazendo referência à uma precipitação efetiva unitária instantânea (P_u), e assim definindo o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).

Os modelos de HU e de HUI podem ser ajustados com base em dados monitorados de chuva-vazão ou então derivados de características geomorfológicas da bacia hidrográfica. O primeiro trabalho científico acerca de HU geomorfológico foi desenvolvido por Snyder em 1938, com base em dados de bacias monitoradas na região dos Apalaches (Estados Unidos). O modelo de Snyder, como ficou conhecido seu modelo de HU, é baseado na determinação do tempo entre centro de massa do hietograma de precipitação efetiva (P_e) e a vazão de pico unitária e na estimativa da vazão de pico e da duração total do escoamento. Outros modelos de HU geomorfológicos bastante difundidos na literatura são o Triangular e o Adimensional, desenvolvidos na década de 70 pelo Soil Conservation Service (SCS), atual Natural Resources Conservation Services (NRCS) do United States Department of Agriculture (USDA). Estes modelos são bastante simplificados e suas relações foram derivadas de um grande número de HU's obtidos para bacias hidrográficas americanas de diferentes tamanhos.

Com relação aos modelos de HU e HUI ajustados a partir de dados monitorados, cabe destacar aqueles desenvolvidos por Clark em 1945 e por Nash em 1957. O primeiro modelo de HUI considera o processo de atenuação da onda de cheia, em virtude do armazenamento na bacia, e o processo de translação, que representa ao longo do tempo a contribuição de diferentes

porções da bacia com o ESD na seção de controle, enquanto que o segundo leva em consideração a propagação do ESD através de uma cascata de reservatórios lineares, simulando assim o amortecimento da onda de cheia. Considerando que estes modelos são dependentes de dados observados de chuva-vazão, e dada a problemática acerca da disponibilidade destes, foram desenvolvidas versões geomorfológicas dos HUI's de Clark e de Nash.

Existe um notório e constante progresso no que diz respeito ao desenvolvimento e aplicação de modelos de HU e HUI, principalmente aqueles com abordagem geomorfológica, para os quais o ajuste dos parâmetros é, geralmente, facilitado. Todavia, suas relações derivam de dados observados em regiões com características específicas, o que requer atenção quanto à sua generalização, principalmente no que tange às peculiaridades da região, aos processos hidrológicos contemplados e à qualidade dos resultados produzidos. Em face desses aspectos, a generalização dos modelos de HU e HUI pode acarretar no sub ou no superdimensionamento de projetos envolvendo recursos hídricos quando estes dependem de informações associadas à hidrogramas de cheias.

O presente estudo apresenta uma importância relevante nas regiões sul de Minas Gerais e extremo sul do Rio Grande do Sul, onde estão localizadas as duas bacias hidrográficas analisadas, visto que as duas regiões: i) têm, historicamente, evidenciado eventos que provocam cheias pronunciadas; ii) carecem de estudos científicos relacionados à análise, baseada em dados de monitoramento hidrológico de bacias hidrográficas representativas das regiões, de modelos adequados para estimativa de vazões de pico e de hidrogramas de escoamento superficial direto quando da ocorrência de eventos extremos de precipitação.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar os modelos de Hidrograma Unitário Triangular e Hidrograma Unitário Adimensional e os modelos de Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark, nas versões ajustadas e geomorfológicas, frente à determinação de hidrogramas de escoamento superficial direto decorrentes de eventos de precipitação de diferentes

magnitudes, nas bacias hidrográficas do arroio Cadeia, localizada na região sul do Grande do Sul, e do ribeirão Jaguará, em Nazareno, Minas Gerais.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a capacidade preditiva dos modelos de Hidrograma Unitário Triangular e Hidrograma Unitário Adimensional, Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark, Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash Geomorfológico e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark Geomorfológico, para determinação de hidrogramas de escoamento superficial direto e vazões de pico em decorrência de eventos intensos de chuva, nas duas bacias analisadas;
- Analisar a diferença de características hidrológicas entre as duas bacias exerce influência na modelagem do hidrograma de escoamento superficial direto pelos diferentes modelos avaliados neste estudo;
- Verificar o impacto da aplicação dos métodos do Índice ϕ , do Número da Curva e do Número da Curva Modificado para determinação de hidrogramas de precipitação efetiva com vistas à modelagem do hidrograma de escoamento superficial direto; e
- Analisar a aplicabilidade e/ou validade das formulações geomorfológicas sugeridas na literatura e empregadas neste estudo, baseado em duas bacias hidrográficas, para a determinação dos parâmetros do Hidrograma Unitário Triangular, Hidrograma Unitário Adimensional, Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark.

1.2 Hipóteses

- Os parâmetros do Hidrograma Unitário Triangular, Hidrograma Unitário Adimensional, Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash Geomorfológico e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark Geomorfológico, não podem ser representados por formulações universais baseadas em características do relevo; e

- Os modelos de Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash e Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark apresentam desempenho superior aos demais modelos tradicionalmente empregados.

2 Revisão de Literatura

2.1. Abordagem introdutória

“Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas” (Definição do United States Federal Council of Science and Technology, citada por Chow, (1964) e referenciada por Tucci (2009)).

Como se pode perceber pela definição acima, a hidrologia é uma ciência consideravelmente ampla, cujo escopo de trabalho abrange diversas subáreas mais específicas, como por exemplo:

- Hidrometeorologia: trata da água na atmosfera;
- Limnologia: estuda os lagos e reservatórios;
- Potamologia: estuda os rios;
- Oceanografia: estuda os oceanos;
- Hidrogeologia: estuda as águas subterrâneas; e
- Glaciologia: trata da ocorrência de neve/gelo na natureza.

Para Collischonn e Dornelles (2013), as preocupações com o uso da água aumentam a cada dia, porque a demanda por água cresce à medida que a população cresce, e as necessidades dos indivíduos aumentam. Enquanto as demandas crescem, o volume de água doce na superfície da terra é relativamente fixo. Isto faz com que certas regiões do mundo enfrentem situações de escassez. O Brasil é um dos países mais ricos em água, embora existam problemas diversos relacionados à qualidade da água e à distribuição espacial e temporal, ou seja, regiões com menor disponibilidade de água concentram mais população, e as regiões com maior disponibilidade, como é o caso da região amazônica, têm uma menor população, fazendo com que a situação seja ainda mais agravada, devido a essas discrepâncias regionais da disponibilidade hídrica.

A quantificação da disponibilidade hídrica serve de base para o projeto e planejamento dos recursos hídricos. Alguns exemplos são: produção de

energia hidrelétrica, abastecimento de água, navegação, controle de enchentes e impacto ambiental (TUCCI, 2009).

Segundo Silva *et al.* (2009), a utilização desordenada e o mau gerenciamento dos recursos hídricos geram prejuízos tão grandes que, atualmente, problemas sociais e ambientais de grande relevância advêm da disponibilidade e da qualidade da água.

A Engenharia Hidrológica mais especificadamente, estuda situações em que a água não é exatamente utilizada pelo homem, mas deve ser manejada adequadamente para minimizar prejuízos, como no caso das inundações provocadas por chuvas intensas em áreas urbanas ou pelas cheias dos grandes rios (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Em escala global, os recursos hídricos estão em constante modificação, por um lado há escassez de água e por outro lado ocorrem inundações severas que causam uma série de danos todos os anos. Esses impactos são ocasionados por diversas ações antrópicas, como compactação e uso inadequado do solo, urbanização, etc. É de suma importância conhecer os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, uma vez que predito o seu comportamento hidrológico, é possível prever a vulnerabilidade a desastres naturais, como secas e inundações.

2.2. Ciclo Hidrológico e Bacias Hidrográficas

A água existente na terra distribui-se por três reservatórios principais: os oceanos, os continentes e a atmosfera, entre os quais existe uma circulação contínua, sendo denominada por ciclo hidrológico (SILVA *et al.*, 2009).

O ciclo hidrológico (Figura 1) é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

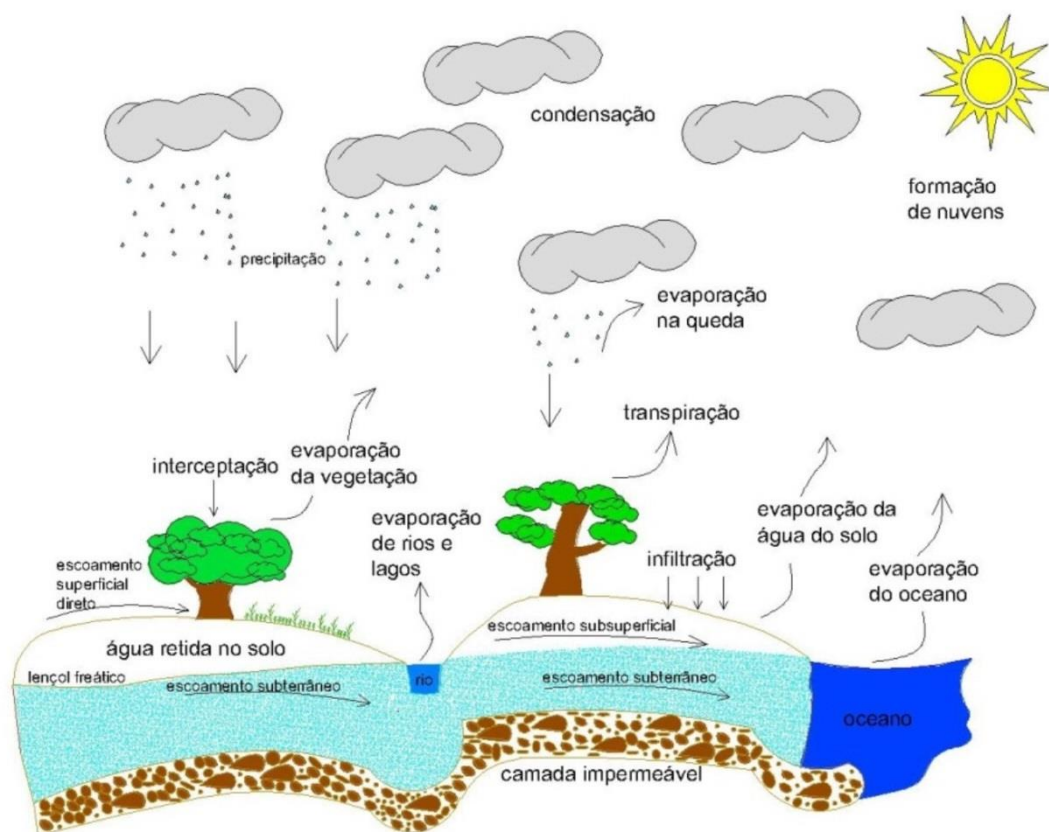


Figura 1 - Componentes principais do ciclo hidrológico

Fonte: Souza Cruz, 2014.

O ciclo hidrológico é a movimentação da água nos diferentes estados físicos (gasoso, líquido ou sólido) entre a terra e a atmosfera. Ele é composto por três fases importantes: evapotranspiração, precipitação e escoamento.

Como descreve Collischonn e Dornelles (2013), a energia do sol resulta no aquecimento do ar, do solo e da água superficial. A energia do sol é responsável pela evaporação da água líquida e pela evapotranspiração da água do solo através das plantas. O vapor de água é transportado pelo ar e pode condensar, formando nuvens. Em circunstâncias específicas, o vapor do ar condensado nas nuvens pode voltar à superfície da Terra na forma de precipitação. A evaporação dos oceanos é a maior fonte de vapor para atmosfera e para posterior precipitação, mas a evaporação de água dos solos, dos rios e lagos e a transpiração da vegetação contribuem também como fontes de vapor de água para atmosfera. A precipitação que atinge a superfície pode infiltrar no solo ou escoar sobre o solo até atingir um curso d'água. A

água que infiltra umedece o solo, alimenta os aquíferos e cria o fluxo de água subterrânea (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). É importante ressaltar que o ciclo hidrológico não tem início nem fim e os processos hidrológicos que o integram ocorrem continuamente na natureza. Graças a este ciclo é que a água no meio ambiente é renovada, propiciando que atividades dependentes dela possam ser continuadas.

Segundo Mello e Silva (2013), a partir da análise do ciclo hidrológico, observam-se os processos ou fases sobre os quais o técnico pode atuar, no sentido de utilizar e preservar de forma racional os recursos naturais, solo, água e cobertura vegetal. Dentre as fases destacam-se:

- Redução da parcela que atinge diretamente a superfície do solo pela manutenção de uma cobertura vegetal adequada ao solo e relevo existentes;
- Redução do ESD (cobertura vegetal, práticas conservacionistas mecânicas e vegetativas); e
- Aumento da parcela de água que se infiltra (pelo aumento do tempo de oportunidade para que a infiltração se processe).

Os mesmos autores ainda destacam que, consegue-se alterar de forma significativa, a ocorrência e distribuição temporal do ESD, reduzindo as vazões máximas (enchentes) e elevando as vazões mínimas, ou seja, atenuação das cheias e secas por meio de regularização natural das vazões na bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica é uma área de drenagem definida topograficamente por um divisor de águas, de modo que toda água drena para um ponto em comum, chamado de foz ou exutório (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Pode-se dizer que a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da chuva.

Conforme Tucci (2009), a bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico sujeito a entradas de água (eventos de precipitação) que geram saídas de água (escoamento e evapotranspiração). A bacia hidrográfica transforma uma entrada concentrada no tempo (precipitação) em uma saída distribuída no tempo (escoamento), podendo ser considerada um sistema

natural, visto que não foi projetada pelo homem e sim pela natureza. Quanto ao escoamento em uma bacia tem-se uma diferenciação, podendo ser separado em escoamento rápido, ou superficial e escoamento lento, ou subterrâneo. A parcela de chuva total com mesmo volume de escoamento superficial é denominada de P_e .

As bacias hidrográficas se estruturam segundo uma hierarquia que, em geral, tem o relevo como fator determinante. Alguns elementos fisiográficos em uma bacia hidrográfica são (MELLO; SILVA, 2013):

- Divisor de água: linha que representa os limites geográficos da bacia, determinando a área de captação da bacia e o sentido do fluxo da rede de drenagem;
- Seção de controle: local por onde a água captada na bacia é drenada;
- Rede de drenagem: constitui-se de todos os drenos da bacia, inclusive aqueles não necessariamente perenes (ou permanentes).

Diversos fatores influenciam na forma como a água da chuva interage com a bacia hidrográfica. Os fatores mais importantes são o clima, os solos, as rochas do subsolo e a vegetação (HORTON, 1932). Além disso, Teodoro *et al.*, (2007) indicam que existem outros fatores que influenciam no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, sendo esses em função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, etc.) e do tipo da cobertura vegetal existente. Assim, as características físicas de uma bacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, dentre outros, a infiltração e quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração, os escoamentos superficial e subsuperficial. Além disso, o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica também é afetado por ações antrópicas, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO *et al.*, 2006).

Portanto, observa-se que as ações do homem influenciam diretamente no ciclo hidrológico. O manejo incorreto do solo reduz a capacidade de infiltração da água e aumenta o escoamento superficial. Essas alterações

aumentam a erosão, cheias, reduzem a recarga dos aquíferos e a disponibilidade hídrica nos mananciais.

2.3. Eventos hidrológicos extremos

O homem sempre conviveu no ambiente da bacia hidrográfica em condições diferenciadas de regime hidrológico, sendo comumente percebida a ocorrência de escoamento em condições médias, mas também de eventos hidrológicos extremos. Estes extremos são fortemente sentidos em épocas do ano com estiagens pronunciadas em que os cursos d'água encontram-se com volumes de água reduzidos e, em outras épocas, com grandes volumes de água podendo caracterizar como períodos de cheias (GRACIOSA, 2010). O balanço entre a disponibilidade e a demanda de água para diversos fins, indica a situação hídrica de escassez ou de abundância da bacia hidrográfica. As secas trazem enormes problemas à imensa população brasileira das regiões semiáridas, causam pobreza, desnutrição e êxodo para as grandes cidades. As enchentes, agravadas pelo desmatamento e pela impermeabilização do solo urbano, são responsáveis por prejuízos econômicos e sociais incalculáveis e pelos riscos à saúde e à qualidade de vida dos habitantes das áreas assoladas.

Segundo Graciosa (2010) recentes catástrofes provocadas por eventos hidrológicos extremos ocorridos nas cidades brasileiras revelam a fragilidade das atuais políticas empregadas no tratamento do problema das inundações. A ocorrência de extremos hidrológicos sempre foi observada em bacias hidrográficas, porém, o homem tem cada vez mais que aprender a conviver com esta realidade, pois pode ter diversas atividades econômicas e sociais influenciadas em função da ocorrência dos mesmos. Como o homem tem papel fundamental nas alterações do ciclo hidrológico em uma bacia, ele pode exercer influência na ocorrência de eventos hidrológicos extremos, especialmente na frequência de ocorrência e na magnitude dos mesmos.

2.4. SIG e Recursos Hídricos

Para Cysne (2004), os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) podem ser definidos como ferramentas de armazenamento, manipulação e

análise de fenômenos geográficos. Embora pareça um único sistema informatizado, um SIG é na verdade um conjunto de tecnologias integradas que busca coletar, tratar, visualizar e gerenciar informações georreferenciadas de diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, a área ambiental ou sócioeconômica. O georreferenciamento permite que um determinado fenômeno geográfico possa ser localizado espacialmente, utilizando-se um determinado sistema de coordenadas geográficas.

Os SIG's permitem a integração dos dados que caracterizam a variabilidade espacial da bacia hidrográfica em um único sistema, por isso num plano conceitual pode afirmar-se que os eles são capazes de apoiar a modelação hidrológica. A ligação de um SIG e um modelo de simulação dos processos de evaporação, precipitação e escoamento, permite efetuar a previsão do escoamento superficial e simultaneamente analisar a sua distribuição espacial numa bacia hidrográfica (SANTOS *et al.*, 2006).

Esta tecnologia tem sido alvo de crescente utilização no planejamento ambiental com forte adesão na gestão dos recursos hídricos. Os SIGs são utilizados como ferramenta de análise espacial, na modelagem e simulação de cenários, como subsídio à elaboração de alternativas para a decisão da política de uso e ocupação do solo, ordenamento territorial, equipamentos urbanos e monitoramento ambiental, entre outras aplicações complexas, que envolvem diferentes componentes dinâmicos. Portanto, a utilização destes recursos tecnológicos é proposta como instrumento articulador do processo de integração entre o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos. Para o adequado planejamento dos recursos hídricos, é necessário que se disponha de instrumentos que permitam a quantificação de sua disponibilidade hídrica. Nesse sentido, os modelos hidrológicos constituem mecanismos de suporte essenciais para a concretização deste objetivo. SILVA *et al.* (2009) afirmam que um modelo hidrológico requer uma vasta quantidade de informação para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia hidrográfica. No entanto, se o modelo considerar a variabilidade espacial dos processos como a infiltração, a e evaporação e as características fisiográficas da bacia, a quantidade de informação requerida aumenta significativamente, pois cada unidade hidrológica será caracterizada pela sua topografia, geologia, tipo e uso do solo e clima. Se considerarmos também o

modelo, esse deve satisfazer um objetivo bem definido, por exemplo, conhecer a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a diferentes cenários de uso do solo (SILVA *et al.*, 2009).

De acordo com Quintela e Portela (2002), os modelos podem ser classificados como determinísticos, baseados na explicação física do fenômeno, podendo ser empírico, conceitual ou semiconceitual, e não determinísticos, com base em modelos probabilísticos ou estocásticos, cujos fenômenos não são explicados por meio de outras variáveis físicas.

2.5. Modelagem chuva-vazão

Para uma melhor compreensão do funcionamento do balanço hídrico e dos possíveis impactos sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos, se faz necessário a realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). A vazão, volume de água que passa por uma determinada seção transversal em um período de tempo, que flui em um curso d'água varia substancialmente no tempo e no espaço. O conhecimento da variabilidade das vazões é relevante, visto que a oferta de água em um manancial condiciona o uso e a demanda pelos recursos hídricos na bacia hidrográfica.

Sabe-se que ocorre uma considerável variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica, fazendo com que seja necessária a contínua quantificação dos recursos hídricos, o que se dá pelo monitoramento hidrológico. As séries de dados hidrológicos são imprescindíveis para profissionais da área de recursos hídricos, uma vez que permitem a tomada de decisões referente ao planejamento, aproveitamento e controle de recursos hídricos.

Ainda no Brasil, a rede de monitoramento das variáveis hidrológicas, especialmente no tocante a pequenas bacias hidrográficas, é limitada. Apesar da importância de se ter uma rede densa de postos hidrológicos no Brasil, de acordo com Genovez (2001) a realidade brasileira é de uma pequena quantidade de postos hidrológicos e muitas vezes com séries de curta extensão, sendo a ANA a responsável pelo gerenciamento das informações hidrológicas no Brasil.

Os dados hidrológicos provenientes de postos de medição no Brasil são destinados principalmente para fins energéticos, projetos de controle ambiental, irrigação e estruturas de desenvolvimento hídrico. Em virtude do destino das informações hidrológicas no Brasil, geralmente apenas as bacias hidrográficas grandes e médias são contempladas no monitoramento (PAIVA, 2001). O monitoramento hidrológico em pequenas bacias hidrográficas é de extrema valia, pois com a disponibilização de informações, essas podem ser utilizadas para o dimensionamento de pontes e bueiros em estradas, bem como estudos hidrológicos para aproveitamento de água em pequenas bacias (GENOVEZ, 2001).

Uma bacia pode ser imaginada como um sistema que transforma chuva em vazão. A transformação envolve tanto as modificações no volume total da água, já que parte da chuva infiltra no solo ou pode retornar à atmosfera por evapotranspiração, como as modificações no tempo de ocorrência, já que existe um atraso na ocorrência da vazão em relação ao tempo de ocorrência da chuva. Admite-se que existe uma relação linear entre a P_e e a vazão, lembrando que a P_e é a parcela da chuva que gera ESD (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A determinação dos valores de parâmetros, como a vazão de pico, e o volume de ESD de uma bacia e do hidrograma resultante de diferentes eventos de precipitação é crucial na gestão de desastres naturais e no dimensionamento e construção de estruturas hídricas. De acordo com Khaleghi *et al.* (2011), as atividades humanas têm sido sempre acompanhadas por alterações na estrutura de ocupação do espaço, distribuição de recursos naturais e desenvolvimentos urbanos, de forma que o desenvolvimento urbano sobre a superfície da bacia influencia diretamente no aumento da vazão de pico e no volume de escoamento da bacia.

A variação de vazões ao longo do tempo em uma dada seção de controle de um curso d'água dá-se o nome de hidrograma, o qual consiste em um gráfico que expressa a resposta da bacia hidrográfica a um evento isolado de chuva (Figura 2) ou então o seu comportamento em um determinado período de tempo.

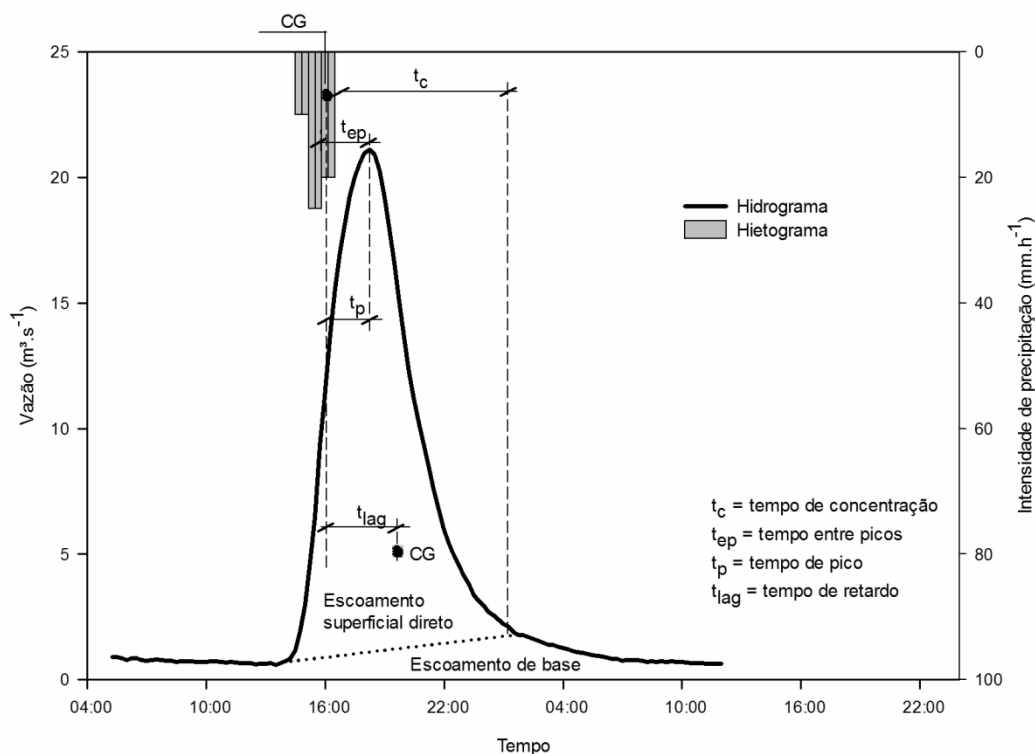


Figura 2 - Características importantes do hidrograma para definição do HU baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ

Na Figura 2, o tempo de concentração é definido como o intervalo de tempo entre o final da ocorrência de P_e e o final do escoamento superficial, enquanto o tempo entre picos é definido como o intervalo entre o pico da P_e e o pico da vazão superficial e o tempo de retardo é definido como o intervalo de tempo entre o centro de gravidade do hietograma (P_e) e o centro de gravidade do hidrograma.

A estimativa de vazões máximas e de hidrogramas de cheia é necessária no planejamento de bacias e na gestão de cheias para prever o comportamento hidrológico da bacia, todavia, a gestão de cheias em uma bacia não pode ser realizada com sucesso sem que o comportamento hidrológico seja predito. Os principais problemas vinculados a previsões hidrológicas incluem a carência ou baixa precisão de dados de precipitação, alto custo, carência de informações sobre as bacias e a extensão de tempo requerida para obter os resultados (KHALEGHI *et al.*, 2011)

Para Paiva, Collischonn e Tucci (2011), modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são ferramentas úteis na análise da disponibilidade de água em bacias hidrográficas. Uma dificuldade importante na aplicação deste tipo de

modelo é a necessidade de definir valores de parâmetros do modelo com base em séries observadas de chuva e de vazão. Este processo é denominado de calibração do modelo hidrológico, e pode ser realizado utilizando procedimento manual ou automático (TUCCI, 2005).

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos para um melhor entendimento dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Entretanto, estes modelos necessitam ser calibrados e validados antes de serem utilizados para o gerenciamento de recursos hídricos de uma dada região, o que obrigatoriamente exige a existência de monitoramento hidrológico e a avaliação de cada modelo que se pretende utilizar.

Caso não se disponha de dados de vazão, não é possível utilizar os métodos diretos, por isso o cálculo deve ser feito de forma indireta a partir de dados pluviométricos e através de modelos matemáticos de transformação de chuva em vazão. Nestes métodos é necessário calcular a chuva de projeto e então transformar em vazão. Esse processo envolve o cálculo da intensidade da chuva para um determinado tempo de retorno, o cálculo da chuva média na bacia, o cálculo da P_e e a transformação da chuva em vazão (GENOVEZ, 2001). O processo de chuva-vazão é muito complexo, sendo difícil encontrar a magnitude da cheia principalmente quando os dados hidrológicos são limitados ou escassamente disponíveis (GHUMMAN *et al.*, 2011).

2.6. Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

Dentre os modelos disponíveis para o dimensionamento hidrológico, o HU, introduzido por Sherman (1932), é baseado no princípio de superposição, sendo um dos mais aplicados (AGIRRE *et al.*, 2005). Gibbs, Dandy e Maier (2010) relataram que em muitas regiões onde os modelos chuva-vazão são necessários, há falta de dados de vazão para calibrar os parâmetros do modelo. Neste caso, a geomorfologia da bacia pode ser explorada para determinar a resposta do ESD. Portanto, é bem conhecido que a abordagem do HU é limitada pela suposição de que a bacia responde linearmente à precipitação de entrada e é invariante no tempo (GIBBS; DANDY; MAIER, 2010)

Segundo Agirre *et al.* (2005), o HU é amplamente utilizado para estimativa do ESD, como também na determinação das vazões de pico. Este modelo refere-se ao hidrograma resultante de uma P_u , com intensidade constante no tempo, e uniformemente distribuída sobre a área de drenagem da bacia. O HU é um modelo conceitual que assume a teoria dos sistemas lineares e incorpora as características do evento de precipitação no processo de simulação (AGIRRE *et al.*, 2005).

Considera-se que a bacia hidrográfica tem um comportamento linear, significando que podem ser aplicados os princípios da proporcionalidade e superposição. Com a teoria do HU é possível calcular a resposta da bacia a eventos de chuva diferentes, considerando que a resposta é uma soma das respostas individuais (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013):

- Proporcionalidade: Para uma P_e com uma dada duração, o volume de P_e , que é igual ao volume de ESD, é proporcional à intensidade dessa chuva. Como os hidrogramas de ESD correspondem a P_e 's de mesma duração, e têm o mesmo tempo de base, considera-se que as ordenadas dos hidrogramas serão proporcionais à intensidade da P_e (Figura 3).

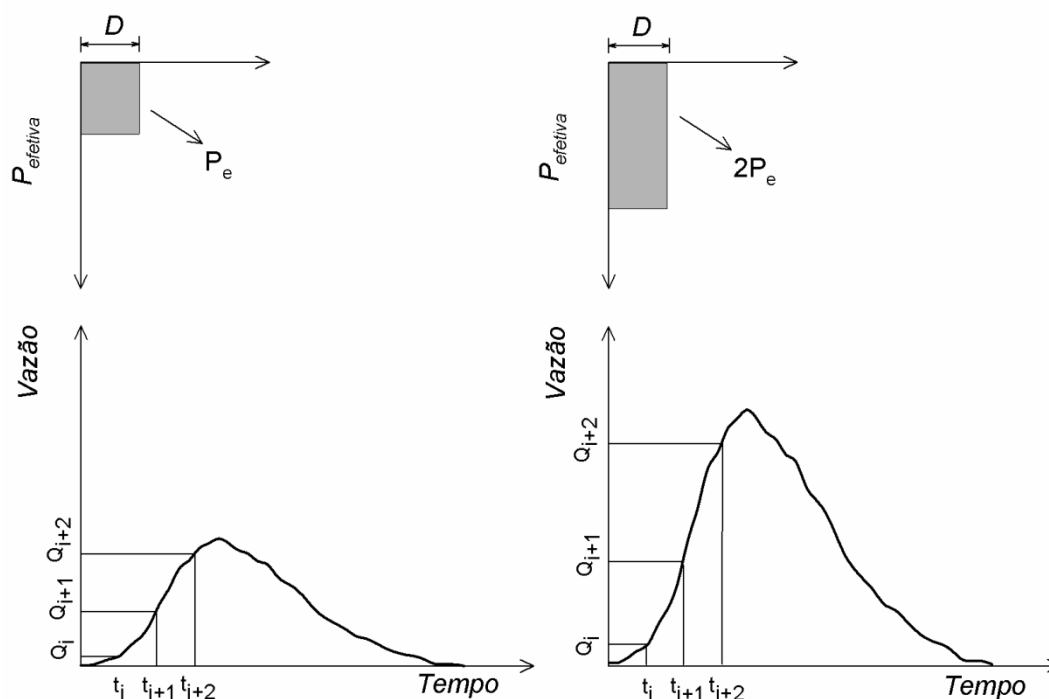


Figura 3 - Princípio da proporcionalidade na teoria do HU baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ

- Superposição: Considerando válido o HU, as vazões de um hidrograma de ESD, produzidas por chuvas efetivas sucessivas, podem ser encontradas somando as vazões dos hidrogramas de ESD correspondentes às chuvas efetivas individuais (Figura 4).

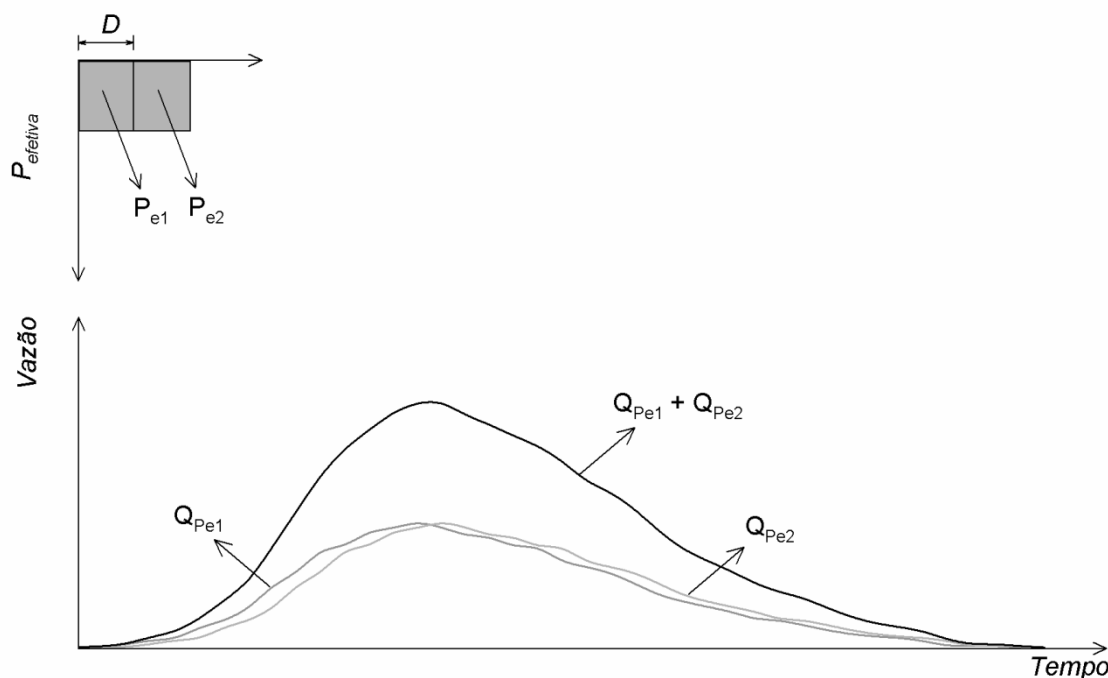


Figura 4 - Princípio da superposição de hidrograma baseado em dados reais de monitoramento na BHRJ

- Convolução: Aplicando os princípios da proporcionalidade e da superposição é possível calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos, a partir do HU. Esse cálculo é feito através da convolução. O conceito de convolução é crucial no estudo de sistemas invariantes no tempo, como é o caso da teoria do HU.

Tendo em vista que o HU de Sherman é baseado em dados observados de precipitação e escoamento, ele somente é aplicável a bacias monitoradas. Com base em equações empíricas, os HU's sintéticos tentam ampliar a aplicação da teoria do HU para bacias hidrográficas não monitoradas. O HU sintético tenta relacionar a formato do HU com as características da bacia, tais como comprimento e área. Como os modelos sintéticos não dependem de

dados de escoamento observados, eles podem ser aplicados para bacias não monitoradas (JENA; TIWARI, 2006)

Posteriormente, surgiu a ideia de Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI), inicialmente apresentada por Clark em 1945, onde nesse modelo o excesso de chuva unitária é aplicado uniformemente para a bacia inteira em um intervalo de tempo muito pequeno (AHMAD; GHUMMAN; AHMAD, 2009). O HUI é definido como a resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de precipitação instantâneo, com duração infinitamente pequena, tendendo a zero.

Segundo Mello e Silva (2013), trata-se de uma definição teórica, mas útil e importante para análise do escoamento em bacias hidrográficas, uma vez que seu desenvolvimento depende das características básicas de um balanço hídrico, por isso a denominação “modelo conceitual”.

Os modelos de Clark e de Nash são exemplos de modelos de HUI tradicionalmente conhecidos. De forma similar ao HU, o HUI também necessita de dados monitorados de precipitação e escoamento.

Como relatou Tucci (2009), Rodriguez-Itube e Valdez (1979) desenvolveram uma metodologia que introduz quantitativamente o efeito da geomorfologia da rede de drenagem na teoria do HUI. O Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG) foi interpretado como uma função densidade de probabilidade do tempo gasto por uma gota de chuva até atingir o exutório da bacia, função esta que, por sua vez, depende da geomorfologia. A geomorfologia é introduzida no HUIG através de índices da rede de drenagem como os de Horton (1945) e Strahler (1957), sendo estes índices obtidos a partir da rede de drenagem.

Estudos sobre a análise quantitativa de bacias têm indicado que a contribuição de ESD em diferentes paisagens é controlada pelas características geomorfológicas da bacia, desta forma diversos profissionais têm usado tais características em bacias não monitoradas para derivação de hidrogramas (BHAGWAT; SHETTY; HEGDE, 2011). De acordo com Agirre *et al.* (2005), existe uma estreita relação entre as características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica e sua resposta hidrológica. Portanto, o HUIG é de extrema utilização no planejamento de programas de gestão de bacias hidrográficas em larga escala, na ausência de dados hidrológicos (BHAGWAT; SHETTY; HEGDE, 2011).

Ghumman *et al.* (2011) consideram o HUIG uma ferramenta muito útil para predizer hidrogramas na seção de controle de bacias hidrográficas em virtude dos recentes desenvolvimentos de imagens de satélite e ferramentas de processamento de dados. A metodologia geomorfológica possui potencial para ser utilizada em bacias sem registros de dados, especialmente no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de observação hidrológica (CARVALHO; CHAUDRHY, 2001).

Como exposto por Collischonn e Dornelles (2013), uma forma alternativa de estimar a resposta de uma bacia hidrográfica às chuvas é o HU baseado no Histograma Tempo-Área (HTA). Nesse método define-se o os tempos de deslocamento do ESD desde o local de origem até o exutório da bacia. Como cada porção da bacia tem um tempo de deslocamento diferente até o exutório, em função da distância e da declividade, a resposta da bacia pode ser analisada na forma de um histograma de frequência. O HTA pode ser obtido identificando as linhas isócronas (que são as linhas que definem um mesmo tempo de deslocamento até o exutório da bacia) sobre a bacia e medindo a área entre cada par de isócronas, ou analisando uma bacia através do modelo digital de elevação (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Entretanto, essa metodologia de construir um HU através de um HTA, pode superestimar as vazões máximas, isso ocorre porque o HTA representa o processo de translação da água na bacia, mas não representa o processo de armazenamento temporário da água.

3 Material e Métodos

3.1. Bacias hidrográficas analisadas

Este trabalho foi conduzido na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), localizada no estado do Rio Grande do Sul, e na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada no estado de Minas Gerais (Figura 5). Este procedimento foi adotado a fim de verificar a aplicabilidade dos modelos frente às diferenças edafoclimáticas, topográficas, de vegetação, etc., das duas regiões em análise.

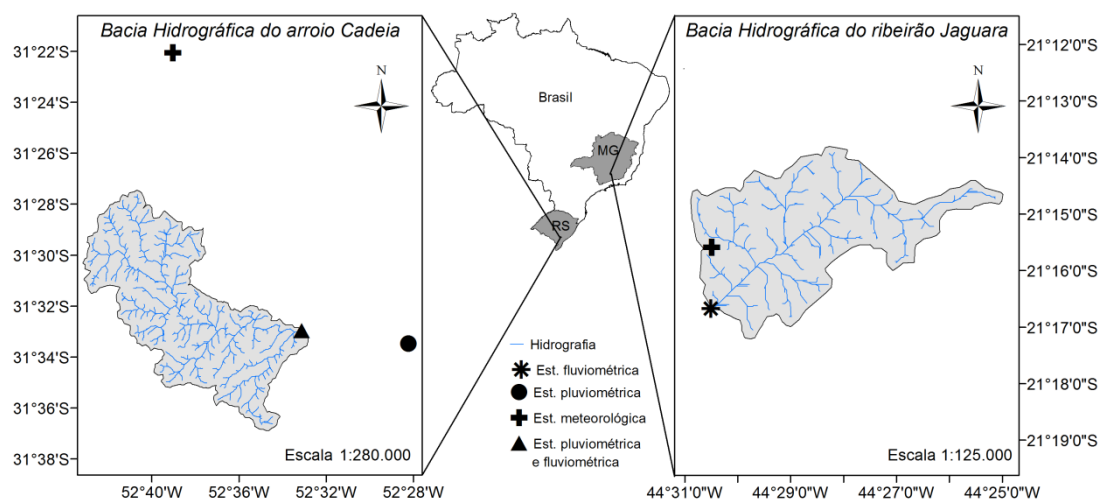


Figura 5 - Localização e rede de monitoramento das bacias hidrográficas do arroio Cadeia (BHAC) e do ribeirão Jaguara (BHRJ)

3.1.1 Bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC)

A BHAC, considerando a seção de controle empregada neste estudo (Figura 5), tem uma área de drenagem de 121,3 km². O arroio Cadeia é um dos principais afluentes do arroio Pelotas, cuja bacia hidrográfica está localizada no sul do RS e tem uma área total de aproximadamente 940 km², contemplando os municípios de Pelotas, Morro Redondo, Arroio do Padre e Canguçu.

A BHAP é fundamental para o desenvolvimento econômico do município de Pelotas (população de cerca de 328.000 habitantes), uma vez que a Estação de Tratamento de Água Sinotti, responsável por cerca de 40% do volume destinado ao abastecimento da cidade, aduz água de tal arroio. Além

do abastecimento de Pelotas, o Arroio Pelotas contém um valor histórico e cultural incalculável para a região sul do Rio Grande do Sul e é um importante afluente do canal São Gonçalo, o qual abastece o município de Rio Grande, Rio Grande do Sul, e ainda é uma via navegável importante que liga a laguna dos Patos à lagoa Mirim.

A Lei 10.350/1994 regulamentou o artigo 171 da Constituição Estadual, estabelecendo, para cada bacia do Estado, a formação de um comitê de gerenciamento, denominado de comitê de bacia. Segundo a referida lei, foram definidas, para o Rio Grande do Sul, três regiões hidrográficas, sendo elas as regiões do rio Uruguai, do Guaíba e do Litoral. Cada região hidrográfica foi subdividida em bacias hidrográficas, totalizando 25 unidades. Neste sentido, a BHAC integra a BHAP que, por sua vez, integra a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, a qual faz parte da região hidrográfica do Litoral.

Considerando que a Estação Agroclimatológica de Pelotas, situada no Capão do Leão, Rio Grande do Sul, seja representativa da BHAC, os registros históricos do período de 1971 a 2000 indicam que a temperatura média anual nesta região é de 17,8°C, variando de -3°C a 39,6°C, a umidade relativa média anual é de 80,7%, variando de 78,6% a 83,3%, a velocidade do vento média anual é de 3,5 m.s⁻¹, variando entre 2,6 m.s⁻¹ e 4,0 m.s⁻¹, e a evapotranspiração potencial média anual é de 1.103,1 mm, variando entre 985,8 mm e 1.568,7 mm. A precipitação média, considerando a mesma normal climatológica, é de 1.366,9 mm, porém, foram registrados valores entre 823,2 mm e 1.893,2 mm no período de 1971 a 2000 (EMBRAPA, 2015). De acordo com a classificação climática de Köppen, em estudo realizado por Kuinchtner e Buriol (2001), o clima da região da BHAC é caracterizado como Cfa, indicando a ocorrência de clima subtropical chuvoso, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

O fato de esta região dispor de uma pequena quantidade de postos de monitoramento hidrológico, especialmente no tocante a vazões, faz que a modelagem hidrológica seja uma ferramenta em potencial quando da necessidade de gestão de recursos hídricos. Apesar da importância econômica da bacia supracitada, existe uma carência de estudos que contemplem a modelagem hidrológica no sentido de avaliar ferramentas apropriadas para a estimativa de vazões de cheia nesta região.

Para inúmeras análises hidrológicas em bacias hidrográficas, essencialmente na modelagem do hidrograma de ESD, a informação primordial consiste do relevo, a partir do qual várias outras informações são derivadas. Para os estudos na BHAC, foram utilizados dados extraídos de Hasenack e Weber (2010), na forma de DVD, que contemplam todo o estado do Rio Grande do Sul na escala de 1:50.000, disponibilizando cartas topográficas contendo curvas de nível, pontos contados, hidrografia vetorizada, rodovias, estradas e áreas urbanizadas. Estes planos de informação foram usados como entrada no ambiente do SIG ArcGIS (ESRI, 2014) com o objetivo de elaborar o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC).

O MDEHC elaborado para a BHAC, com resolução espacial de 30 m, pode ser visualizado na Figura 6, a qual permite constatar, segundo o gradiente de variação, que a cabeceira da BHAC apresenta elevados valores de altitude quando comparada à região da seção de controle, apresentando 321,3 m de desnível entre a cota mais alta e o exutório da bacia.

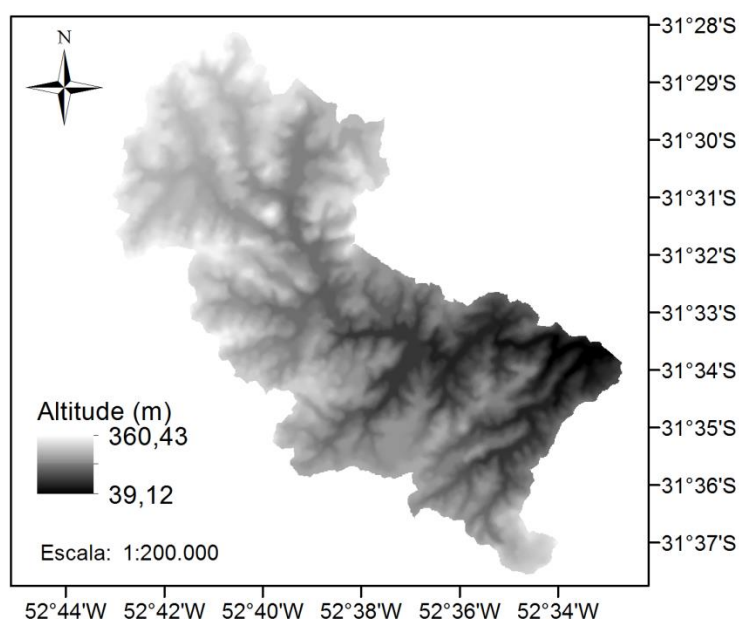


Figura 6 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da BHAC

A Figura 7 permite visualizar a variação da declividade do terreno ao longo da BHAC, obtida a partir do processamento do MDEHC no ambiente do SIG ArcGIS. Embora a região de cabeceira da bacia apresente altitudes mais elevadas que a região da seção de controle, a declividade apresenta maior

variação quando se observa a região do baixo arroio Cadeia, estando a declividade média da BHAC na ordem de 11%.

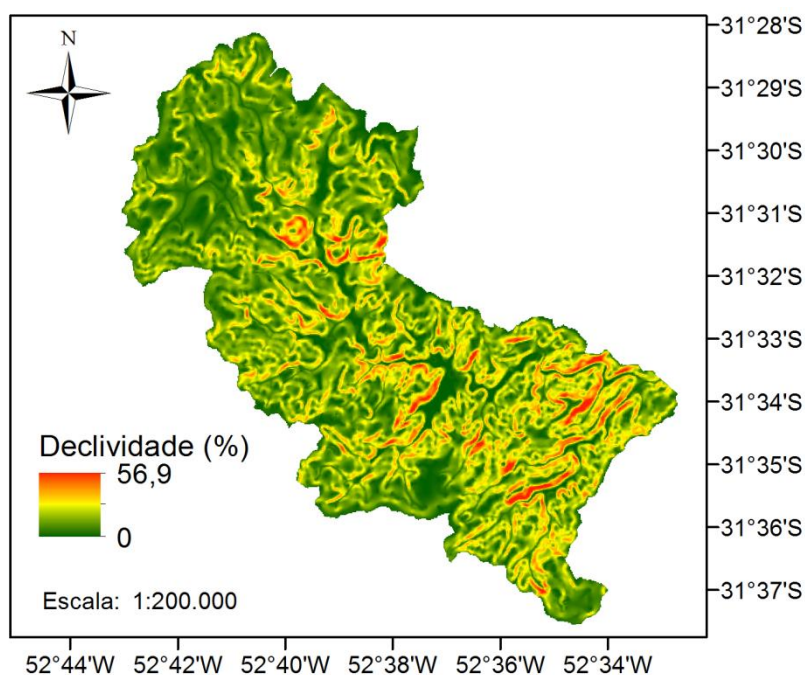


Figura 7 – Distribuição dos valores de declividade do terreno da BHAC

O enquadramento das classes de solo da BHAC (Figura 8) foi derivado de Brasil (1973), considerando o divisor de águas. Analisando as informações contidas na Figura 8, pôde-se constatar que 81,0% da área da bacia apresenta a classe de solo denominada *Luvissolo-Neossolo Litólico*, enquanto que 18,8% têm *Luvissolo-Argissolo* e apenas 0,2% têm *Neossolo Litólico*, estando este localizado na região de cabeceira da bacia hidrográfica.

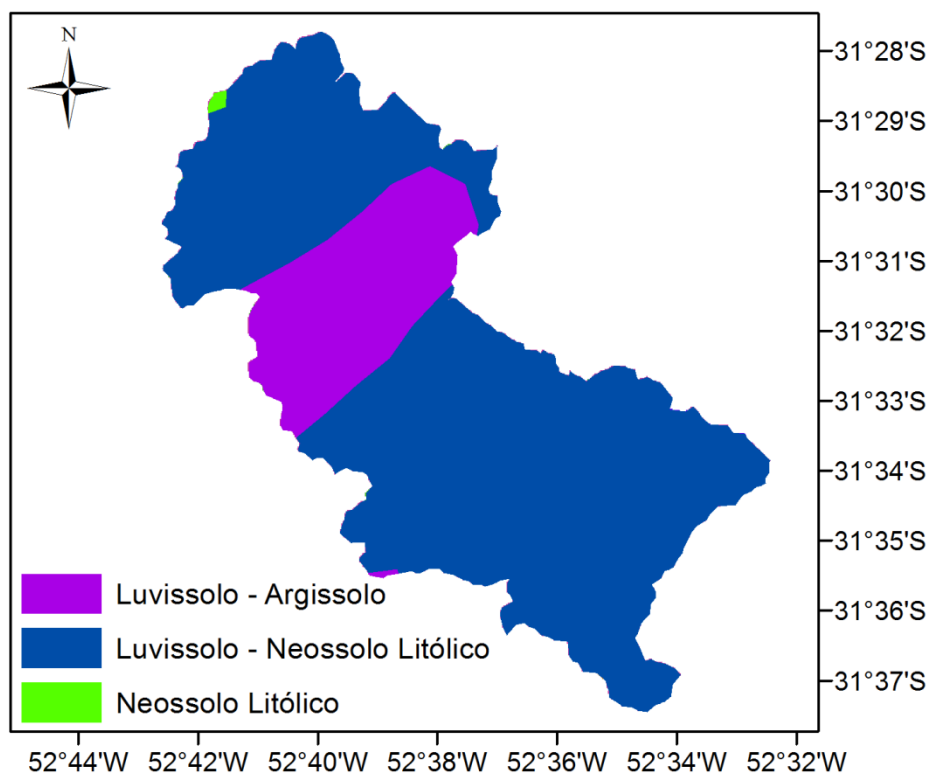


Figura 8 – Distribuição das classes de solo da BHAC

No que diz respeito ao uso do solo na BHAC, foram empregadas imagens do satélite Landsat que estão disponíveis no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As cenas 221_81 e 222_82 foram interpretadas utilizando classificação supervisionada, através do método da Máxima Verossimilhança, tomando como base 100 pontos de uso do solo conhecidos, os quais foram obtidos através de caminhamento com Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para tal intento, empregou-se o software Environment for Visualizing Imagens (ENVI), seguindo recomendações de Perrotta (2005). O estabelecimento das classes de uso do solo da BHAC foi baseado nos usos do solo reinantes na referida bacia.

Como pode-se observar na Figura 9, o uso do solo predominante na BHAC é a pastagem, sendo este responsável pela ocupação de 71,3% da área. A segunda cobertura de solo mais significativa é a floresta nativa (22,2%), seguida pelo cultivo anual (2,8%), por culturas perenes (2,1%) e por mata plantada (1,6%).

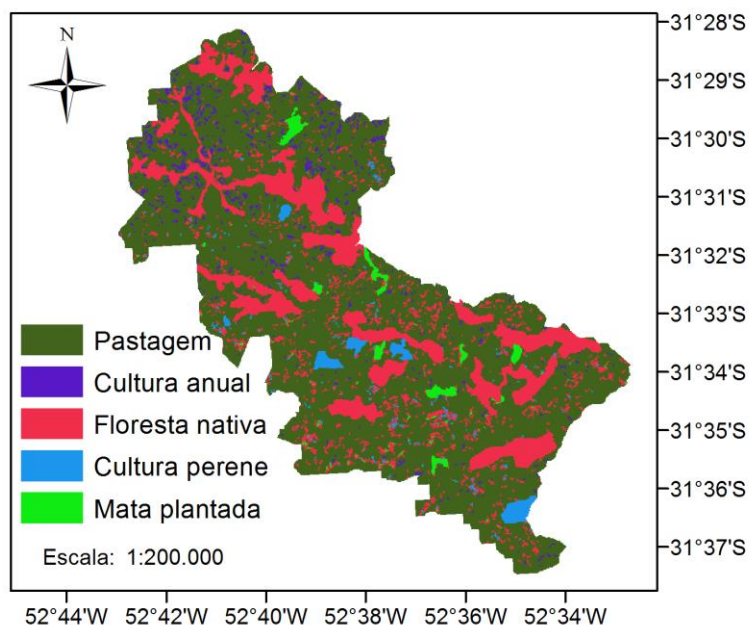


Figura 9 – Distribuição das classes de uso do solo da BHAC

3.1.2 Bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ)

A BHRJ está localizada no município de Nazareno, Minas Gerais, na região do Alto Rio Grande, Sul de Minas Gerais (Figura 5), estando inserida na unidade geomorfológica Planalto Campos das Vertentes e Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (GD1). Esta bacia possui uma área de drenagem de 29,5 km², sendo que o ribeirão Jaguará deságua diretamente no reservatório da usina hidrelétrica (UHE) de Camargos, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

A BHRJ tem uma ocupação predominantemente rural e apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos típicas da região do Alto Rio Grande (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). Estudos que visam avaliar o comportamento desta bacia são relevantes na compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico e no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade dos recursos naturais nesta região. O clima, de acordo com classificação de Köppen, é Cwa, caracterizado por verões amenos e úmidos e invernos frios e secos, com temperatura média anual de 19°C e precipitação média anual de 1.500 mm (MELLO *et al.*, 2008).

No caso da BHRJ, foram empregados o MDEHC (Figura 10) e o mapa de declividade do terreno (Figura 11), ambos com resolução espacial de 30 m, desenvolvidos por Beskow (2009) em estudo sobre modelagem hidrológica na referida bacia. A Figura 10 permite verificar a variação da elevação do terreno, sendo o desnível entre o ponto mais alto e a seção de controle da bacia igual à 116,1 m. Já a Figura 11 ilustra a declividade do terreno, sendo esta de 11,4%, em média.

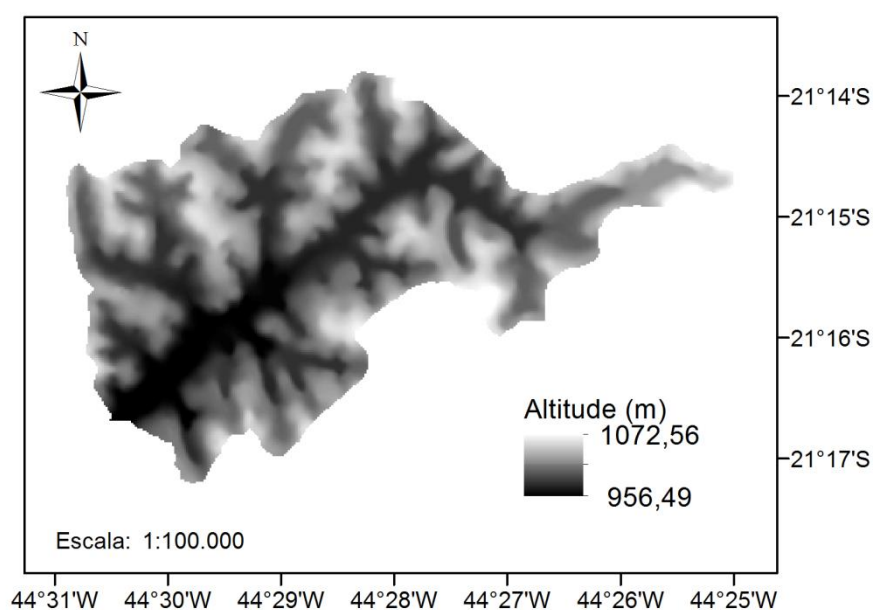


Figura 10 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da BHRJ
Fonte: Adaptado de Beskow (2009)

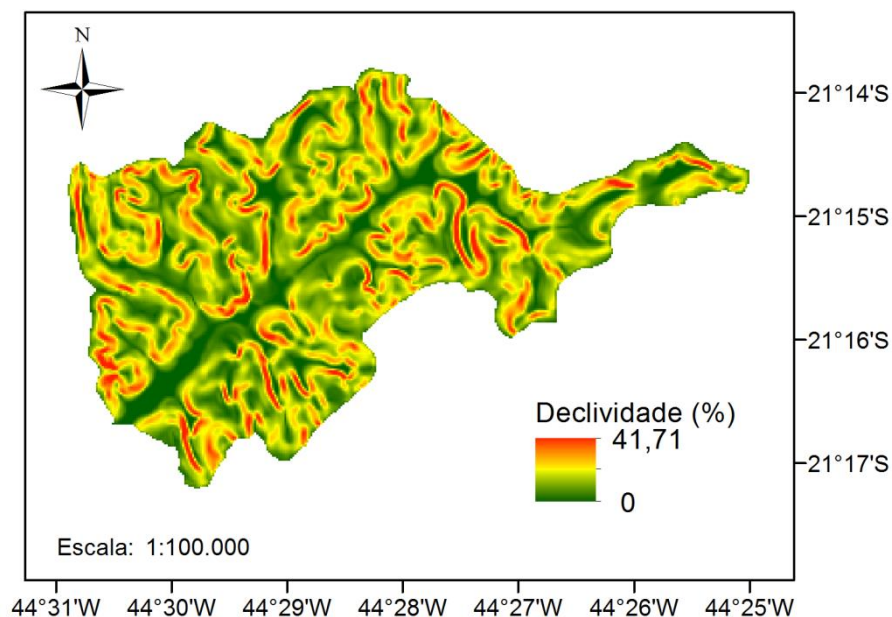


Figura 11 – Distribuição dos valores de declividade do terreno da BHRJ
 Fonte: Adaptado de Beskow (2009)

Para a BHRJ, empregaram-se os mapa de solo e de uso do solo apresentados por Beskow (2009), os quais podem ser visualizados nas Figuras 12 e 13, respectivamente. De acordo com o autor, a referida bacia hidrográfica apresenta predominância de Latossolo (59,8%), seguida de Cambissolo Háplico (23,4%) e de Neossolo Flúvico (16,8%). O mapa de uso do solo, bem como os dados apresentados em Beskow (2009), permitem constatar que as culturas prevalentes são pastagem (42,6%), milho (22,9%) e vegetação nativa (13,1%), enquanto solo nú representa 9,6% da área, cultivo de eucalipto representa concentrados 7,7% e cultivo de café está presente em 4,1% da área.

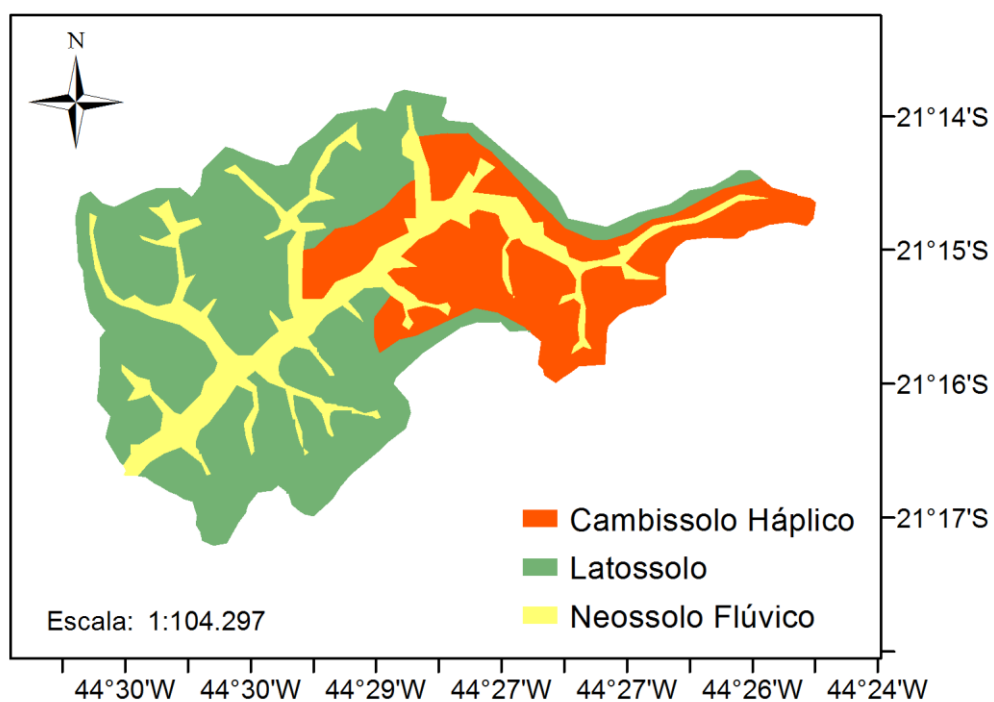


Figura 12 – Distribuição das classes de solo na BHRJ
Fonte: Adaptado de Beskow (2009)

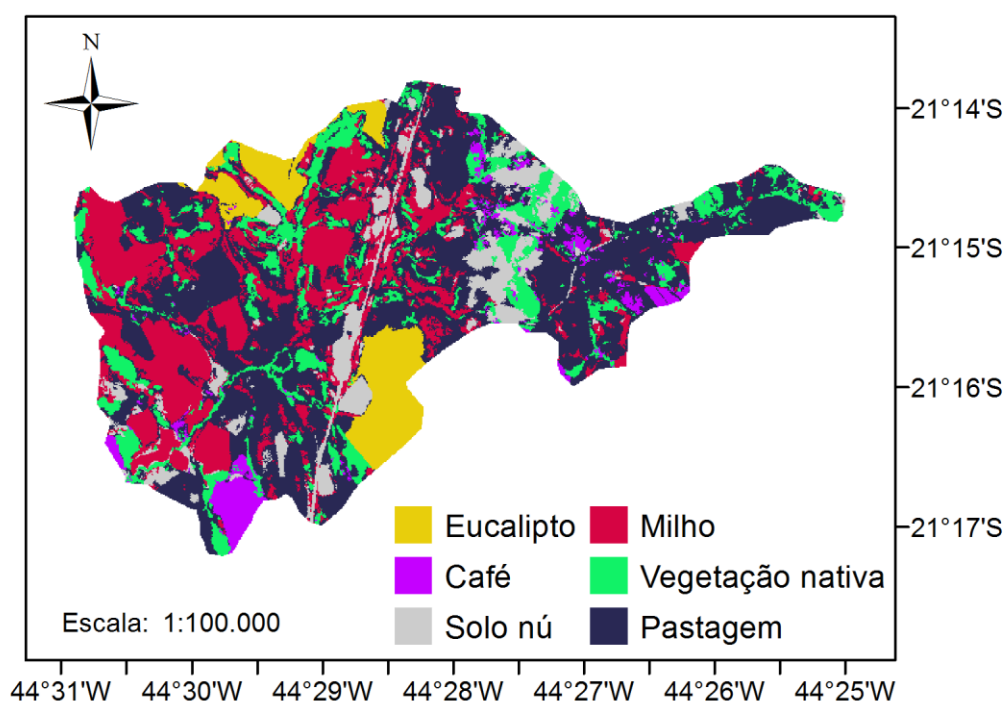


Figura 13 – Distribuição das classes de do uso do solo na BHRJ
Fonte: Adaptado de Beskow (2009)

A caracterização geomorfológica das duas bacias hidrográficas foi realizada tendo em vista a obtenção dos parâmetros de entrada dos modelos

de HU e HUI empregados neste estudo. Foram determinadas variáveis simples como, por exemplo, área de drenagem, comprimento de cursos d'água, etc., e variáveis mais complexas e trabalhosas de serem obtidas manualmente como, por exemplo, declividade média da bacia e de cursos d'água, ordem de cursos d'água, razão de bifurcação, perímetro, densidade de drenagem, dentre tantas outras. O SIG ArcGIS (ESRI, 2014) foi tomado como base para tornar o processo de caracterização geomorfológica mais automatizado, seguindo conceitos apresentados por Christofolletti (1980).

3.2. Monitoramento hidrológico

Para o propósito deste trabalho, visando à modelagem de cheias na BHAC, foram empregadas algumas estações de monitoramento que o Grupo de Pesquisa em “Hidrologia e Modelagem Hidrológica de Bacias Hidrográficas” vem utilizando, tais como (Figura 5): i) estação de monitoramento fluviométrico e pluviométrico do arroio Cadeia, disponibilizando informações de chuva e de nível d'água; ii) estação meteorológica localizada em Canguçu, disponibilizando para este estudo informações de chuva; e iii) estação pluviométrica localizada próxima à seção de controle do arroio Pelotas, na Ponte Cordeiro de Farias, disponibilizando informações de chuva.

Contudo, os Polígonos de Thiessen (Figura 14), traçados sobre a BHAC para identificação da área de influência de cada estação pluviométrica, indicaram que 2 das 3 estações analisadas devem ser consideradas para o cálculo da chuva média sobre a área da bacia: a estação pluviométrica localizada junto à seção de controle da BHAC (Figura 15), com peso de 87,67%, e a estação meteorológica localizada no município de Canguçu (Figura 16), com peso de 12,33%. Ambas as estações dispõem de pluviômetro automático que utiliza o princípio de cubas basculantes, já a estação de monitoramento de nível d'água utiliza um sensor de pressão. Estas estações de monitoramento dispõem de sistemas dataloggers para armazenamento de informações num intervalo de tempo de 5 minutos, sendo a aquisição foi realizada por meio de computadores portáteis.

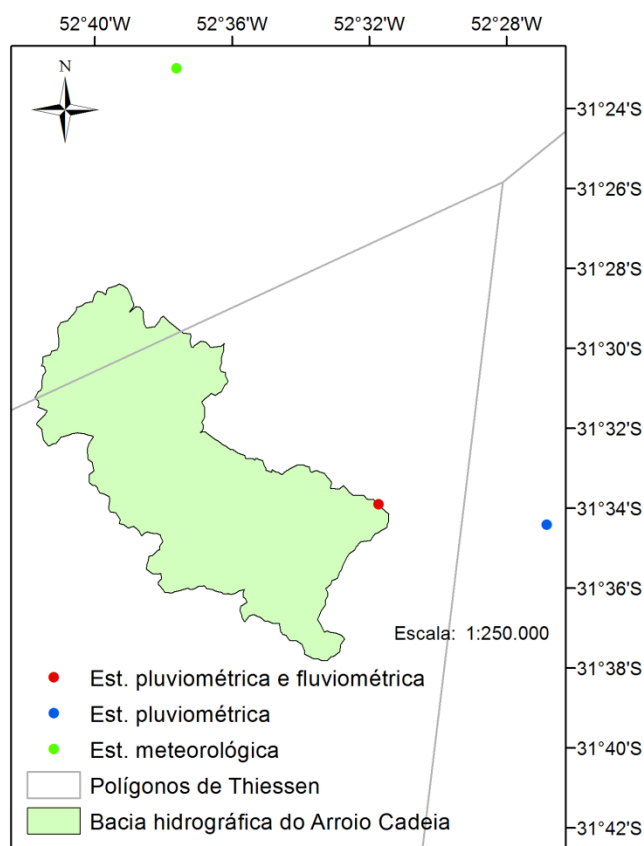


Figura 14 – Área de influência de cada estação de monitoramento de chuva sobre a BHAC, considerando a metodologia dos Polígonos de Thiessen



Figura 15 - Ilustração da seção de controle do arroio Cadeia com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e também por réguas linimétricas (a); e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas de chuva e de nível da estação modelo Solar SL2000-PNVn, da mesma seção (b)



Figura 16 - Estação meteorológica, modelo Davis Vantage Pro2, localizada no município de Canguçu, Rio Grande do Sul

No caso da BHRJ, que está sendo monitorada desde 2005, os dados hidrológicos foram disponibilizados graças à parceria estabelecida entre os grupos de pesquisa “Hidrologia e Modelagem Hidrológica de Bacias Hidrográficas”, da Universidade Federal de Pelotas, e “Engenharia de Água e Solo”, do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

Foram empregados dados pluviométricos de uma estação meteorológica automática (Figura 17), sendo esses dados observados num intervalo de tempo de 15 ou de 30 minutos, dependendo da época do ano. A estação meteorológica está localizada na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, a qual é uma sub-bacia da BHRJ, podendo a localização espacial do posto ser visualizada na Figura 5. Já os dados de nível d’água foram obtidos através de um linígrafo automático instalado na seção de controle (Figura 18) da BHRJ, estando este configurado para registrar as informações cada 30 minutos.



Figura 17 - Estação meteorológica instalada na BHRJ, no município de Nazareno - Minas Gerais



Figura 18 - Ilustração da seção de controle do ribeirão Jaguará com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas da mesma seção

As curvas-chave para as seções de controle analisada neste estudo foram ajustadas usando dados de medições de descarga líquida (vazão) e os respectivos níveis dos cursos d'água. Para tanto, foram realizadas campanhas hidrológicas, como a ilustrada na Figura 19 utilizando os conhecidos molinetes hidrométricos. Estas medições foram feitas em situações em que os cursos d'água apresentaram condições de vazões baixas, médias e altas.



Figura 19 - Campanha hidrológica para determinação de descarga líquida usando micromolinete hidrométrico no arroio Cadeia

As campanhas hidrológicas realizadas na seção de controle da BHAC permitiram traçar uma correlação entre os dados de nível de água, monitorados pelo sensor de pressão, e as medições de descarga líquida. A Equação 1, bem como a Figura 20, apresentam a curva-chave ajustada para a referida seção de controle.

$$Q = 8,029 \cdot H^{1,727} \quad (1)$$

em que Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e H é o nível d'água (m) monitorado pelo sensor.

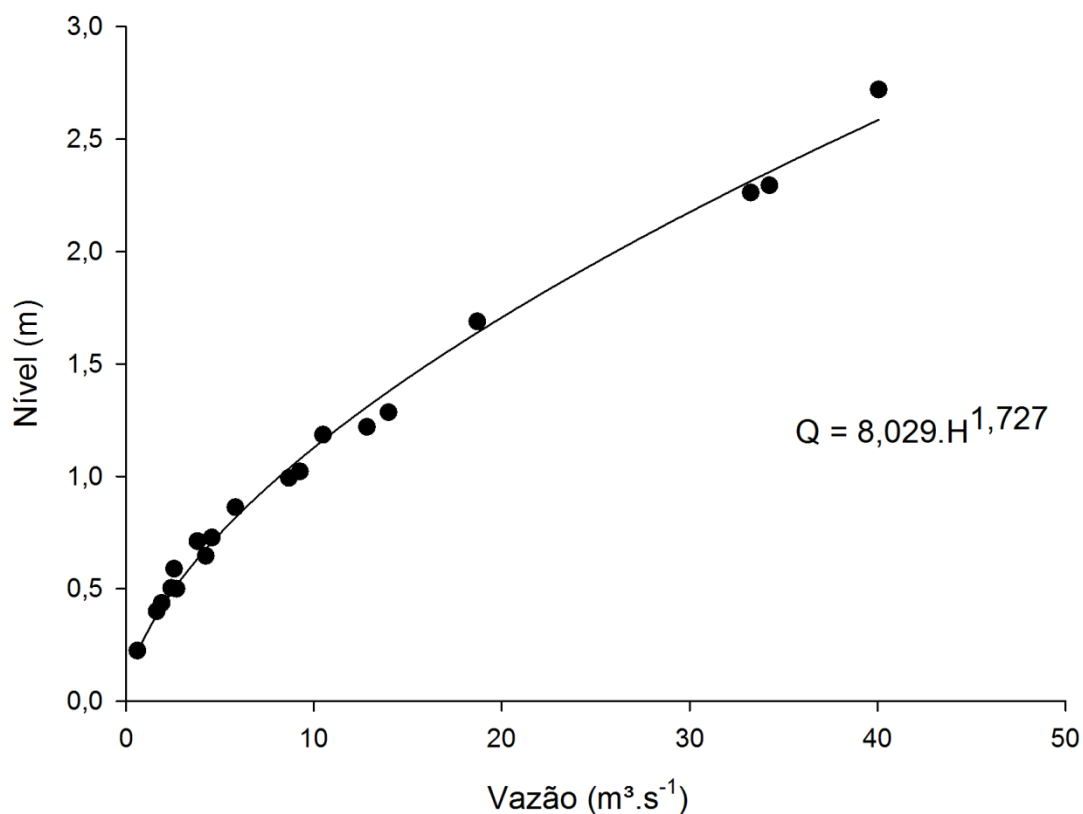


Figura 20 - Curva-chave para a seção de controle da BHAC

O valor do coeficiente de determinação (R^2) para a curva-chave da BHAC foi de 0,99, permitindo constatar um ajuste excelente.

A Equação 2 ($R^2 = 0,91$) representa a curva-chave ajustada para a seção de controle da BHRJ, válida para o período de dados compreendido entre 2006 e 2008, enquanto que a Equação 3 ($R^2 = 0,93$) representa a curva-chave da mesma seção, porém para o ano hidrológico 2011/2012, períodos estes empregados neste estudo.

$$Q = 4,037 \cdot H^{1,604} \quad (2)$$

$$Q = 3,560 \cdot H^{1,752} \quad (3)$$

onde Q é a vazão ($m^3.s^{-1}$) e H é o nível d'água (m).

As séries históricas de níveis de água nas duas seções de controle foram posteriormente convertidas em séries de vazões por meio do emprego das curvas-chave das referidas seções de controle.

3.3. Hietogramas e hidrogramas observados para modelagem

Diversos eventos de chuva, com diferentes durações, totais precipitados e intensidades médias, foram selecionados para as duas bacias hidrográficas deste trabalho no intuito de conduzir os estudos de modelagem hidrológica de cheias pautados na teoria do HU e do HUI. Foi dada preferência aos eventos de chuva causadores de cheias mais pronunciadas, conforme preconizado por Raghunath (2006).

Os dados de chuva, considerando todas as estações pluviométricas automáticas empregadas neste trabalho, foram organizados de modo a originar hietogramas com intervalo de tempo de 30 minutos. A escolha deste intervalo é essencial para conduzir estudos envolvendo a teoria do HU e HUI. Para a BHRJ foram considerados somente os dados de uma estação para estabelecer o hietograma de cada evento de chuva analisado. Já para a BHAC foram considerados dados de duas estações automáticas para computar o hietograma médio na bacia referente a cada evento de chuva, considerando a metodologia dos polígonos de Thiessen, conforme supracitado.

Para cada evento de chuva analisado, tanto na BHAC quanto na BHRJ, foi representada a resposta em termos de variação de vazões ao longo do tempo. Estes dados de vazão, obtidos a partir da combinação do monitoramento linimétrico e da curva-chave, deram origem ao hidrograma ocasionado por cada evento de chuva analisado, também considerando o intervalo de tempo de 30 minutos.

3.4. Hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD)

O hidrograma reflete o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica antes, durante e após eventos de chuvas, tendo contribuição de diferentes componentes de escoamento, a saber: chuva direta sobre a calha fluvial, ESD, escoamento subsuperficial e escoamento de base. Estes componentes são bastante variáveis e dependentes das condições meteorológicas, geomorfológicas e hidrológicas da bacia hidrográfica. No caso específico de determinação do HU, se faz necessário conhecer a parcela de

escoamento referente à P_e , ou seja, conhecer a sequência temporal de vazões decorrentes do ESD ocasionada por um evento de chuva.

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia de separação de escoamento que une, através de uma reta, o ponto sobre o hidrograma após o qual a contribuição do ESD começa a ocorrer ao ponto a partir do qual ocorre o término deste escoamento, também conhecidos como inflexões A e C.

Conforme descrito em Mello e Silva (2013) o método supracitado consiste em determinar dois pontos, onde o ponto A é determinado visualmente, com base nos valores de vazão, e o ponto C é determinado analiticamente, calculando-se uma constante de depleção (K_{A-C}) baseada nos últimos valores de vazão, os quais pertencem apenas ao escoamento base. Esse procedimento é adotado até que se encontre um valor para K_{A-C} sensivelmente inferior aos obtidos inicialmente, o que significa que uma vazão mais alta foi atingida, ou seja, que há parcela do ESD compondo o valor total da vazão. Esta metodologia tem sido bastante utilizada em pesquisas atuais, que em alguma etapa necessitam separar o escoamento como, por exemplo, em Agirre *et al.* (2005) e em Jena e Tiwari (2006).

Após estabelecer a separação do escoamento para cada hidrograma analisado, em cada uma das duas bacias hidrográficas, foi possível extrair do hidrograma de escoamento total somente o hidrograma parcial de ESD, desta forma permitindo a modelagem de HU e de HUI.

3.5. Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (P_e)

O volume de ESD de cada evento analisado foi obtido pela determinação da área abaixo do hidrograma através do método de integração numérica conhecido como Regra dos Trapézios, seguindo procedimentos recomendados por Burden e Faires (2013), e a P_e do referido evento, pela razão entre esse volume e a área da bacia hidrográfica.

A determinação da P_e total, é fundamental para a estimativa da distribuição temporal de chuvas efetivas, por vezes conhecida como hietograma de chuvas efetivas. A estimativa do hietograma de P_e foi realizada para cada evento de chuva analisado, em cada bacia hidrográfica, tomando como base três metodologias: 1) Índice ϕ , de acordo com recomendações de

Mello e Silva (2013); 2) Método do Número da Curva proposto pelo Soil Conservation Service (CN) (SCS, 1971); e 3) Método do Número da Curva Modificado (CN Modificado), desenvolvido por Mishra *et al.* (2003).

3.5.1. Índice ϕ

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 P_e por uma reta paralela ao eixo do tempo, indicando que a área do hietograma acima desta reta corresponde ao ESD, ou P_e 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 P_e 's, de modo a satisfazer a condição de que a área do hietograma de P_e 's acima da linha seja equivalente à área abaixo do hidrograma de ESD.

Neste trabalho, o Índice ϕ foi obtido de forma iterativa de modo que, para cada evento de chuva analisado, a soma das P_e 's fosse igual ao ESD em lâmina, conforme indicado por Mello e Silva (2013).

3.5.2. Método do Número da Curva (CN)

Este método foi desenvolvido pelo SCS em 1971. 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. Mello e Silva (2013) destacam que este método é bastante empregado também para estimar as P_e 's, as quais podem ser consideradas para estimativa da vazão de projeto e hidrograma de projeto.

O embasamento físico desse método pode ser entendido como (MELLO; SILVA, 2013):

$$\frac{\text{volume infiltrado}}{\text{capacidade máxima de absorção}} = \frac{\text{precipitação efetiva}}{\text{precipitação total}} \quad (4)$$

Sendo que a Equação 4 pode ser reescrita como:

$$\frac{P - Q}{S} = \frac{Q_{ESD}}{P} \quad (5)$$

em que P é a precipitação total, Q_{ESD} é o deflúvio ou precipitação efetiva e S é o potencial de armazenamento de água no solo.

Este método considera também as abstrações iniciais que correspondem às perdas de água que ocorrem antes do início da geração do ESD e estão associadas, segundo Mishra *et al.* (2006), à interceptação, armazenamento na superfície do terreno e infiltração de água no solo.

Introduzindo as perdas por abstração inicial (I_a) na Equação 5, tem-se:

$$\frac{P - Q_{ESD} - I_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (6)$$

Da equação acima é possível chegar à equação geral do método:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (7)$$

O método do CN, no seu formato padrão, de acordo SCS (1971), considera I_a como igual a 20% de S . Desta forma, a equação que estima o deflúvio ou P_e resulta em:

$$P_e = \frac{(P - 0,20 \cdot S)^2}{P + 0,80 \cdot S} \quad (8)$$

Todas as variáveis da equação acima podem ser trabalhadas na unidade de milímetros (mm). O método preconiza ainda que somente existirá escoamento quando P for superior a I_a . O potencial de armazenamento de água no solo S , em mm, é obtido com base no Número da Curva (CN), de acordo com a equação abaixo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (9)$$

Os valores para CN variam de 1 a 100. Esta escala retrata as condições de cobertura e solo, variando desde uma cobertura muito impermeável (limite superior) até uma cobertura completamente permeável (limite inferior). Esses

valores foram tabelados para diferentes tipos de solo e cobertura. O método considera também a influência da umidade do solo antecedente (AMC – Antecedent Moisture Content) ao evento de chuva na definição dos valores de CN, a partir de três classes, em função da chuva acumulada nos cinco dias anteriores (P_5), sendo elas: AMC I, 0 a 35 mm; AMC II, 35 a 52,5 mm; e AMC III, superior a 52,5 mm. Os valores de CN associados a diferentes situações de uso do solo, grupos hidrológicos e classes de umidade antecedente podem ser encontrados em Mello e Silva (2013).

De acordo com Agirre *et al.* (2005), no caso da aplicação do CN quando dados de chuva e de escoamento estão disponíveis, o método depende dos parâmetros I_a e S . Neste trabalho, o CN foi empregado para estimar o hietograma de P_e 's a partir dos hietogramas observados, considerando cada hidrograma resultante após a separação do escoamento. Foi calibrado, para cada evento, o valor de CN de modo que a soma de todas as P_e 's s resultasse no ESD observado, e I_a foi considerado como sendo 20% de S , seguindo recomendações de SCS (1971).

3.5.3. Método CN Modificado por Mishra *et al.* (2003)

O Método do CN modificado (MISHRA *et al.*, 2003) consiste em uma modificação do método original do CN, no sentido de aperfeiçoar a relação entre I_a e S , pela consideração da umidade antecedente (M) como função da P_5 .

Segundo Beskow *et al.* (2009), isso torna o método mais flexível a diferentes valores de M , diferentemente do método original, que trabalha com três condições de umidade; no modelo tradicional CN, a umidade do solo é relacionada com a P_5 , dividindo-se nas condições AMC I (solo seco), AMC II (solo próximo à capacidade de campo) e AMC III (solo muito úmido).

Além disso, no método do CN, o coeficiente de abstração inicial é constante (λ), o qual depende especialmente das condições climáticas, sendo a hipótese mais ambígua, requerendo refinamento (MELLO; LIMA; SILVA, 2007). A partir disso, Mishra *et al.* (2003) desenvolveram o modelo CN Modificado, incorporando a umidade antecedente e a P_5 , bem como a variação nos valores de λ . Nesse modelo, a P_e é computada pela seguinte sequência de equações (BESKOW *et al.*, 2009):

$$P_e = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M)}{P - I_a + M + S} \quad (10)$$

em que P_e é a precipitação efetiva (mm), P é a precipitação total (mm); I_a é a abstração inicial da precipitação (mm); M é a umidade antecedente (mm) e S é o potencial de armazenamento de água no solo (mm). A umidade antecedente é dada por:

$$M = 0,5 \left[-(1 + \lambda) S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_5 S} \right] \quad (11)$$

E a abstração inicial:

$$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M} \quad (12)$$

Em que λ é o coeficiente de abstração inicial (adimensional) e P_5 é a precipitação acumulada nos últimos 5 dias (mm).

Para esse estudo, em ambas as bacias, o λ foi fixado no valor de 0,2, conforme recomenda SCS (1971). O método do CN Modificado foi empregado, neste estudo, para estimar o hietograma de P_e 's a partir dos hietogramas observados, considerando cada hidrograma resultante após a separação do escoamento. Foi calibrado, para cada evento, o valor de S de modo que a soma de todas as P_e 's resultasse no ESD observado.

3.6. Modelagem de hidrograma unitário (HU) e de hidrograma unitário instantâneo (HUI)

O HU é um modelo que representa o ESD ocasionado por uma P_u ocorrendo uniformemente sobre a bacia hidrográfica durante uma dada duração, enquanto que o HUI considera uma duração infinitesimal de P_u . O HU e o HUI podem ser derivados do monitoramento hidrológico ou de características geomorfológicas da bacia hidrográfica. No primeiro caso, determinam-se as vazões unitárias com base em dados pluviométricos e fluviométricos de um dado evento, enquanto que no segundo, informações

oriundas do relevo da área de estudo subsidiam a estimativa dos parâmetros necessários à obtenção do HU e do HUI.

Neste estudo, empregaram-se dois modelos de HU geomorfológicos, conhecidos como Triangular e Adimensional, e dois modelos de HUI conceituais (Clark e Nash), sendo estes últimos trabalhados tanto a partir de eventos monitorados de chuva-vazão quanto a partir das características geomorfológicas das bacias hidrográficas.

3.6.1. Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)

Os modelos de Hidrograma Unitário Triangular (HUT) e Adimensional (HUA) foram desenvolvidos pelo SCS (1971), fundamentados na análise de um grande número de HU's obtidos para bacias hidrográficas norte-americanas de diferentes tamanhos.

A ideia central do HUT, segundo Mello e Silva (2013), é aproximar os trechos de ascensão e de recessão do hidrograma por duas retas, constituindo um triângulo. Já o HUA, é um método que visa sintetizar o HU, para um determinado tempo de duração da precipitação, através do uso de um hidrograma adimensional, que assume uma única forma para representação do ESD independentemente da bacia hidrográfica (RAMOS *et al.*, 1989).

A formulação matemática do HUT consiste em relações geométricas com base em três parâmetros, sendo eles: vazão de pico, tempo de ascensão e tempo de base. Segundo Tucci (1995), os principais parâmetros de ajuste do HUA são obtidos do HUT (Figura 21).

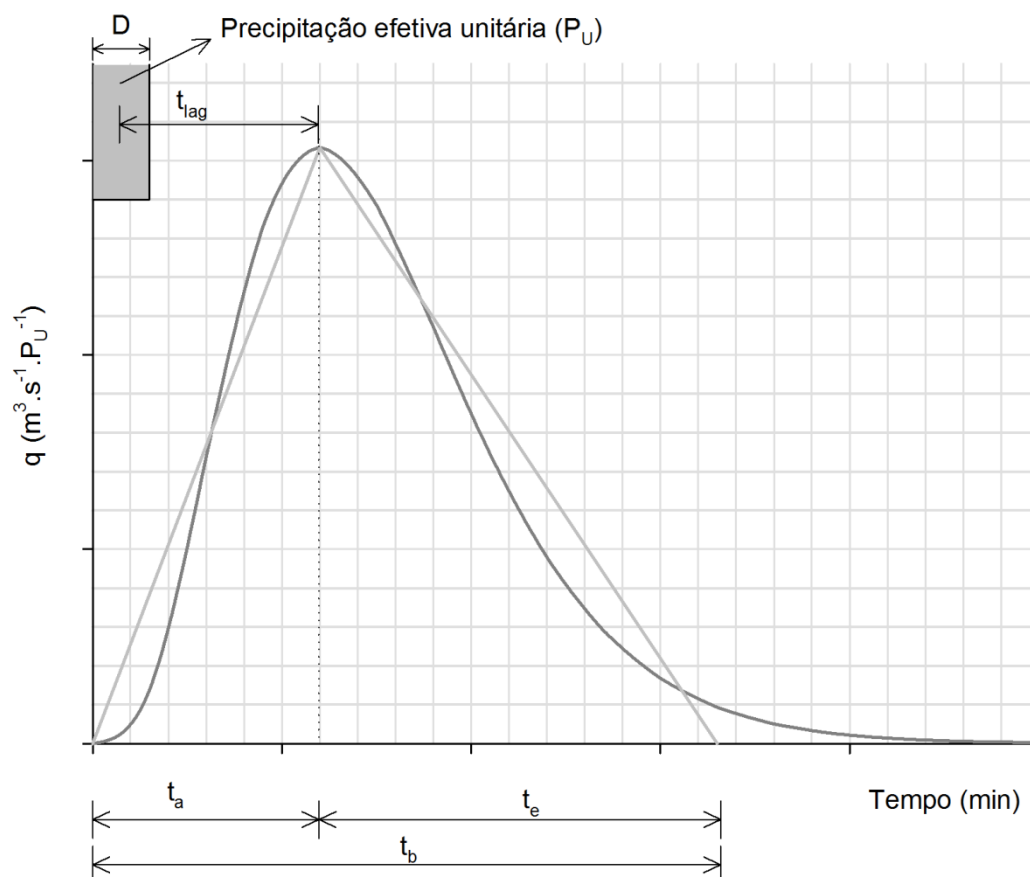


Figura 21 - Hidrogramas Unitários Triangular (cinza) e Adimensional (preto) desenvolvidos pelo SCS, baseado em dados reais da BHRJ

O tempo de ascensão (t_a) do HUT e do HUA é dado pela soma da metade do tempo de duração (D) da P_u com o tempo de retardo da bacia hidrográfica (t_{lag}). O t_{lag} apresentado na Figura 21 é diferente do considerado na Figura 2, o qual é tradicionalmente empregado na área de hidrologia e considera o tempo entre o centro de gravidade do hietograma e o centro de gravidade do hidrograma.

Considerou-se, neste estudo, uma P_u de 1 mm ocorrendo uniformemente sobre a bacia hidrográfica durante um tempo D de 30 minutos. O t_{lag} , por sua vez, foi estimado empregando a seguinte equação empírica sugerida pelo (SCS, 1971):

$$t_{lag} = \frac{2,6 \cdot L^{0,80} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1 \right)^{0,70}}{1900 \cdot X^{0,50}} \quad (13)$$

onde t_{lag} é obtido em horas, L é o comprimento do curso d'água principal (m), S é o potencial de armazenamento de água no solo de acordo com o método CN (Equação 9) e X é a declividade média da bacia (%).

A vazão de pico (q_p) do HUT e do HUA foi estimada pela relação:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot P_u \cdot A}{t_a} \quad (14)$$

onde q_p é obtida em m^3s^{-1} , P_u deve ser dada em mm, A é a área da bacia hidrográfica, em km^2 , e t_a deve ser dado em horas.

Para o HUT, como pode ser verificado na Figura 21, o tempo de base (t_b) é dado pela soma dos tempos de ascensão t_a e de recessão (t_e) do HU, sendo t_b definido como 8/3 de t_a , ou seja, t_e 67% superior ao t_a .

Em se tratando do HUA, as ordenadas são obtidas pela razão entre vazão e vazão de pico (q/q_p), para uma série de razões entre tempo e tempo de ascensão (t/t_a), a partir da seguinte equação:

$$\frac{q}{q_p} = \left[\frac{t}{t_a} \cdot \exp \left(1 - \frac{t}{t_a} \right) \right]^X \quad (15)$$

em que X é a função gama precisa do fator de pico (FP), que comumente é empregado como 484, dada por (TOMAZ, 2013):

$$X = 0,8679 \cdot \exp(0,00353 \cdot FP) - 1 \quad (16)$$

3.6.2. Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)

O HUI é definido como a resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de precipitação instantâneo, com duração infinitamente pequena, tendendo a zero. De acordo com Silva *et al.* (2008), Nash (1957) representou o ESD em uma bacia hidrográfica por n reservatórios lineares em cascata (Figura 22), cuja situação considera uma precipitação uniforme ao longo da bacia e sua propagação até a respectiva seção de controle. A consideração de reservatórios simula uma situação de amortecimento da vazão de pico e outra de translação, ou seja, de um movimento de ondas do escoamento cujo efeito

é mais pronunciado em canais ao longo da bacia. Fisicamente, a facilidade com que o reservatório drena o escoamento é representada por um parâmetro k , o qual reflete a resposta da bacia hidrográfica ao ser excitada por um ou mais eventos de precipitação efetiva (TUCCI, 2009; FRENDRICH, 1984).

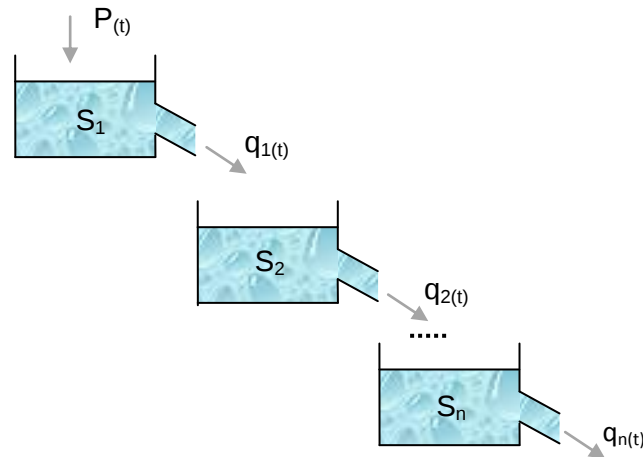


Figura 22 - Cascata de reservatórios utilizada no modelo de HUI de Nash

A Equação 17(17 é conhecida como modelo conceitual de Nash para o HUI, considerando 2 parâmetros e reservatórios lineares.

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (17)$$

onde $u(t)$ denota as ordenadas do HUI do modelo de Nash, t é o intervalo de tempo, n e k são os parâmetros do modelo Nash e Γ a função gama. O parâmetro k (parâmetro de escala), igual para todos os reservatórios lineares, é a constante de armazenamento e tem a dimensão de tempo, enquanto o parâmetro n (parâmetro de forma) diz respeito ao número de reservatórios lineares atenuando o pico do HUI.

Para estimar os parâmetros k e n , Nash (1957) demonstrou que, para um sistema linear invariante no tempo, as seguintes relações são válidas:

$$m_{1(\text{HUI})} = m_{1S} - m_{1E} \quad (18)$$

$$m_{2(\text{HUI})} = m_{2S} - m_{2E} \quad (19)$$

em que $m_{1(HUI)}$ e $m_{2(HUI)}$ são os dois primeiros momentos do HUI; m_{1S} e m_{2S} são os dois primeiros momentos do hidrograma de saída; m_{1E} e m_{2E} são os dois primeiros momentos do hidrograma de entrada, ou seja:

$$m_{1S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{\sum Q_i} \quad (20)$$

$$m_{2S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i^2}{\sum Q_i} - m_{1S}^2 \quad (21)$$

$$m_{1E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i}{\sum P_i} \quad (22)$$

$$m_{2E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i^2}{\sum P_i} - m_{1E}^2 \quad (23)$$

onde, Q_i é a vazão de ESD ($m^3.s^{-1}$), t_i é o intervalo de tempo (min) e P_i são as precipitações efetivas (mm).

Introduzindo-se esses termos nas Equações 18 e 19 e resolvendo, tem-se:

$$k = \frac{m_{2S} - m_{2E}}{m_{1S} - m_{1E}} \quad (24)$$

$$n = \frac{(m_{1S} - m_{1E})^2}{m_{2S} - m_{2E}} \quad (25)$$

As ordenadas q do HU final, para um valor de P_u de 1 mm, incidindo de forma uniforme sobre a bacia hidrográfica, durante um tempo de duração D de 30 minutos, foi obtido por meio da integração do HUI, de acordo com a Equação 26.

$$q(t) = \int_0^t u(t - \tau) d\tau \quad (26)$$

3.6.3. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN)

Rodriguez-Iturbe e Valdez (1979) derivaram as características q_p e tempo para o pico (t_a) do HUI como função das razões de Horton. Posteriormente, Bhagwat, Shetty e Hegde (2011), com base nos resultados do estudo de

Rodriguez-Iturbe e Valdez (1979), propuseram relações entre os parâmetros de escala (k) e de forma (n) do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN) com as leis de Horton. Neste trabalho, considerou-se como Hidrograma Unitário Geomorfológico de Nash (HUIGN) o emprego do HUIN através das relações de n e k propostas por Bhagwat, Shetty e Hegde (2011), conforme equacionamento abaixo:

$$q_p \cdot t_a = \frac{n-1}{\Gamma(n)} e^{-(n-1)} \cdot n - 1^{n-1} = 0,5764 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{0,05} \quad (27)$$

em que R_B e R_L integram as leis de Horton (1945), descritas em Christofolletti (1980) como razão de bifurcação (R_B), que expressa a relação entre o número total de segmentos de uma certa ordem e o número total de segmentos de ordem imediatamente superior, e razão de comprimento (R_L), que relaciona o comprimento dos cursos d'água de uma dada ordem como o comprimento dos cursos d'água de uma ordem imediatamente inferior, e R_A , proposta por Schumm (1956) e descrita em Christofolletti (1980) como razão entre as áreas das bacias, a qual é dada pela razão entre a área de drenagem média dos cursos d'água de uma determinada ordem e a área de drenagem média dos cursos d'água de uma ordem imediatamente inferior.

Na Equação 27, todos os termos do lado direito extremo podem ser determinados, visto que derivam de características geomorfológicas da bacia hidrográfica, restando apenas a determinação dos parâmetros n e k do modelo de HUI de Nash. O parâmetro n foi determinado iterativamente de acordo com a Equação 27, enquanto k foi computado empregando-se os índices adimensionais, acima descritos, seguindo recomendação de Bhagwat; Shetty; Hegde (2011):

$$k = \frac{0,44 \cdot L}{v} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{-0,38} \cdot (n-1)^{-1} \quad (28)$$

onde v é a velocidade dinâmica ($m.s^{-1}$).

Para estimar v , realizou-se uma análise de regressão, tomando como base cada bacia hidrográfica, considerando este parâmetro como variável

resposta e a vazão como variável explicativa, sendo os dados empregados nessa análise oriundos das campanhas hidrológicas descritas na seção 3.2.

Posteriormente, o HUI obtido pelo modelo descrito nessa seção, foi convertido em HU da mesma forma que foi realizado para o HUIN.

3.6.4. Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)

O modelo conceitual de HUI de Clark (HUIC) considera dois processos importantes na transformação da precipitação efetiva em ESD (CLARK, 1945):

- i) atenuação, que contempla a redução das vazões geradas pela P_e em decorrência do armazenamento na bacia hidrográfica; e
- ii) translação, que considera a defasagem de tempo entre a ocorrência de P_e na bacia hidrográfica e sua contribuição com a vazão na seção de controle.

Ramos *et al.* (1989) relatam que o HUIC considera, na bacia hidrográfica, não só o amortecimento devido ao armazenamento em um reservatório linear, como também a translação de volumes de água advindos do impulso unitário. Esta translação seria proporcional à área superficial contribuinte para diversos subtrechos do rio, ocorrendo, na sequência, a passagem pelo reservatório.

A aplicação do HUIC requer a estimativa de dois parâmetros (AHMAD *et al.*, 2009): tempo de concentração da bacia hidrográfica (t_c) e coeficiente de armazenamento (R). Sua formulação matemática é dada por:

$$Q_{i+1} = 2 \cdot C_0 \cdot R_{E(i)} + C_1 \cdot Q_i \quad (29)$$

onde Q é a ordenada do HUIC, i refere-se ao tempo, R_E é a precipitação efetiva uniformemente distribuída, dependente do Histograma Tempo-área (HTA) e de uma constante de conversão de unidades, e C_0 e C_1 são coeficientes de ponderação.

Os coeficientes de ponderação C_0 e C_1 propostos podem ser calculados pelas Equações 30 e 31, respectivamente.

$$C_0 = \frac{0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (30)$$

$$C_1 = \frac{R - 0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (31)$$

onde t é o intervalo de simulação, em horas.

O efeito de atenuação contemplado no HUIC é representado por R . Este coeficiente pode ser obtido derivando-se a curva de recessão do hidrograma no ponto de inflexão, o qual indica que a entrada de ESD no curso d'água é cessada, restando apenas o fluxo contido na calha (RAGHUNATH, 2006).

O processo de translação, além de ser empregado no modelo de HUIC, é amplamente utilizado em modelos conceituais chuva-vazão. A representação do efeito de translação em bacias hidrográficas é comumente dada pelo HTA, que relaciona o tempo de viagem do ESD e o percentual de área da bacia que está contribuindo com a vazão na seção de controle. De acordo com Tucci (2005), o HTA (Figura 23) depende das isócronas da bacia hidrográfica, que são linhas sobre pontos da bacia que têm o mesmo tempo de viagem até a seção de controle.

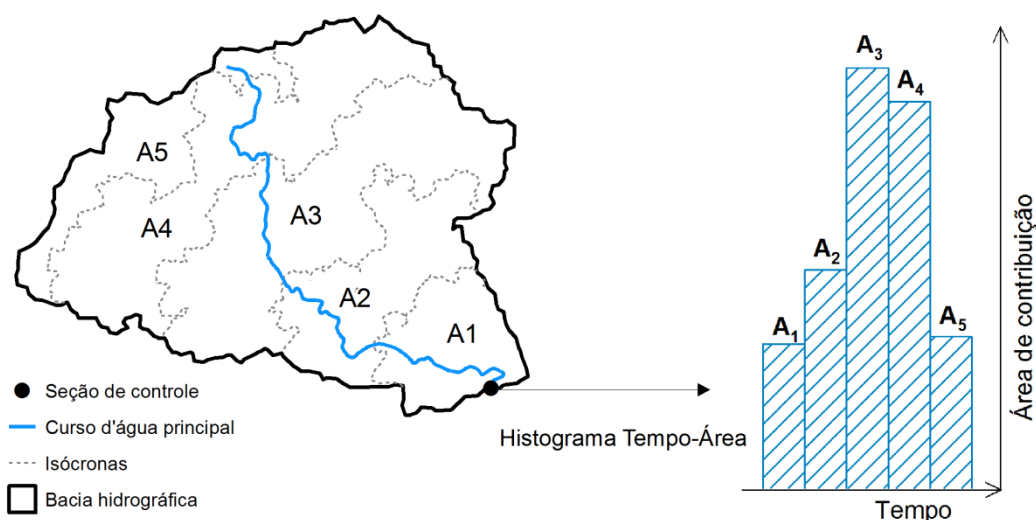


Figura 23 - Representação esquemática do processo de translação do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark

Segundo Tucci (2005), o traçado das isócronas em uma bacia, bem como do HTA correspondente, consistem em processos laboriosos, fazendo com que comumente modelos dependentes destas ferramentas não sejam utilizados ou que o HTA seja substituído, com limitações, por um hidrograma sintético.

Neste estudo, os HTA's para as bacias hidrográficas analisadas foram obtidos através da ferramenta intitulada "Watershed Isochrones", desenvolvida no Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, vinculado ao curso de graduação em Engenharia Hídrica e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Pelotas. Detalhes acerca da ferramenta "Watershed Isochrones" podem ser obtidos em Mahl *et al.* (2014) e em Luz *et al.* (2014).

Visando facilitar a modelagem, as ordenadas do HTA foram trabalhadas no mesmo intervalo de tempo que os dados hidrológicos. Desta forma, no intuito de permitir a calibração, por evento e por bacia, do parâmetro t_c , foram gerados HTA's para o tempo de simulação de 30 minutos, considerando tempos de viagem variando de 30 minutos a 25 horas, para a BHAC, e de 30 minutos a 12 horas, para a BHRJ.

Para cada evento analisado, consideraram-se HTA's, que representavam de forma satisfatória o tempo da vazão de pico do hidrograma de ESD. O parâmetro R , por sua vez, foi estimado, por meio da minimização de uma função objetivo, a qual expressava o erro entre a vazão de ESD observada durante o evento e a vazão de ESD simulada pelo HUIC. Os valores de t_c (derivado do HTA) e de R , para cada evento, foram aqueles que apresentaram menor erro na simulação das vazões, em relação aos dados observados.

3.6.5. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC)

Quando da não existência de monitoramento chuva e vazão na bacia de interesse, o HUI de Clark (1945) também pode ser empregado. Neste caso, são empregadas algumas características fisiográficas da bacia e, comumente, o modelo é denominado de HUI Geomorfológico de Clark (HUIGC).

O modelo HUIC é pautado em dois parâmetros (Equação 29) – t_c e R – e na determinação do HTA da bacia hidrográfica. Para a aplicação do HUIGC neste estudo, t_c foi estimado com base nas equações empíricas de Dodge (Equação 32) e de Ven Te Chow (Equação 33), para a BHAC e BHRJ,

respectivamente, considerando os limiares de aplicabilidade de cada equação recomendados em Mello e Silva (2013):

$$t_c = 21,88 \cdot A^{0,41} \cdot X^{-0,17} \quad (32)$$

onde A é área da bacia hidrográfica, em km^2 , e X é a declividade média da bacia, em m.m^{-1} .

$$t_c = 52,64 \left(\frac{L}{\sqrt{X}} \right)^{0,64} \quad (33)$$

em que L é o comprimento do curso d'água principal, em km , e X é a declividade média da bacia, em m.km^{-1} .

O coeficiente de armazenamento R (horas) foi estimado pela equação recomendada por County (2009):

$$R = \frac{0,435 \cdot t_c^{1,11} \cdot L^{0,8}}{A^{0,57}} \quad (34)$$

em que t_c é o tempo de concentração (horas), L é o comprimento máximo percorrido pelo escoamento na bacia hidrográfica (km) e A é a área da bacia (km^2).

Para cada bacia hidrográfica, foi computado, com o emprego da ferramenta “Watershed Isochrones”, o HTA referente ao t_c estimado com base nas equações acima mencionadas.

Os coeficientes de ponderação C_0 e C_1 foram calculados da mesma forma que para o modelo de HUIC (Equações 30 e 31). No entanto, no caso do HUIGC, R e t_c foram considerados invariáveis com o evento analisado, correspondendo a um valor único para cada bacia hidrográfica.

3.7. Análise de desempenho

Para avaliar se os modelos foram adequados ou não para o propósito deste projeto foi indispensável comparar, para cada evento e para cada modelo

empregado nas duas bacias hidrográficas, o hidrograma estimado de ESD como o observado.

Tendo em vista as principais aplicações do hidrograma de ESD, nesta etapa é importante verificar não unicamente se o formato geral do hidrograma estimado é condizente com o observado, mas também analisar a qualidade da estimativa das vazões de pico e o tempo de pico.

Esta análise comparativa se deu em função do desempenho dos modelos propostos por meio de algumas medidas estatísticas, a saber: coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação entre dados observados e simulados (r) e erro relativo na estimativa da vazão de pico (ER_{Qp}).

O C_{NS} (NASH; SUTCLIFFE, 1970) (Equação 35) traduz a eficiência da aplicação do modelo para estimativas mais acertadas nas cheias, ou seja, quando observam-se vazões bastante elevadas (GUILHON; ROCHA, 2007). Moriasi *et al.* (2007) sugerem a seguinte classificação para esse coeficiente: $C_{NS} > 0,65$, muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 < C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Valores de C_{NS} inferiores a 0,54, foram considerados como ajustes insatisfatórios.

O valor de r (Equação 36), de acordo com Viola (2008), é um indicador da correlação entre os valores observados e estimados, com amplitude de variação de 0 a 1, em que o valor 1 indica um ajuste perfeito.

Segundo Andrade, Mello e Beskow (2013), o ER_{Qp} (Equação 37) diz respeito ao viés das vazões estimadas em relação às observadas. Quanto mais próximo de zero o valor deste coeficiente, melhor o modelo representa a realidade, ou seja, sem tendências nas estimativas e, além disso, serve também como indicativo se o modelo é pobre em representatividade (MORIASI *et al.*, 2007). Van Liew *et al.* (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|ER_{Qp}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$, bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$, satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$, inadequado.

Estas medidas estatísticas são definidas como:

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - Q_{i_{est}})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (35)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{i_{sim}} - \bar{Q}_{est})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{i_{est}} - \bar{Q}_{est})^2}} \quad (36)$$

$$ER_{Q_p} = \frac{|Q_{p_{obs}} - Q_{p_{est}}|}{Q_{p_{obs}}} \cdot 100 \quad (37)$$

onde $Q_{i_{obs}}$ é a vazão observada do HESD no tempo $t=i$, $Q_{i_{est}}$ é a vazão estimado do HESD no tempo $t=i$, $\bar{Q}_{obs}$ é a vazão média observada, $\bar{Q}_{est}$ é a vazão média estimada, N é o número de ordenadas do HESD, $Q_{p_{obs}}$ é a vazão de pico observada e $Q_{p_{est}}$ é a vazão de pico estimada.

4 Resultados e Discussão

4.1. Eventos hidrológicos empregados

Visando contemplar diferentes cenários de resposta hidrológica da BHAC, foram selecionados 12 eventos de precipitação de 18,2 a 100,2 mm, com precipitação acumulada nos últimos 5 dias antecedentes (P_5) bastante variáveis (Tabela 1), de modo que os hidrogramas de escoamento total que apresentassem períodos de ascensão e recessão significativos para análise de cheias. Informações referentes à altura pluviométrica e a P_5 , bem como a vazão total máxima e as datas e horas de início de e fim do hidrograma de cada evento selecionado, podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias para a BHAC, destacando a vazão total (Q_{TOTAL}) máxima, precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes (P_5), intensidade média do evento (i_m), intensidade média máxima de 30 minutos ($i_{m30'}$) e intensidade média máxima de 60 minutos ($i_{m60'}$)

Evento	$Q_{TOTAL} \text{ máx}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	P_{TOTAL} (mm)	P_5 (mm)	i_m ($\text{mm}.\text{h}^{-1}$)	$i_{m30'}$ ($\text{mm}.\text{h}^{-1}$)	$i_{m60'}$ ($\text{mm}.\text{h}^{-1}$)
1	28,8	42,1	124,3	4,4	23,0	14,5
2	17,8	61,9	12,3	3,4	13,4	10,7
3	5,9	38,7	1,2	2,0	8,5	7,0
4	6,9	56,0	16,7	2,3	7,8	6,9
5	45,6	100,2	5,4	2,3	9,4	8,3
6	7,5	41,2	2,6	2,7	11,4	10,9
7	166,5	89,6	77,4	4,2	23,8	19,2
8	50,1	68,6	0,4	15,3	50,9	34,5
9	4,2	23,9	0,1	15,9	27,4	23,5
10	6,3	20,0	20,5	3,6	31,0	19,2
11	7,7	18,2	10,1	4,0	9,3	8,8
12	49,5	54,8	3,6	2,7	25,7	15,0

Os mesmos critérios de seleção dos eventos chuva-vazão ocorridos na BHAC foram empregados para a BHRJ, resultando em 20 eventos. A Tabela 2 permite visualizar as principais características dos eventos selecionados para a BHRJ, os quais apresentavam totais precipitados entre 5 e 99 mm, com diferentes valores de P_5 .

Tabela 2 – Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheias para a BHRJ, destacando a vazão total (Q_{TOTAL}) máxima, precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes (P_5), intensidade média do evento (i_m), intensidade média máxima de 30 minutos ($i_{m30'}$) e intensidade média máxima de 60 minutos ($i_{m60'}$)

Evento	$Q_{TOTAL} \text{ máx}$ ($m^3.s^{-1}$)	P_{TOTAL} (mm)	P_5 (mm)	i_m ($mm.h^{-1}$)	$i_{m30'}$ ($mm.h^{-1}$)	$i_{m60'}$ ($mm.h^{-1}$)
1	2,0	12	38	12,0	20,0	12,0
2	7,9	40	44	8,9	32,0	19,0
3	5,4	5	35	3,3	6,0	4,0
4	1,4	13	37	26,0	26,0	-
5	4,2	27	6	3,4	6,0	6,0
6	7,5	44	15	4,2	24,0	14,0
7	3,9	28	39	6,2	38,0	24,0
8	3,8	25	74	10,0	20,0	17,0
9	19,4	59	83	4,7	64,0	37,0
10	24,7	99	111	19,8	72,0	53,0
11	6,9	10	210	1,8	16,0	8,0
12	13,2	41	14	13,7	44,0	29,0
13	25,9	48	77	19,2	42,0	33,0
14	6,1	61	0	8,1	70,0	43,0
15	12,4	70	39	14,0	44,0	30,0
16	8,7	46	173	3,8	34,0	21,0
17	7,8	37	48	3,9	36,0	24,0
18	14,5	55	63	9,2	38,0	34,0
19	5,0	53	6	9,6	58,0	37,0
20	4,3	26	58	4,7	48,0	24,0

Cabe ressaltar ainda que os hidrogramas selecionados para a BHAC e para a BHRJ, sintetizados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2, apresentaram um único pico, conforme indicado por Raghunath (2006) para modelagem do HU.

4.2. Separação de escoamento e chuva efetiva total

A separação de escoamento, seguindo metodologia descrita na seção 3.4, permitiu que fosse computado o hidrograma de ESD e, por consequência, a P_e de cada evento chuva-vazão analisado. Dentre outras informações, na Tabela 3 pode-se observar a vazão de pico do hidrograma de ESD e a P_e para

cada evento ocorrido na BHAC, enquanto que na Tabela 4 pode-se visualizar tais características para os eventos ocorridos na BHRJ.

Tabela 3 – Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHAC

Evento	Início	Fim	$Q_{ESD} \text{ máx}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	P_E (mm)	Parcela da P_{TOTAL} (%)
1	04/04/2013 17:55	05/04/2013 20:55	27,1	6,0	14,2
2	21/06/2013 09:29	23/05/2013 06:29	16,7	5,0	8,0
3	02/08/2013 09:48	03/08/2013 16:48	4,8	1,7	4,2
4	15/09/2013 05:54	16/09/2013 20:24	5,5	2,0	3,6
5	23/09/2013 03:55	26/09/2013 13:55	43,7	21,4	21,3
6	21/10/2013 03:51	22/10/2013 07:51	5,7	1,8	4,3
7	26/10/2013 06:36	28/10/2013 02:06	162,5	46,7	51,8
8	07/01/2014 21:50	08/01/2014 22:20	48,6	9,6	13,9
9	20/01/2014 16:10	21/01/2014 00:40	2,6	0,4	1,5
10	23/02/2014 17:43	24/02/2014 07:13	5,2	0,9	4,4
11	04/03/2014 07:41	04/03/2014 00:41	4,7	1,1	6,1
12	08/03/2014 17:16	09/04/2014 20:46	46,8	11,0	20,0

Tabela 4 – Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHRJ

Evento	Início	Fim	$Q_{ESD} \text{ máx}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	P_E (mm)	Parcela da P_{TOTAL} (%)
1	02/02/2006 19:46	03/02/2006 07:46	1,4	0,8	6,4
2	12/02/2006 18:46	13/02/2006 10:16	6,5	5,7	14,3
3	01/03/2006 18:59	02/03/2006 08:29	4,7	3,0	59,4
4	02/03/2006 17:59	03/03/2006 02:59	0,7	0,3	2,4
5	06/02/2007 09:55	07/02/2007 05:55	3,0	2,9	10,8
6	01/03/2008 15:40	02/03/2008 11:10	6,6	5,3	11,9
7	12/03/2008 18:41	13/03/2008 08:11	3,0	2,0	7,1
8	08/04/2008 13:17	09/04/2008 02:47	2,8	1,7	6,8
9	06/12/2011 18:51	07/12/2011 11:51	18,2	18,9	32,1
10	28/12/2011 20:48	29/12/2011 12:18	23,3	21,6	21,8
11	29/12/2011 18:48	30/12/2011 08:18	5,0	3,7	37,2
12	16/01/2012 23:16	17/01/2012 14:46	12,0	8,3	20,3
13	29/01/2012 15:18	30/01/2012 05:18	22,9	20,0	41,7
14	22/02/2012 21:44	23/02/2012 15:14	5,5	4,5	7,4
15	08/01/2013 22:37	09/01/2013 17:07	11,7	11,1	15,9
16	15/01/2013 21:07	16/01/2013 13:37	7,00	6,1	13,3
17	27/01/2013 04:21	27/01/2013 21:21	6,3	4,9	13,2
18	02/02/2013 00:54	02/02/2013 17:24	13,1	10,0	18,1
19	26/03/2013 10:21	27/03/2013 14:21	4,5	3,3	6,2
20	27/03/2013 16:21	28/03/2013 02:51	3,2	1,7	6,4

Conforme pode-se observar nas Tabelas 3 e 4, houve uma variação substancial nos valores de P_e , sendo de 0,4 a 46,7 mm para a BHAC e de 0,3 a 21,62 mm para a BHRJ. Esta amplitude de valores de P_e é fundamental para a

modelagem do HU (RAGHUNATH, 2006), visto que pode tornar a análise mais abrangente. Nos estudos de Ghumman *et al.* (2011), Jain e Sinha (2003), Khaleghi *et al.* (2011), Nourani, Singh e Delafrouz (2009), Sarangi *et al.* (2007), Sorman (1995) e Šraj, Dirnbek e Brilly (2010), também foram observados variações de P_e nos eventos de chuva analisados.

4.3. Hietogramas de chuva efetiva

O conhecimento da P_e total de cada evento foi primordial para a caracterização da variabilidade temporal e de intensidade da P_e , permitindo assim estabelecer os hietogramas de chuva efetiva de cada evento, seguindo metodologias apresentadas na seção 3.5.

4.3.1. Índice ϕ

A metodologia do Índice ϕ , o qual foi ajustado para cada evento analisado, considerando ambas as bacias hidrográficas, possibilitou identificar as lâminas de P_e e os intervalos de tempo em que elas ocorreram, podendo os hietogramas de P_e e os respectivos Índices ϕ serem visualizados na Figura 24, para os eventos ocorridos na BHAC e, na Figura 25, para os eventos ocorridos na BHRJ.

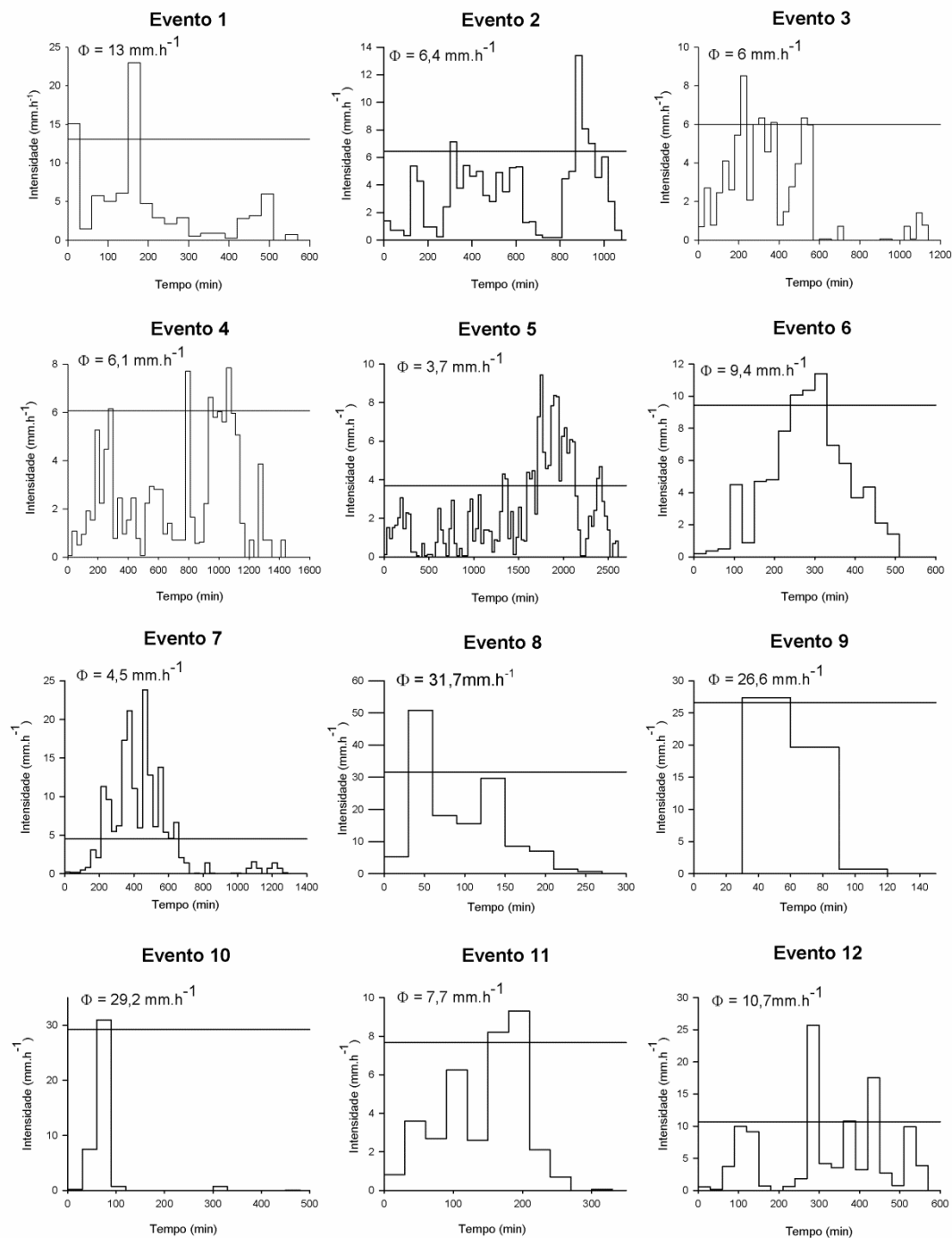


Figura 24 – Hietogramas de precipitação total e o Índice ϕ ajustado para cada evento ocorrido na BHAC

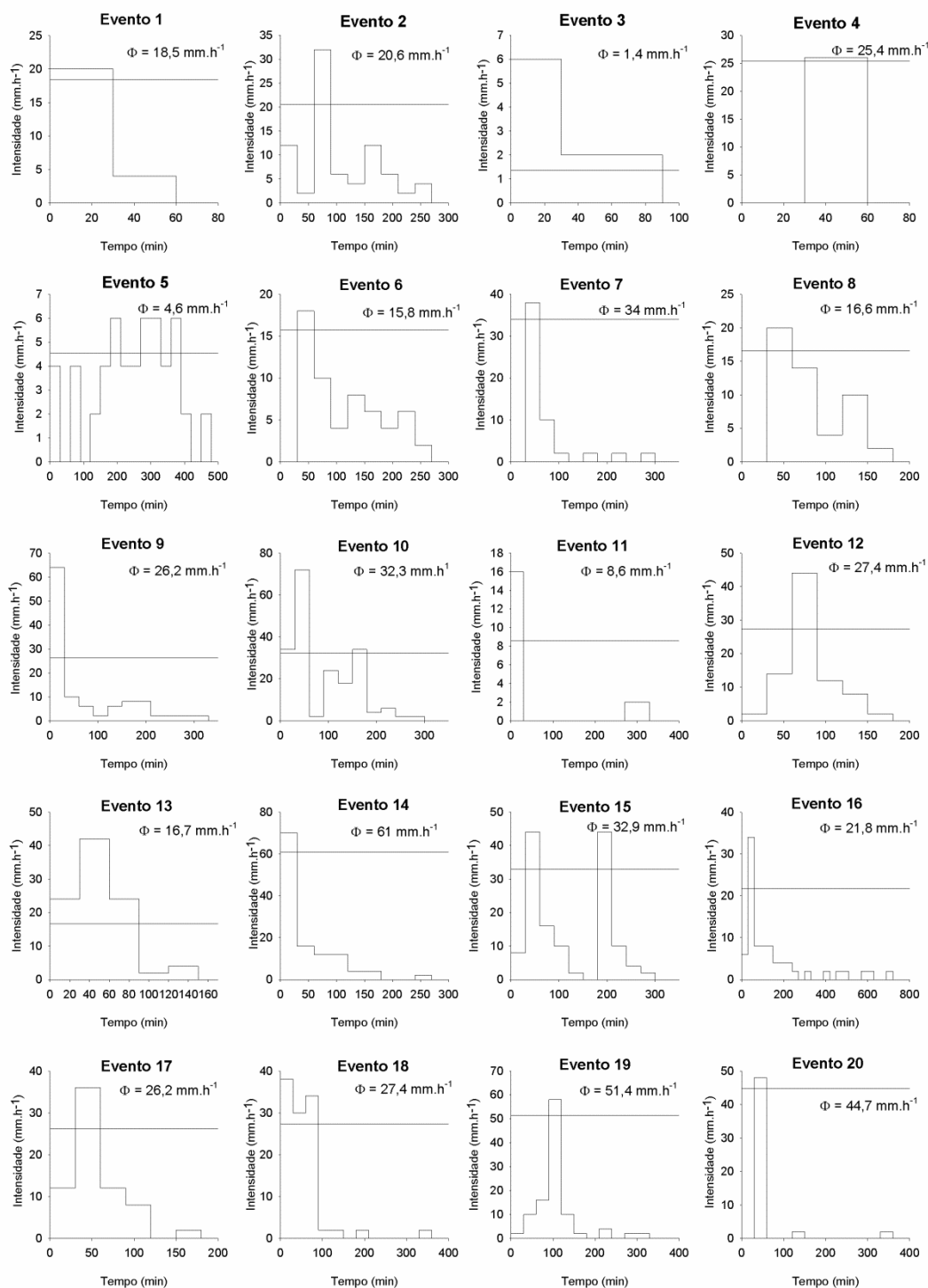


Figura 25 – Hietogramas de precipitação total e o Índice ϕ ajustado para cada evento ocorrido na BHRJ

Analisando os eventos da BHAC (Figura 24), constatou-se que os valores do Índice ϕ variaram entre 3,7 e 31,7 mm.h⁻¹, tendo como média 12,9 mm.h⁻¹. No caso da BHRJ (Figura 25), os valores do Índice ϕ variaram de 1,4 a 61,0 mm.h⁻¹, sendo o valor médio de 25,7 mm.h⁻¹. Os valores para o Índice ϕ foram altamente variáveis com o evento (Figuras 24 e 25). Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2, combinados com os valores de Índice ϕ ilustrados nas Figuras 24 e 25, pôde-se constatar que não houve uma tendência clara de variação do Índice ϕ com a precipitação total, P_5 ou P_e . Este comportamento pode ser parcialmente atribuído à forte influência que a distribuição temporal das intensidades de precipitação exerce sobre o ajuste do Índice ϕ .

É notório que 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. Neste sentido, foi possível observar que a BHRJ apresentou, de modo geral, eventos de precipitação com duração bastante inferior àqueles ocorridos na BHAC, podendo este fato ser atribuído ao tipo de chuva predominante em cada bacia hidrográfica (convectiva na BHRJ e frontal na BHAC). De forma complementar, também foi constatada uma predominância de intensidades máximas de precipitação mais elevadas para a BHRJ, auxiliando na compreensão do porquê a BHRJ apresentou Índice ϕ médio mais elevado que a BHAC. Não foi possível encontrar uma relação forte entre o Índice ϕ com i_m , i_{m30} ou i_{m60} .

Como o Índice ϕ representa a taxa média de infiltração de água no solo na bacia durante o evento de precipitação, o seu valor também é dependente do comportamento do solo frente ao processo de infiltração, o qual exerce impacto sobre a gênese do ESD. Desta forma, quanto maior o valor do Índice ϕ , menor é o potencial de geração de ESD. Neste sentido, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}) pode ser considerada um bom indicador para diferenciar o comportamento de infiltração *versus* ESD nas duas bacias hidrográficas.

Aquino (2014) determinou os valores de K_{SAT} em 100 pontos distribuídos ao longo de uma transeção espacial de 15 km na bacia hidrográfica do Arroio

Pelotas à montante da Ponte Cordeiro de Farias, da qual faz parte a BHAC. Considerando como mais representativa a classe Luvissole-Neossolo, por abranger 81,07% da área da BHAC (Figura 8), foram empregados os valores de K_{SAT} encontrados por Aquino (2014) para a BHAP, nos pontos que compreendem a referida classe de solos, podendo assim atribuir $119,1 \text{ mm.h}^{-1}$ ao valor médio de K_{SAT} . Para a BHRJ, Alvarenga *et al.* (2011) obtiveram valores de K_{SAT} entre 61,25 e $145,83 \text{ mm.h}^{-1}$.

A classe de solo predominante na BHAC (Luvissole-Neossolo, Figura 8) apresenta como características básicas solos rasos e com camadas restritivas à drenagem. Por outro lado, a predominância na BHRJ é de Oxissolos (Figura 12), apresentando solos profundos, com alta porosidade e alta concentração de argila (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013). As características dos solos das duas bacias hidrográficas ajudam a elucidar o porquê a BHRJ tem maior potencial de infiltração de água no solo que a BHAC e, por consequência, uma tendência de maiores valores de Índice Φ .

Embora o método do Índice ϕ possa ser considerado limitado, especialmente em virtude de considerar a taxa de infiltração constante ao longo do evento de chuva, ele tem sido bastante aplicado para estimar a distribuição temporal de P_e por causa de sua simplicidade, como pode ser observado, por exemplo, nos estudos de Ahmad, Ghuman e Ahmad (2009), Ahmad *et al.* (2010), Sarangi *et al.* (2007) e Šraj, Dirnbek e Brilly (2010).

4.3.2. Método do Número da Curva (CN)

O método do CN é fundamentado em dois parâmetros básicos, a saber: CN e λ . Os valores de CN calibrados para cada evento analisado, considerando as condições reais de umidade antecedente do solo, podem ser visualizados na Tabela 5, para as duas áreas de estudo, enquanto λ foi considerado constante e igual a 0,2, conforme metodologia apresentada na seção 3.5.2.

Tabela 5- Valores calibrados do Número da Curva (CN) para obtenção dos hietogramas de precipitação efetiva pelo método do CN

Evento	BHAC	BHRJ	Evento	BHAC	BHRJ
1	75,4	88,6	11	83,4	96,4
2	61,8	76,3	12	74,2	79,5
3	68,1	99,1	13	-	86,4
4	58,6	84,8	14	-	61,5
5	62,1	80,7	15	-	66,1
6	66,7	72,9	16	-	73,0
7	82,4	77,4	17	-	77,1
8	65,0	79,1	18	-	72,9
9	73,9	79,5	19	-	63,4
10	80,6	62,8	20	-	78,1

Considerando um mesmo evento de chuva, quanto maior o valor do CN, maior é o potencial de geração de ESD e, por consequência, menor é a infiltração de água no solo. SCS (1971) recomenda que sejam utilizadas tabelas para o enquadramento de valores característicos de CN em função, basicamente, de características de uso do solo, solo e umidade antecedente do solo da bacia hidrográfica. Os referidos valores tabelados de CN foram estabelecidos para condições fisiográficas específicas norte-americanas a partir de avaliações experimentais; portanto, estes valores podem sofrer variações quando aplicados em outras localidades. Aplicações de valores tabelados de CN para modelagem de cheias podem ser encontradas em estudos como os de Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009), Nguyen, Maathuis e Rientjes (2009) e Šraj, Dirnbek e Brilly (2010). Além disso, os valores de CN também podem variar em função da magnitude, duração e distribuição temporal do evento de chuva analisado.

Conforme pode ser observado na Tabela 5, analisando de forma isolada cada bacia hidrográfica, os valores de CN foram bastante variáveis entre os eventos de chuva. Ao analisar o método CN de maneira similar à deste trabalho em 18 eventos de precipitação na Espanha, Agirre *et al.* (2005) também verificaram a ocorrência de valores bastante variáveis de CN. Os valores calibrados de CN real variaram entre 58,6 e 83,4 para os eventos ocorridos na BHAC, e entre 61,5 e 99,1 para os eventos ocorridos na BHRJ, sendo o valor médio de CN superior para a BHRJ (77,8) quando comparado à BHAC (71,0) (Tabela 5). Apesar do valor médio de CN da BHRJ ter sido

superior ao da BHAC, não pode-se afirmar que a primeira tem maior potencial de geração de ESD que a segunda, visto que, ao comparar as duas bacias, os eventos de chuva diferiram em termos de magnitude, duração e distribuição temporal da precipitação, além de umidade antecedente do solo.

Os resultados acima apresentados sustentam a decisão de não adotar valores tabelados para este parâmetro. Neste mesmo contexto, deve ser destacado o estudo de Beskow *et al.* (2009) que, ao fixar valores tabelados de CN para uma sub-bacia da BHRJ, encontraram dificuldades na calibração de valores de λ e, conseqüentemente, na estimativa de P_e , para quatro eventos de chuva com P_5 na condição AMC III ($P_5 > 52,5$ mm).

De acordo com Mishra *et al.* (2006), uma fragilidade do método CN é o enquadramento da AMC em apenas três categorias (AMC I, II e III), podendo acarretar em dificuldades no emprego deste método para algumas condições de P_5 . Esta constatação é válida, haja vista que os valores de CN são tabelados em função da categoria da AMC, tornando o método pouco sensível às condições reinantes de armazenamento de água no solo quando do início de um evento de chuva. Neste contexto, Mishra *et al.* (2006) recomendam que seja considerado um parâmetro vinculado à umidade antecedente do solo para a estimativa da abstração inicial, tanto em função da P_5 quanto de S . Mello, Lima e Silva (2007) corroboram com Mishra *et al.* (2006), visto que ao avaliarem o método CN, através de modelos estatísticos, constataram a influência da umidade antecedente sobre a I_a , CN e P_e .

Outro parâmetro importante do método CN é o λ . Este parâmetro tem relação direta com as perdas de água que ocorrem anteriormente ao início do ESD, as quais são definidas como abstrações iniciais (I_a). Analisando um mesmo evento de chuva, quanto menor o valor λ , mais rapidamente ocorrerá a transformação da precipitação em P_e .

SCS (1971) sugere que seja utilizado um valor fixo de λ igual a 0,2 e, neste estudo, foi seguida esta recomendação. Mishra *et al.* (2003) destacaram a necessidade de calibrar valores de λ e recomendaram como limites de calibração os valores de 0 e 0,5, ainda que exista possibilidade de λ superar 0,5. A variação nos valores de λ pode ser atribuída a alguns fatores, tais como a diferença nas características meteorológicas, no padrão de precipitação no

local de análise e nas condições de umidade inicial do solo (MISHRA *et al.*, 2003). Tal variação foi constatada nos estudos desenvolvidos por Beskow *et al.* (2009) e Mishra *et al.* (2006).

Ao analisar 18 eventos de chuva com o método CN em uma sub-bacia (4,7 km²) da BHRJ, fixando o valor médio de CN em função da condição de AMC, Beskow *et al.* (2009) verificaram valores de λ variando entre 0,02 e 0,5, com média de 0,224 e mediana de 0,165. Valores de λ entre 0 e 0,21 foram obtidos por Mishra *et al.* (2006) quando da análise de várias pequenas bacias norte-americanas, com áreas de drenagem entre 0,17 e 74 ha.

No método CN, o valor de λ influencia somente na determinação de I_a , enquanto o valor de CN impacta na geração de ESD durante todo o evento. Como os eventos escolhidos para a modelagem, na sua maioria, foram de grande magnitude, espera-se que a calibração do CN e um valor fixo de I_a representem de forma mais adequada a transformação precipitação em P_e .

A calibração do CN implica no ajuste de S , o qual é uma das variáveis do método do CN para a determinação do hietograma de P_e . O objetivo foi encontrar um valor de CN tal que a distribuição temporal de P_e resultasse na P_e total do evento analisado.

Os hietogramas de P_e estimados com base no método do CN, e sobrepostos aos respectivos hietogramas de precipitação total, podem ser visualizados na Figura 26, para a BHAC, e na Figura 27 para a BHRJ.

Uma constatação bastante clara, ao comparar a aplicação do método CN entre a BHAC (Figura 26) e a BHRJ (Figura 27), é que, de modo geral, a geração da P_e na BHAC apresentou maior defasagem de tempo em relação ao início do evento de precipitação. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que os eventos de precipitação ocorridos na BHAC, quando comparados àqueles de magnitudes semelhantes ocorridos na BHRJ, tiveram durações superiores, culminando em menores intensidades máximas da chuva. Tais características acarretam num maior potencial de infiltração de água no solo no início do evento de chuva, em virtude de menores valores de intensidade de precipitação, bem como na necessidade de um intervalo de tempo maior para atender as abstrações iniciais (I_a) e dar início à geração de P_e .

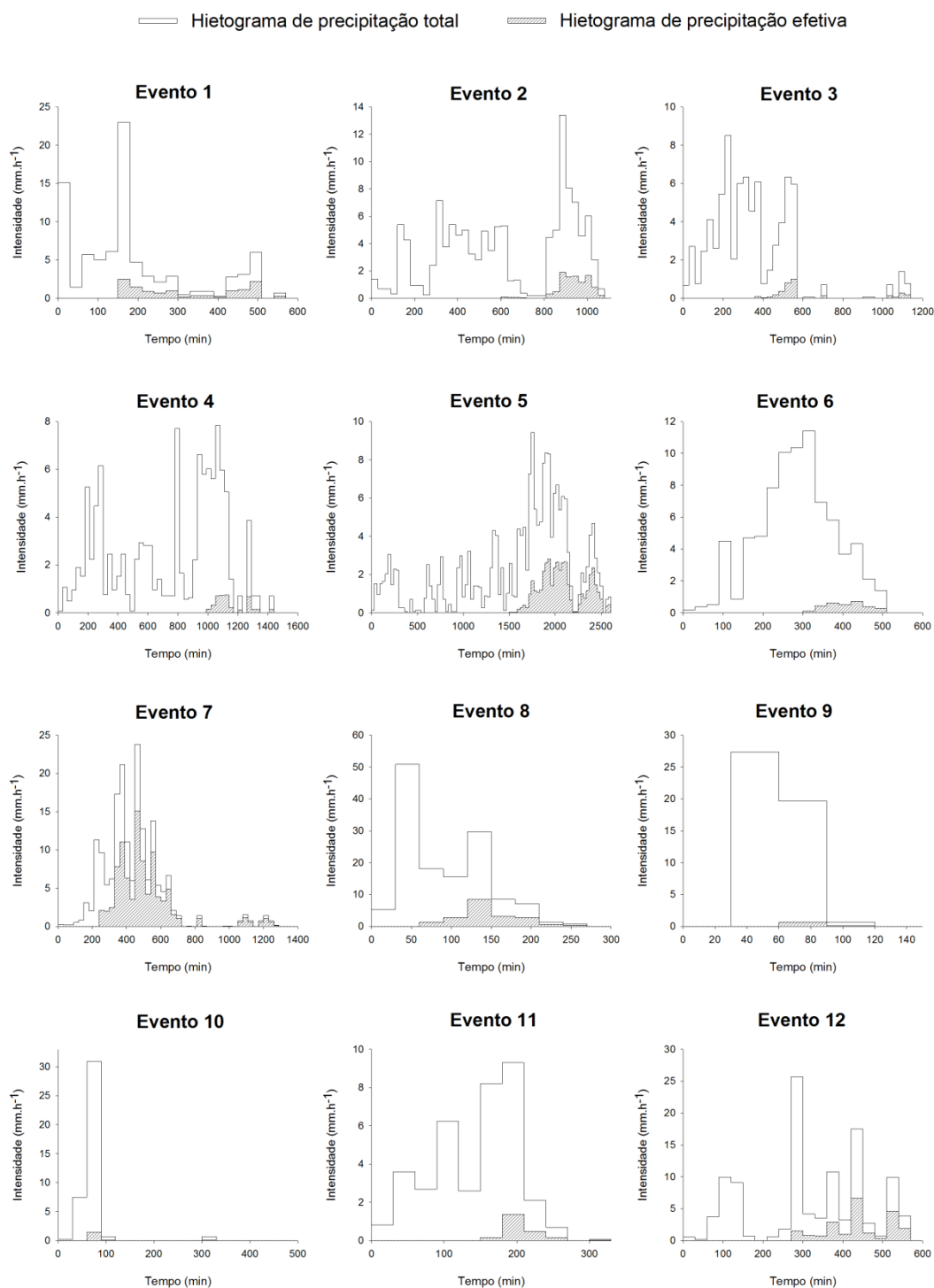


Figura 26 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN, para os eventos analisados na BHAC

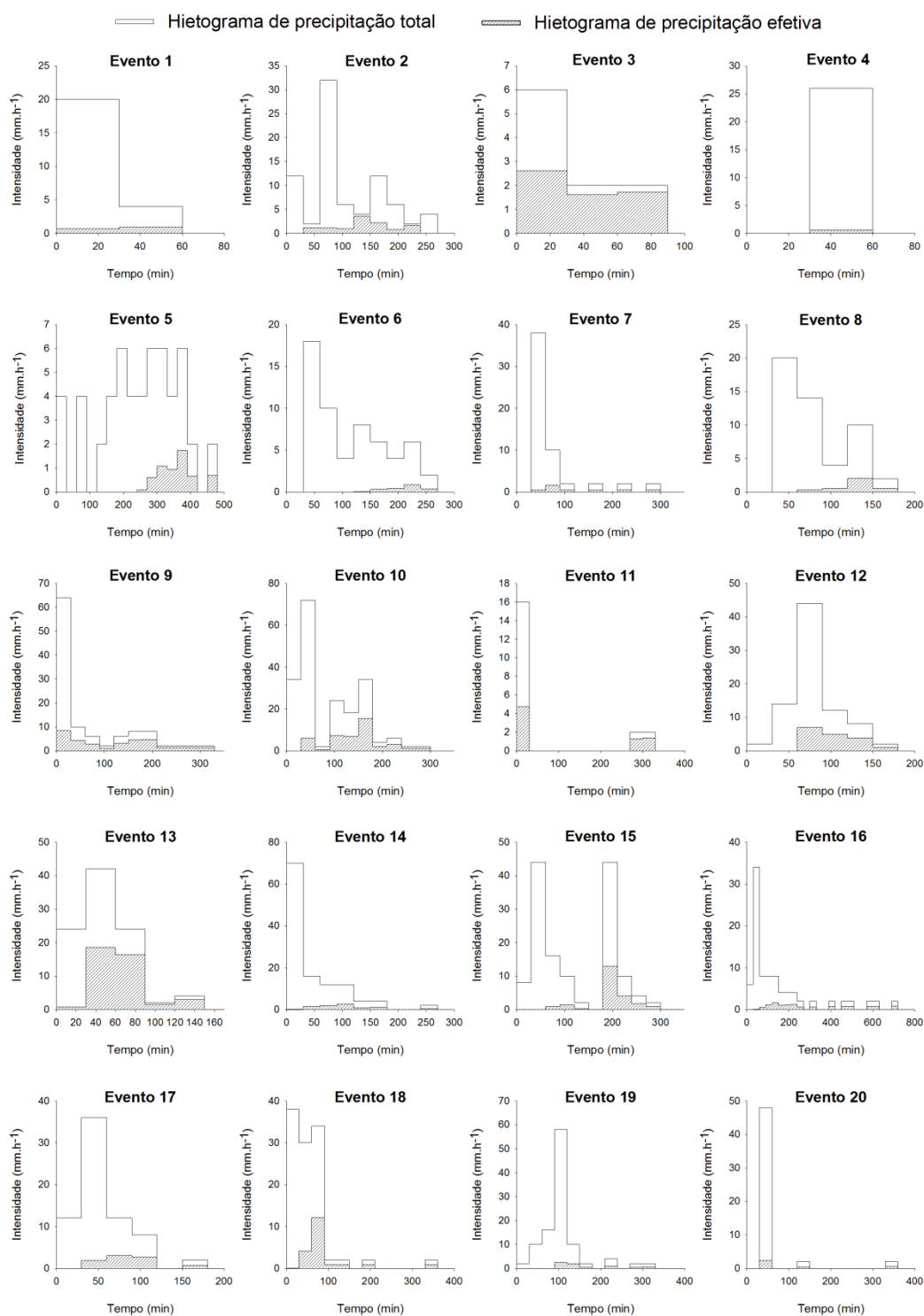


Figura 27 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN, para os eventos analisados na BHRJ

4.3.3. Método do Número da Curva Modificado (CN Modificado)

O método do CN Modificado é fundamentado basicamente nos parâmetros λ e S . Neste estudo, foi conduzida a calibração do parâmetro S , que indica o potencial de armazenamento de água no solo, visto que o referido método não emprega diretamente o valor de CN. Os valores calibrados de S para cada evento analisado, considerando as condições reais de umidade antecedente do solo, podem ser visualizados na Tabela 6, para as duas bacias hidrográficas, enquanto que λ foi considerado constante e igual a 0,2.

Tabela 6 - Valores calibrados do potencial de armazenamento de água no solo (S) (mm) para determinação dos hietogramas de precipitação efetiva pelo método do CN Modificado

Evento	BHAC	BHRJ	Evento	BHAC	BHRJ
1	164,4	59,8	11	53,6	49,9
2	157,1	110,2	12	88,3	69,4
3	119,0	7,9	13	-	71,4
4	179,3	71,9	14	-	159,1
5	155,1	60,9	15	-	150,3
6	126,7	94,7	16	-	200,9
7	80,5	104,6	17	-	110,9
8	136,5	120,7	18	-	137,6
9	89,6	108,9	19	-	205,6
10	75,5	222,0	20	-	116,1

Considerando um mesmo evento de chuva, quanto menor o valor de S , menor é a infiltração de água no solo e, por consequência, maior é o potencial de geração de ESD. Conforme pode ser observado na Tabela 6, analisando de forma isolada cada bacia hidrográfica, os valores de S foram bastante variáveis entre os eventos de chuva. Os valores calibrados de S variaram entre 53,6 e 179,3 mm para os eventos ocorridos na BHAC, e entre 7,9 e 222,0 mm para os eventos ocorridos na BHRJ, sendo o valor médio de S levemente inferior para a BHRJ (111,6) quando comparado à BHAC (118,8 mm) (Tabela 6).

Apesar do valor médio de S da BHRJ ter sido inferior ao da BHAC, não pode-se afirmar que a primeira tem maior potencial de geração de ESD que a segunda, visto que, ao comparar as duas bacias, os eventos de chuva diferiram em termos de magnitude, duração e distribuição temporal da precipitação, além de umidade antecedente do solo. O comportamento hidrológico verificado pelo método CN Modificado é similar àquele pelo método CN, embora os parâmetros de calibração sejam diferentes e as interpretações sejam opostas.

No caso do método CN, o armazenamento de água no solo está relacionado com a P_5 , havendo o enquadramento de condições antecedentes de umidade do solo nas classes AMC I, AMC II e AMC III e, desta forma, podendo ser considerada uma fragilidade do método (MISHRA *et al.*, 2006). Os mesmos autores destacam que este modelo (CN Modificado) está mais próximo da realidade física da geração do ESD em relação ao método CN, visto que considera a umidade antecedente (M) para a estimativa de I_a , sendo M determinado em função da P_5 e de S. Beskow *et al.* (2009) analisaram 18 eventos de chuva-vazão em uma sub-bacia (4,7 km²) da BHRJ e concluíram que o método CN Modificado produziu resultados de P_e mais próximos aos observados, quando comparado ao método CN, sendo possível observar maior discrepância entre os resultados para os eventos enquadrados na condição AMC III.

Outro parâmetro importante do método do CN Modificado é o λ . SCS (1971) sugere que seja utilizado um valor fixo de λ igual a 0,2 e, neste estudo, foi seguida esta recomendação. Mishra *et al.* (2003) ressaltam que é recomendável calibrar valores de λ , indicando que os limites para este parâmetro são 0 e 0,5, ainda que exista possibilidade de λ superar 0,5. A variação nos valores de λ pode ser atribuída a alguns fatores, tais como a diferença nas características meteorológicas, no padrão de precipitação no local de análise e nas condições de umidade inicial do solo (MISHRA *et al.*, 2003). Tal variação foi constatada nos estudos desenvolvidos por Beskow *et al.* (2009) e Mishra *et al.* (2006).

Ao analisar 18 eventos de chuva com o método CN em uma sub-bacia (4,7 km²) da BHRJ, tendo informações para inferir sobre o valor de S para cada evento, Beskow *et al.* (2009) verificaram que os valores de λ variaram entre 0,0001 e 0,5 quando consideram uma profundidade constante de solo, e quando consideram profundidade do solo variável, estes autores encontraram os mesmos limites, contudo com média de 0,063 e mediana de 0,020. Valores de λ entre 0 e 0,21 foram obtidos por Mishra *et al.* (2006) quando da análise de várias pequenas bacias norte-americanas, com áreas de drenagem entre 0,17 e 74 ha.

O método do CN Modificado foi adotado para o desenvolvimento do modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH) (BESKOW, 2009) para compor o módulo de estimativa de P_e . Diversos estudos envolvendo o LASH visaram calibrar o parâmetro λ deste método para a(s) bacia(s) hidrográfica(s) em análise. Mello *et al.* (2008) encontraram valores de λ variando de 0,001 a 0,5 (em várias sub-bacias) para uma sub-bacia de 2.080 km² pertencente à bacia do Rio Grande (região sudeste). Viola *et al.* (2009) definiram valores de λ de 0,01 a 0,2 para a bacia do rio Aiuruoca (2.094 km²), também na região sudeste; e Beskow *et al.*, (2011) obtiveram λ igual a 0,136 para uma bacia de 32 km² no estado de Minas Gerais.

O objetivo, nesta etapa do estudo, foi encontrar um valor de S , possibilitando determinar M e I_a , tal que a distribuição temporal de P_e resultasse da P_e total do evento analisado.

Os hietogramas de P_e estimados com base no método do CN Modificado, e sobrepostos aos respectivos hietogramas de precipitação total, podem ser visualizados na Figura 28, para a BHAC, e na Figura 29 para a BHRJ.

O método do CN Modificado teve comportamento similar ao CN no sentido de que, de modo geral, a geração da P_e na BHAC (Figura 28) apresentou maior defasagem de tempo em relação ao início do evento de precipitação. A explicação para este comportamento é similar à discutida para o método CN na seção 4.3.2.

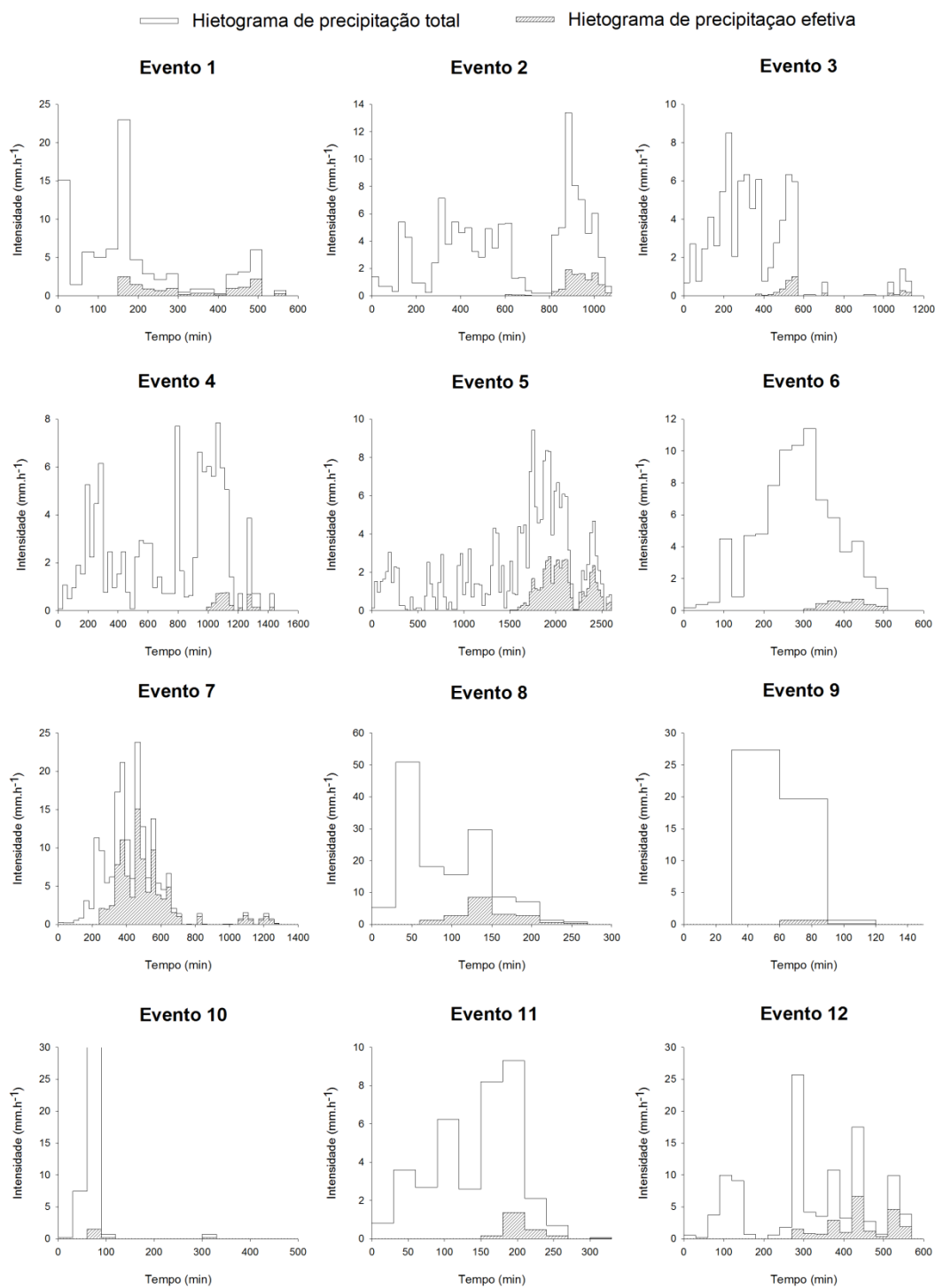


Figura 28 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado, para os eventos analisados na BHAC

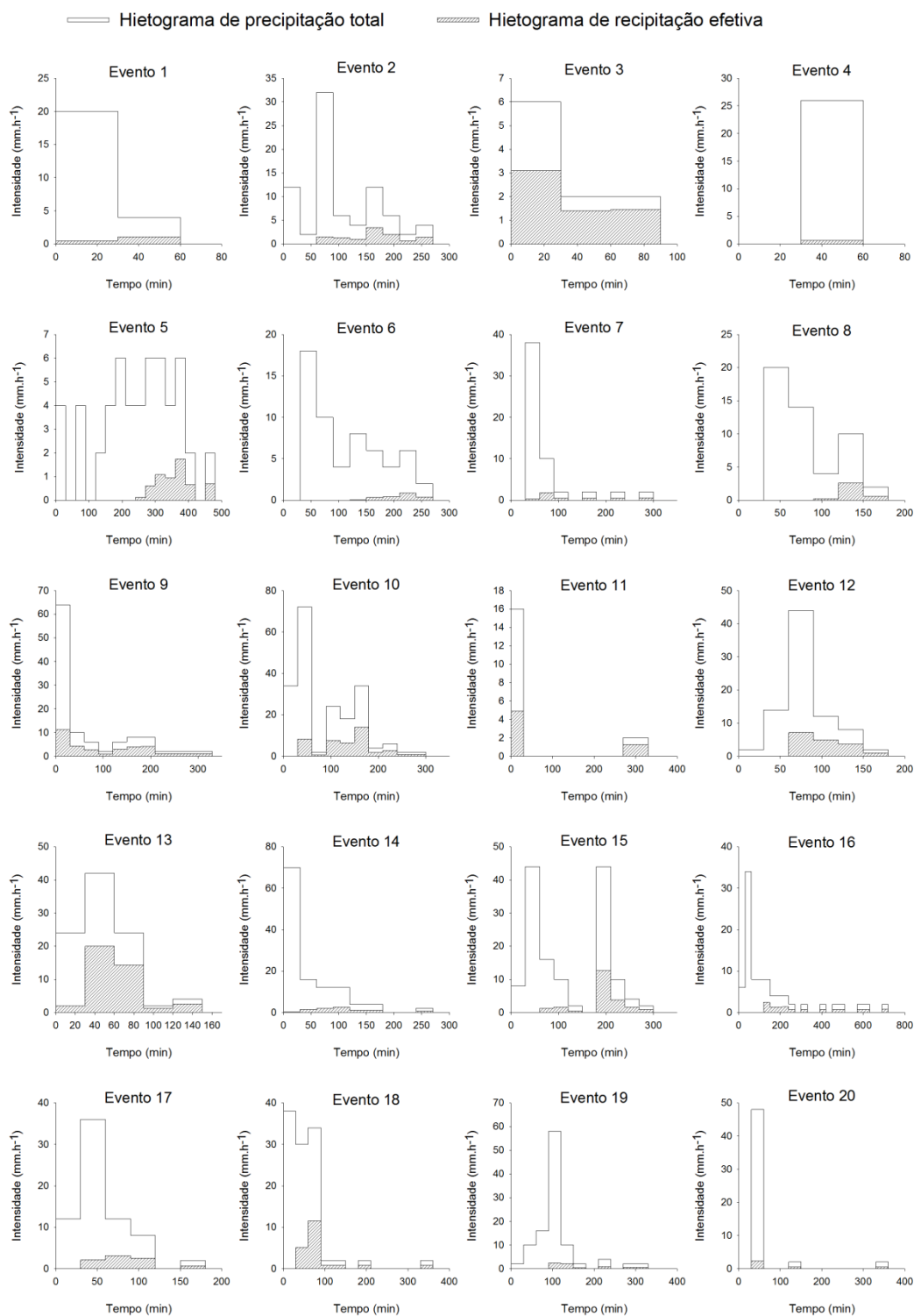


Figura 29 - Hietograma de precipitação total e hietograma de precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado, para os eventos analisados na BHRJ

4.4. Modelagem do Hidrograma Unitário

4.4.1. Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)

Os parâmetros necessários à modelagem do HUT e do HUA podem ser visualizados na Tabela 7, para a BHAC, e na Tabela 8, para a BHRJ. Estes parâmetros foram obtidos de forma singular, para cada evento, em virtude da equação para cálculo do t_{lag} da bacia hidrográfica (Equação 11) apresentar como variável o potencial de armazenamento de água no solo (S). Este último parâmetro é notadamente variável em função de características de solo, uso do solo e umidade antecedente na bacia hidrográfica em análise e, neste estudo, foi estimado pela Equação 9, considerando os valores de CN apresentados na Tabela 5. Os valores de t_{lag} empregados neste estudo consistem no arredondamento dos valores de t_{lag} calculados a partir da Equação 11, visando à obtenção de um parâmetro t_a múltiplo do intervalo de simulação empregado (0,5 horas).

Tabela 7 - Parâmetros dos modelos de HUT e HUA, considerando os eventos ocorridos na BHAC

Evento	t_{lag} calculado(h)	t_{lag} empregado (h)	t_a (h)	q_p (m ³ .s ⁻¹)	t_b (h)*
1	3,6	3,75	4,0	6,3	11,0
2	5,2	5,25	5,5	4,6	15,0
3	4,4	4,75	5,0	5,0	13,5
4	5,6	5,75	6,0	4,2	16,0
5	5,1	5,25	5,5	4,6	15,0
6	4,5	4,75	5,0	5,0	13,5
7	2,9	3,25	3,5	7,2	9,5
8	4,8	4,75	5,0	5,0	13,5
9	3,7	3,75	4,0	6,3	11,0
10	3,1	3,25	3,5	7,2	9,5
11	2,8	3,25	3,5	7,2	9,5
12	3,7	3,75	4,0	6,3	11,0

*Parâmetro necessário apenas na modelagem do HUT

Tabela 8 - Parâmetros dos modelos de HUT e HUA, considerando os eventos ocorridos na BHRJ

Evento	t_{lag} calculado (h)	t_{lag} empregado (h)	t_a (h)	q_p (m ³ .s ⁻¹)	t_b (h)*
1	1,2	1,25	1,5	4,1	4,0
2	1,8	2,25	2,5	2,5	7,0
3	0,7	0,75	1,0	6,1	3,0
4	1,4	1,75	2,0	3,1	5,5
5	1,6	1,75	2,0	3,1	5,5
6	2,0	2,25	2,5	2,5	7,0
7	1,8	1,75	2,0	3,1	5,5
8	1,7	1,75	2,0	3,1	5,5
9	1,6	1,75	2,0	3,1	5,5
10	2,6	2,75	3,0	2,0	8,0
11	0,8	1,25	1,5	4,1	4,0
12	1,6	1,75	2,0	3,1	5,5
13	1,3	1,75	2,0	3,1	5,5
14	2,7	2,75	3,0	2,0	8,0
15	2,4	2,75	3,0	2,0	8,0
16	2,0	2,25	2,5	2,5	7,0
17	1,8	2,25	2,5	2,5	7,0
18	2,0	2,25	2,5	2,5	7,0
19	2,6	2,75	3,0	2,0	8,0
20	1,7	1,75	2,0	3,1	5,5

*Parâmetro necessário apenas na modelagem do HUT

Os modelos HUT e HUA têm sido bastante empregados na área de hidrologia para estimativa de vazões de pico e também de hidrogramas resultantes de eventos extremos de chuva, como pode ser observado nos estudos de Khaleghi *et al.* (2011), Luxon, Christopher e Pius (2013), Majidi *et al.* (2012) e Sule e Alabi (2013). Deve ser ressaltado que os estudos acima mencionados consideram abordagens distintas do HUT e HUA no que se refere à estimativa dos parâmetros, especialmente do t_{lag} .

Sabendo que o t_{lag} representa o tempo de retardo da bacia, sendo comumente considerado como o tempo transcorrido entre o centro de gravidade do hietograma de P_e e a vazão de pico do hidrograma correspondente, e que as características fisiográficas da BHAC e BHRJ são bastante distintas, espera-se que os valores deste parâmetro também sejam diferenciados. Pode-se observar, na Tabela 7 que os valores de t_{lag} obtidos para a BHAC variaram de 2,8 horas a 5,6 horas, sendo em média de 4,1 horas, enquanto que a BHRJ apresentou valores de t_{lag} (Tabela 8) variando entre 0,7 e 2,7 horas, com média de 1,8 horas. Os valores de t_{lag} e q_p são bastante variáveis quando analisados por evento de chuva x vazão visto que o HUT e HUA, de acordo com a formulação usada neste estudo, dependem de CN e S.

Esta variação também tem sido encontrada em outros estudos, como o de Khaleghi *et al.* (2011), os quais avaliaram os dois métodos para 21 eventos na bacia hidrográfica Kasilian, no Irã, e obtiveram t_{lag} entre 2,6 e 7,4h.

Considerando que os valores de t_{lag} foram obtidos para cada evento de acordo com a Equação 13, pode-se atribuir esta diferença significativa de valores entre as duas bacias especialmente à diferença de comprimentos de curso d'água principal. O t_{lag} é diretamente proporcional ao comprimento do curso d'água principal, o qual é substancialmente maior para a BHAC (23,7 km) quando comparado à BHRJ (10,6 km). Tal parâmetro também é diretamente proporcional ao S e, por consequência, inversamente proporcional ao CN, que reflete as características de solo, uso do solo e de umidade antecedente da bacia hidrográfica. Neste estudo, foi constatada uma grande variação dos valores de CN entre os eventos para uma mesma bacia, entretanto, em média, os valores de CN da BHAC foram próximos aos da BHRJ. Assim, este parâmetro por si só não serviria de justificativa de uma bacia ter t_{lag} maior ou menor que a outra.

O parâmetro q_p , que corresponde à máxima vazão unitária do HU e, neste estudo, foi determinada para um valor de P_u de 1 mm, variou entre 4,2 e 7,2 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, quando foram analisados os eventos ocorridos na BHAC; para BHRJ, este parâmetro variou de 2,0 a 6,1 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Este parâmetro teve variação entre as bacias principalmente em virtude da diferença de áreas de drenagem (BHAC – 121,3 km^2 e BHRJ – 29,5 km^2) e t_{lag} das bacias. O t_b , por sua vez, variou de 9,5 a 16h, quando da modelagem do HUT para a BHAC, e de 3 a 8h, quando da modelagem do HUT para a BHRJ.

A análise de desempenho do HUT e do HUA para a BHAC e para a BHRJ, para cada evento analisado, empregando medidas estatísticas apropriadas e considerando os métodos Índice ϕ , CN e CN Modificado para determinação de P_e , serão abordados na seção 4.5.

4.4.2. Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)

Considerando que a distribuição temporal das P_e 's exerce influência sobre a estimativa dos parâmetros k e n do modelo de HUI de Nash, como se pode verificar nas Equações 18 a 21, as Tabelas 9 e 10 permitem visualizar os

valores dos referidos parâmetros com base nas precipitações efetivas estimadas pelas 3 metodologias empregadas neste estudo, para cada evento ocorrido na BHAC e BHRJ, respectivamente.

Tabela 9 - Parâmetros do HUIN ajustados para a BHAC a partir das 3 metodologias de determinação de P_e

Evento	Índice Φ		CN		CN Modificado	
	k (h)	n	k (h)	N	k (h)	n
1	3,22	2,2	4,08	1,1	4,08	1,1
2	3,82	2,1	3,51	2,9	3,69	2,6
3	2,07	6,2	1,74	5,1	1,74	5,1
4	2,67	3,9	1,95	8,3	1,95	8,3
5	4,18	6,3	3,97	6,5	3,97	6,5
6	2,00	5,4	1,47	6,0	1,47	6,0
7	4,69	1,8	4,67	1,5	4,45	1,6
8	1,98	4,3	2,41	2,8	2,41	2,8
9	0,97	4,7	0,98	4,6	0,98	4,6
10	1,09	5,0	0,89	5,7	0,89	5,7
11	1,67	3,8	1,74	3,5	1,74	3,5
12	2,07	4,2	2,23	3,0	2,23	3,0

Tabela 10 - Parâmetros do HUIN ajustados para a BHRJ a partir das 3 metodologias de determinação de P_e

Evento	Índice Φ		CN		CN Modificado	
	k (h)	n	k (h)	N	k (h)	n
1	1,21	3,5	1,28	3,1	1,31	3,0
2	1,39	4,6	1,68	2,8	1,65	2,9
3	0,84	7,0	0,86	6,4	0,86	6,6
4	0,98	3,3	0,98	3,3	0,98	3,3
5	1,28	5,9	1,36	5,4	1,36	5,4
6	1,14	4,2	1,60	3,2	1,77	2,8
7	1,57	2,9	1,72	1,8	1,75	1,7
8	1,11	4,8	1,30	3,4	1,23	3,9
9	1,52	4,3	*	*	*	*
10	1,46	3,7	1,86	2,1	1,78	2,2
11	1,54	3,3	0,78	4,4	0,81	4,4
12	1,53	3,0	1,65	2,5	1,65	2,6
13	1,49	3,2	1,59	2,8	1,57	2,8
14	1,82	3,2	2,06	1,9	2,06	1,9
15	1,54	3,9	1,97	2,7	1,93	3,0
16	1,99	2,8	0,26	4,1	0,57	4,2
17	1,50	3,9	0,44	9,2	0,55	7,8
18	1,88	2,5	2,35	1,4	2,04	1,9
19	1,57	3,8	1,61	3,1	1,62	3,1
20	0,90	4,2	*	*	*	*

* Não ajustado

Pode-se observar nas Tabelas 9 e 10 que o número de reservatórios lineares (n) do modelo de HUI de Nash é bastante sensível à metodologia de estimativa da P_e . A título de exemplificação, considerando o Evento 1 da BHAC (Tabela 9), o valor de n estimado a partir da separação da P_e pelo Índice ϕ foi 98% maior que aquele estimado pela metodologia do CN. Os valores do

parâmetro k também foram variáveis para um mesmo evento chuva-vazão analisado.

O parâmetro n do HUIN diz respeito ao número de reservatórios lineares atenuando o pico do HUI e tem relação com a forma do mesmo, enquanto o parâmetro k é o coeficiente de armazenamento, considerado igual para todos os reservatórios lineares, representando um fator de escala do HUI. Considerando os eventos de chuva que foi possível calibrar valores dos parâmetros do HUIN e os três métodos de determinação de P_e , pôde-se observar que a BHAC apresentou valor médio de n igual a 4,2 e de k igual a 2,5h, enquanto a BHRJ teve valor médio de n de 3,7 e de k igual a 1,41h. Os resultados variáveis de n e k para os eventos analisados neste estudo da BHAC e da BHRJ corroboram com diversos outros estudos, conforme resumido na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados encontrados para os parâmetros n e k do HUIN em estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas

Área da bacia (km ²)	Local	Número de eventos analisados	Variação de n	Variação de k (h)	Fonte
824,7	Índia	7	1,34-7,62	0,70-3,48	Kumar <i>et al.</i> (2002)
67,5	Irã	13	1,76-4,66	1,34-3,17	Adib <i>et al.</i> (2010)
615	Índia	12	2,82-7,49	2,12-4,58	Bhaskar; Parida; Nayak (1997)
4,7	Espanha	18	0,97-4,74	0,28-2,36	Agirre <i>et al.</i> (2005)
37,2	Irã	6	1,78-4,79	0,83-1,42	Nourani; Singh; Delafrouz (2009)
2881,7	Índia	15	1,75-5,46	1,37-4,72	Sahoo <i>et al.</i> (2006)

Os resultados acerca da média de n das duas bacias deste estudo estão de acordo com Ghumman *et al.* (2011), os quais relatam que n é diretamente proporcional à área da bacia hidrográfica. De forma complementar, o parâmetro n pode, segundo Bhaskar, Parida e Nayak (1997), ser interpretado como uma medida do armazenamento da bacia de modo que quanto menor o seu valor, maior é o pico de vazão visto que há menos armazenamento para atenuar a vazão de pico. Desta forma, a BHRJ tem uma maior tendência a vazões de pico.

Os valores de k obtidos para as duas bacias evidenciam superioridade para a BHAC em relação à BHRJ. Considerando que k reflete a dinâmica do processo de transformação chuva-vazão na bacia hidrográfica e que um menor

valor deste parâmetro indica um tempo inferior de pico do HUI (BHASKAR; PARIDA; NAYAK, 1997), a BHRJ tende a apresentar tempo de pico menor do que a BHAC. A discrepância dos valores de k obtidos para as duas bacias pode ser atribuída especialmente à grande diferença de área entre elas.

A análise de desempenho do HUIN para a BHAC e para a BHRJ para cada evento analisado, empregando medidas estatísticas apropriadas e considerando os métodos Índice ϕ , CN e CN Modificado para determinação de P_e , serão abordados na seção 4.5.

4.4.3. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUING)

Para modelar o HUI Geomorfológico de Nash, conforme descrito na seção 3.6.3., foi necessário derivar do relevo informações referentes à rede de drenagem, para assim, estimar as relações geomorfológicas necessárias. A rede de drenagem da BHAC, que foi derivada numericamente a partir do MDEHC, pode ser visualizada na Figura 30 e na Figura 31, sendo que na primeira é dada ênfase à ordem dos cursos d'água que a compõem, e na segunda, pode-se visualizar as áreas de drenagem classificadas quanto à ordem desses cursos d'água. No caso da BHRJ, o MDEHC (BESKOW, 2009) também permitiu derivar a rede de drenagem numericamente, estando a ordem dos cursos d'água e as áreas de drenagem classificadas quanto a esta ordem apresentadas nas Figura 32 e Figura 33, respectivamente.

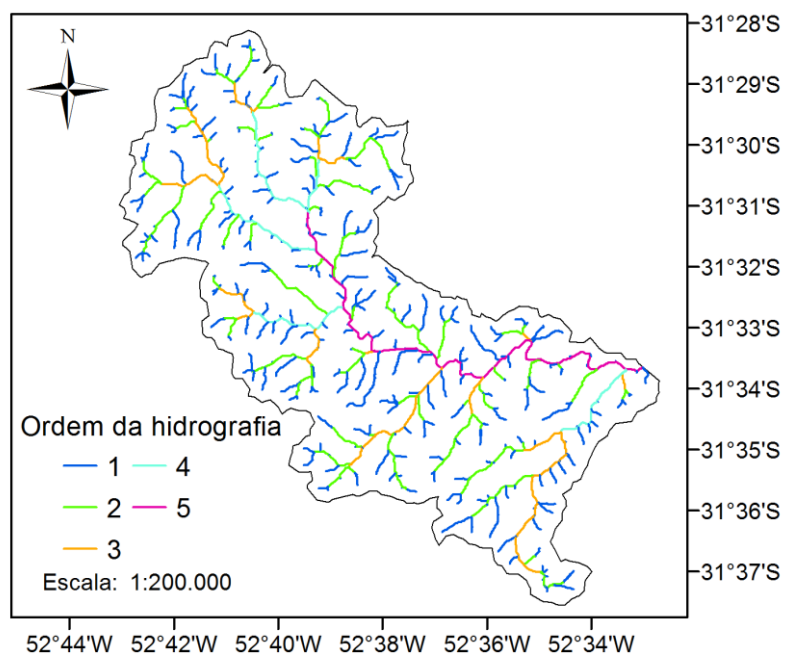


Figura 30 - Rede hidrográfica da BHAC classificada de acordo com a ordem dos cursos d'água

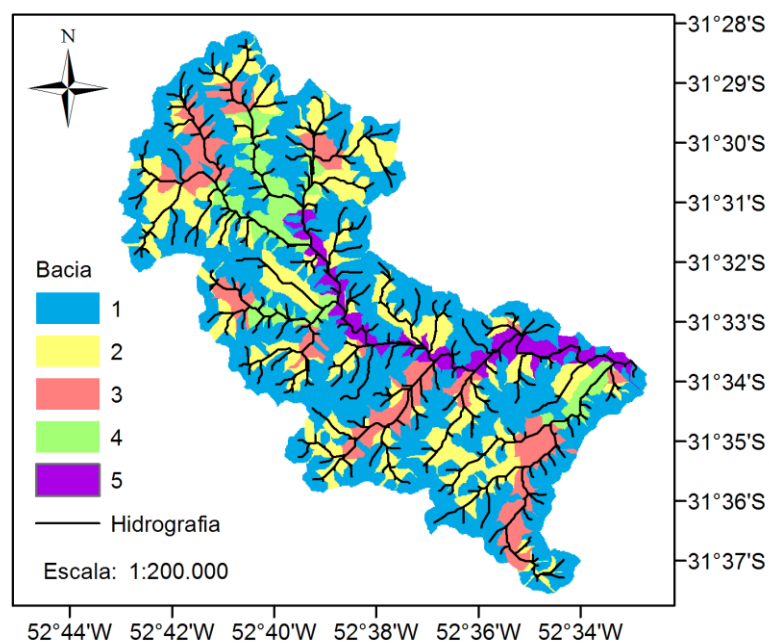


Figura 31 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHAC

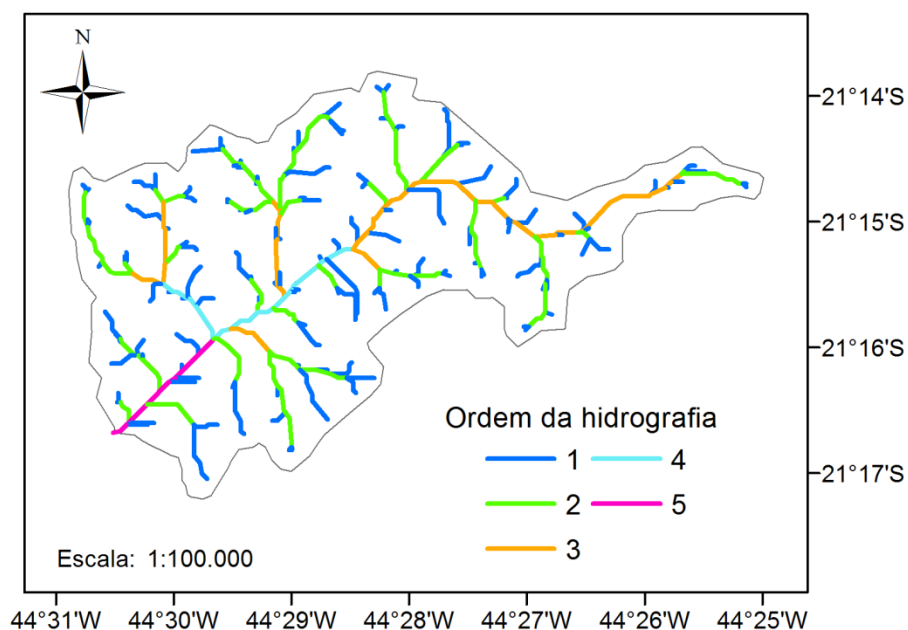


Figura 32 - Rede hidrográfica da BHRJ classificada de acordo com a ordem dos cursos d'água

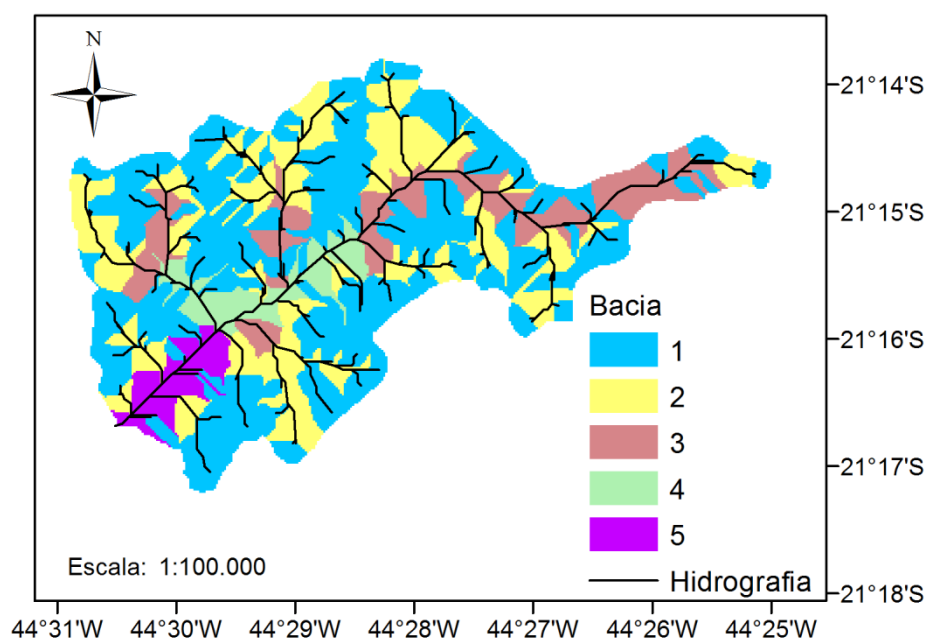


Figura 33 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHRJ

Segundo Strahler (1952), os cursos d'água de ordem 1, são aqueles que não possuem afluentes, enquanto que os cursos d'água de ordem n são formados a partir da confluência de 2 cursos d'água de ordem $n-1$. Os parâmetros relacionados à rede de drenagem, visando à estimativa das razões de comprimento (R_L) e de bifurcação (R_B) de Horton (1945) e da razão entre áreas das bacias (R_A), proposta por Schumm (1956), bem como o valor médio

dessas variáveis para a BHAC e para a BHRJ, podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 - Caracterização da rede de drenagem da BHAC e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)

Ordem	Número de segmentos	Comprimento total (km)	Área total (km ²)	R_L média	R_B média	R_A média
1	262	105,8	67,4	2,9	4,1	4,8
2	63	63,3	94,5			
3	16	26,6	107,4			
4	5	17,4	115,0			
5	1	18,2	121,2			

Tabela 13 - Caracterização da rede de drenagem da BHRJ e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)

Ordem	Número de segmentos	Comprimento total (km)	Área total (km ²)	R_L média	R_B média	R_A média
1	133	30,7	15,1	1,9	3,6	4,5
2	29	22,0	23,0			
3	6	10,4	26,8			
4	2	3,8	28,4			
5	1	2,0	29,5			

Com base nas campanhas hidrológicas realizadas na seção de controle da BHAC e na seção de controle da BHRJ, foi possível estabelecer funções relacionando a vazão com a velocidade média (v) para a BHAC e a BHRJ (Figura 34).

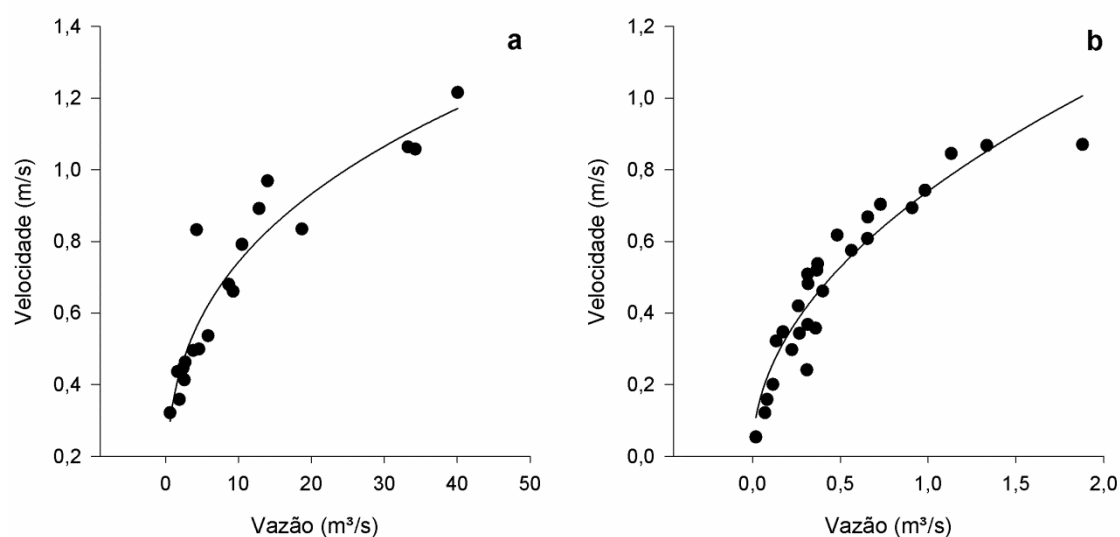


Figura 34 - Curva ajustada, relacionando dados de velocidade e vazão obtidos em campanhas hidrológicas na BHAC (a) e na BHRJ (b)

Para cada evento, a função (Figura 34) permitiu estimar, com base na vazão máxima de ESD observada, o parâmetro v e, por consequência, o parâmetro k , que podem ser visualizados, para ambas as bacias, na Tabela 14.

Tabela 14- Velocidade empregada, para cada evento analisado, para a obtenção do parâmetro k do modelo de HUING e seu respectivo valor, para a BHAC e para a BHRJ

Evento	BHAC		BHRJ	
	Velocidade (m.s^{-1})	k (h)	Velocidade (m.s^{-1})	k (h)
1	1,0	2,27	0,8	0,40
2	0,9	2,67	1,1	0,29
3	0,6	4,05	1,1	0,30
4	0,6	3,86	0,6	0,51
5	1,2	1,94	1,0	0,34
6	0,6	3,81	1,1	0,28
7	1,8	1,25	1,0	0,33
8	1,2	1,87	0,9	0,34
9	0,5	4,93	1,3	0,24
10	0,6	3,93	1,4	0,23
11	0,6	4,07	1,1	0,30
12	1,2	1,89	1,3	0,26
13	-	-	1,4	0,23
14	-	-	1,1	0,30
15	-	-	1,2	0,26
16	-	-	1,1	0,28
17	-	-	1,1	0,29
18	-	-	1,3	0,26
19	-	-	1,0	0,31
20	-	-	1,0	0,33

O critério utilizado neste estudo para a determinação de v foi sugerido por Zelazinski (1986) e empregado em diversos estudos científicos nesta temática, tais como nos de Ghumman *et al.* (2011) e Ghumman *et al.* (2014). O procedimento adotado neste estudo em conjunto com os resultados obtidos corroboram com a indicação de Kumar *et al.* (2002), os quais destacam que o parâmetro v deve ser avaliado para cada evento. Considerando a função potencial relacionando vazão e velocidade média (Figura 34), pôde-se constatar que o expoente da função para a BHRJ foi substancialmente superior ao obtido para a BHAC, indicando, de acordo com discussão apresentada por Ghumman *et al.* (2011), que a BHRJ tem maior aumento na velocidade média

correspondente à vazão. Estes resultados fazem sentido dada a diferença de comportamento hidrológico entre as duas bacias no tocante ao ESD.

Neste estudo do HUING, o valor médio de k foi de 3,05h (variando entre 1,25 e 4,93h) para a BHAC e de 0,30h para a BHRJ, variando entre 0,23 e 0,51h. O comportamento do parâmetro k do HUING para as duas bacias foi similar ao encontrado para o HUIN (seção 4.4.2), indicando, de acordo com Bhaskar, Parida e Nayak (1997), que a BHAC tende a apresentar tempo de pico maior do que a BHRJ. A diferença de valores entre as bacias pode ser explicada pela diferença de área entre elas e de tempo de concentração. Cabe destacar a diferença de valor médio de k obtido entre os métodos HUING e HUIN (BHAC, $k = 2,5h$; BHRJ, $k = 1,41h$), especialmente no caso da BHRJ. Esta discussão será abordada na seção 4.5.

Já o parâmetro n foi adotado como constante para todos os eventos analisados, correspondendo a 3,1 reservatórios lineares para a BHAC e 2,9 para a BHRJ. A diferença de valores de n entre as duas bacias corrobora com as conclusões de Ghumman *et al.* (2011) no sentido de que n aumenta com a área da bacia hidrográfica. Seguindo a interpretação de n dada por Bhaskar, Parida e Nayak (1997) de que este parâmetro representa o armazenamento da bacia e que quanto menor o seu valor, maior é o pico de vazão haja vista que ocorre menos armazenamento para atenuar a vazão de pico, a BHRJ tem uma maior tendência a vazões de pico.

Bhaskar, Parida e Nayak (1997) empregaram metodologia semelhante a deste trabalho para modelagem de cheias com o HUING usando 12 eventos em uma bacia situada na Índia, no sentido de usar um valor fixo de n e determinar o k de cada evento a partir do parâmetro v . No entanto, fizeram uso de duas formulações para determinação de v : na primeira abordagem, o valor de v foi computado a partir da intensidade de P_e em cada intervalo, enquanto na segunda, v foi determinado a partir da intensidade média de P_e durante todo o evento. Os autores obtiveram um valor de n igual a 2,83 para ambas as abordagens e valores de k variando entre 2,08 e 11,68h na primeira abordagem e de 2,53 a 3,90h na segunda.

O HUING também foi analisado por Adib *et al.* (2010), de modo semelhante aos procedimentos usados no presente estudo, para 13 eventos

em uma bacia de 67,5 km² no Irã. Os autores obtiveram um valor de n igual a 2,83, enquanto que k variou entre 1,28 e 3,40h.

Sahoo *et al.* (2006) analisaram o HUING para uma bacia de 2.881,65 km² na Índia através de 15 eventos chuva-vazão. Os autores derivaram as variáveis geomorfológicas para HUING a partir de mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, obtendo valores de n de 3,74 para o primeiro caso e de 3,76 para o segundo. O parâmetro k foi analisado da mesma forma, variando de 1,46 a 2,72h para a escala mais detalhada e entre 1,57 e 2,93h para a escala menos detalhada.

A análise de desempenho do HUING para a BHAC e para a BHRJ para cada evento analisado, empregando medidas estatísticas apropriadas e considerando os métodos Índice ϕ , CN e CN Modificado para determinação de P_e , serão abordados na seção 4.5.

4.4.4. Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)

As Figuras 35 e 36 permitem visualizar os HTA's obtidos através do uso da ferramenta *Watershed Isochrones* para a BHAC e para a BHRJ, respectivamente, os quais foram empregados no ajuste do modelo de HUIC. Nestas figuras são apresentados, em 3 dimensões, os histogramas que representam, para um dado tempo de concentração da bacia, a variação da área que contribui com o ESD na seção de controle ao decorrer do seu tempo de viagem, sendo este variável de 0 h ao tempo de concentração.

Dada à diferença no comportamento hidrológico no tocante a cheias observado a partir dos dados de monitoramento, empregaram-se para a BHAC HTA's entre os tempos de concentração de 2 a 24,5 horas, enquanto que para a BHRJ, este variaram de 1 a 10 horas.

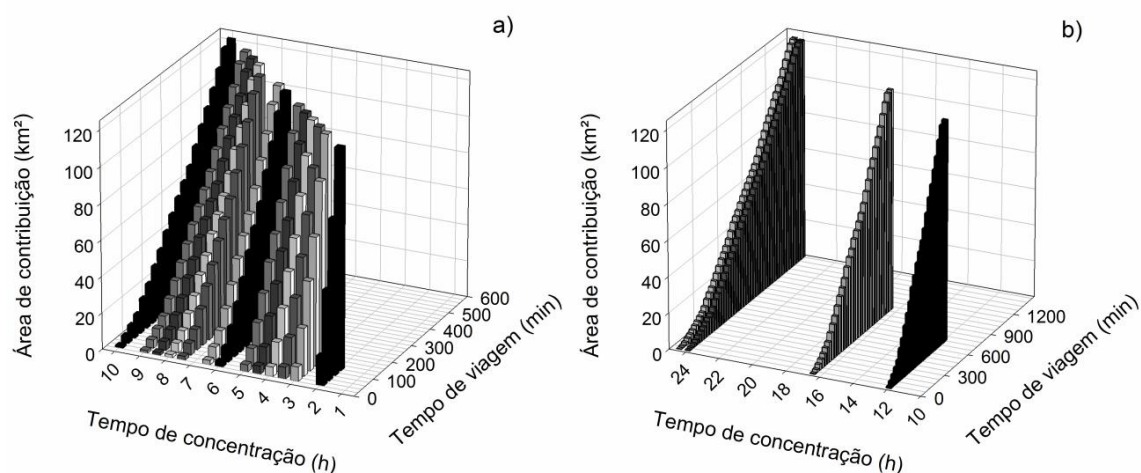


Figura 35 - Histogramas Tempo-Área (HTA) para a BHAC, considerando o tempo de concentração variando de 2 a 10 horas (a) e de 10,5 a 24,5 horas (b)

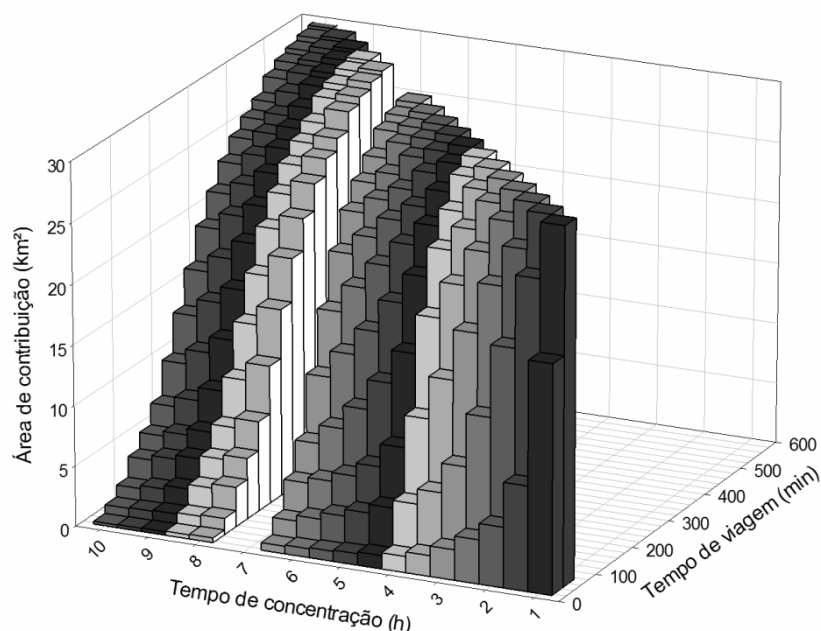


Figura 36 - Histogramas Tempo-Área (HTA) para a BHRJ, para um tempo de concentração variando de 1 a 10 horas

Os valores de tempo de concentração da bacia (t_c) ajustados para cada evento analisado podem ser visualizados na Tabela 15, para a BHAC, e na Tabela 16, para a BHRJ, e fazem referência ao HTA empregado para ajuste do modelo de HUIC. Os valores ajustados para o coeficiente de armazenamento R que contempla o efeito de atenuação da onda de cheia na bacia hidrográfica, também podem ser visualizados nas referidas tabelas, assim como os coeficientes de ponderação C_0 e C_1 calculados com base nestes pelas Equações 30 e 31.

Tabela 15 - Parâmetros do HUIC ajustados para cada evento analisado na BHAC, considerando as três metodologias de estimativa da P_e

Evento	Índice Φ				CN				CN Modificado			
	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1	t_c (h)	R(h)	C_0	C_1	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1
1	3,00	5,17	0,05	0,91	2,00	2,99	0,08	0,85	2,00	2,93	0,08	0,84
2	3,00	7,37	0,03	0,93	7,00	6,60	0,04	0,93	7,00	6,59	0,04	0,93
3	12,00	6,57	0,04	0,93	9,00	4,39	0,05	0,89	9,00	4,39	0,05	0,89
4	8,00	6,40	0,04	0,92	16,50	7,01	0,03	0,93	16,50	7,00	0,03	0,93
5	24,00	10,55	0,02	0,95	24,50	9,20	0,03	0,95	24,50	9,20	0,03	0,95
6	10,00	5,85	0,04	0,92	8,50	5,16	0,05	0,91	8,50	5,15	0,05	0,91
7	4,00	5,33	0,04	0,91	3,50	4,44	0,05	0,89	3,50	4,70	0,05	0,90
8	6,50	4,68	0,05	0,90	4,50	4,38	0,05	0,89	4,50	4,38	0,05	0,89
9	4,50	2,40	0,09	0,81	4,50	2,35	0,10	0,81	4,50	2,35	0,10	0,81
10	6,00	2,26	0,10	0,80	4,00	7,38	0,03	0,93	4,00	7,44	0,03	0,93
11	5,00	4,67	0,05	0,90	4,50	5,04	0,05	0,91	4,50	5,05	0,05	0,91
12	7,00	4,64	0,05	0,90	3,00	8,72	0,03	0,94	3,00	8,72	0,03	0,94

Tabela 16 - Parâmetros do HUIC ajustados para cada evento analisado na BHRJ, considerando as três metodologias de estimativa da P_e

Evento	Índice Φ				CN				CN Modificado			
	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1
1	4,50	2,47	0,09	0,82	3,50	2,83	0,08	0,84	3,50	2,75	0,08	0,83
2	8,00	3,34	0,07	0,86	3,00	5,15	0,05	0,91	3,50	4,80	0,05	0,90
3	9,50	1,52	0,14	0,72	9,00	1,49	0,14	0,71	9,50	1,29	0,16	0,67
4	3,00	2,19	0,10	0,80	3,00	2,19	0,10	0,80	3,00	2,19	0,10	0,80
5	10,00	3,29	0,07	0,86	10,00	3,26	0,07	0,86	10,00	3,26	0,07	0,86
6	4,50	3,25	0,07	0,86	8,50	1,80	0,12	0,76	8,50	1,80	0,12	0,76
7	4,00	3,39	0,07	0,86	2,00	2,49	0,09	0,82	2,00	2,56	0,09	0,82
8	6,50	2,57	0,09	0,82	3,50	3,60	0,06	0,87	4,50	3,33	0,07	0,86
9	8,00	3,87	0,06	0,88	*	*	*	*	3,00	5,00	0,05	0,90
10	4,50	5,35	0,04	0,91	1,00	5,75	0,04	0,92	1,00	5,72	0,04	0,92
11	4,00	4,57	0,05	0,90	6,00	1,02	0,20	0,61	6,00	1,08	0,19	0,62
12	4,50	3,29	0,07	0,86	3,00	3,78	0,06	0,88	3,00	3,79	0,06	0,88
13	3,00	5,31	0,04	0,91	2,00	5,84	0,04	0,92	2,00	5,96	0,04	0,92
14	5,00	4,23	0,06	0,89	1,50	4,34	0,05	0,89	2,00	3,95	0,06	0,88
15	6,50	3,62	0,06	0,87	4,50	4,23	0,06	0,89	4,50	4,25	0,06	0,89
16	4,50	4,81	0,05	0,90	1,00	2,43	0,09	0,81	1,00	5,45	0,04	0,91
17	6,00	3,62	0,06	0,87	3,50	5,57	0,04	0,91	4,00	4,54	0,05	0,90
18	3,00	4,05	0,06	0,88	1,00	4,76	0,05	0,90	2,50	4,34	0,05	0,89
19	5,50	3,95	0,06	0,88	4,00	3,49	0,07	0,87	4,00	3,53	0,07	0,87
20	4,50	1,97	0,11	0,77	4,00	1,87	0,12	0,76	3,50	3,12	0,07	0,85

* Não ajustado

O parâmetro R representa uma medida do armazenamento temporário do P_e na bacia hidrográfica antes dela ser drenada para a seção de controle, sendo que quanto maior o seu valor em relação à t_c , maior é o efeito do armazenamento temporário (detenção) dentro da bacia (SABOL, 1988). Os valores dos parâmetros do método HUIC foram bastante variáveis para as duas bacias hidrográficas, sendo obtidos valores de t_c entre 2 e 24,5h para a BHAC e entre 1 e 10h para a BHRJ, enquanto para o parâmetro R foram observados valores de 2,26 a 10,55h para a BHAC e de 1,02 a 5,75h para a BHRJ. De acordo com as definições de Sabol (1988), pode-se inferir que a BHAC apresenta efeito de armazenamento temporário de P_e na bacia

substancialmente maior que a BHRJ, sendo basicamente explicado pelas diferenças de características fisiográficas e de resposta hidrológica. No entanto, deve ser destacado que o método de determinação de P_e exerceu influência sobre o valor estimado de R , especialmente quando da comparação do Índice ϕ com os métodos CN e CN Modificado. Esta influência do Índice ϕ é mais facilmente perceptível para a BHAC, podendo ser justificado pela maior distribuição da chuva em comparação aos eventos monitorados na BHRJ que são, geralmente, bastante concentrados.

Segundo Sabol (1988), o HUIC não ganhou ampla aplicação em virtude da dificuldade em avaliar o parâmetro R a partir de dados de monitoramento e por causa da carência de procedimentos empíricos para estimar R para bacias não monitoradas. No entanto, neste trabalho não foi encontrada uma dificuldade maior para estimativa de R para os eventos, visto que foi empregado um algoritmo de otimização, tendo sido esta uma prática também adotada por Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009) e Sarangi *et al.* (2007). Outro aspecto que geralmente limita a aplicação do HUIC é a necessidade de determinação do HTA, visto que é um processo bastante laborioso, cujas técnicas são poucos difundidas. Todavia, o desenvolvimento e aplicação da ferramenta “Watershed Isochrones”, empregando diversas operações de hidrologia combinadas com geoprocessamento, permitiu que tal intento fosse mais objetivo, simples e rápido, dado o número de HTA's gerados para o ajuste do parâmetro t_c para cada evento e em cada bacia hidrográfica.

A variação entre os valores dos parâmetros t_c e R também foi observada em vários outros estudos com o modelo HUIC. Ao avaliar o modelo HUIC para uma bacia hidrográfica de 615 km² no Irã, Adib *et al.* (2010) obtiveram valores de t_c entre 2,21 e 8,09h e de R de 2,50 a 6,70h. Kumar *et al.* (2002) encontraram valores de t_c de 1,05 a 6,08h e de R entre 1,41 e 3,71h para uma bacia hidrográfica (824,7 km²) na Índia. Sahoo *et al.* (2006) avaliaram o HUIC para uma bacia de 2.881,7 km² na Índia e obtiveram valores de t_c entre 12,85 e 22,82h e R de 0,28 a 1,76h. Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009) analisaram o HUIC para a bacia Kaha, no Paquistão, considerando o valor de t_c do HTA e 15 eventos chuva x vazão, para os quais R foi ajustado tanto individualmente como também de forma global por otimização de funções objetivo. Na opção de análise individual, Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009) verificaram valores de R

entre 20,8 e 26,6h para a função objetivo designada por diferença entre vazões de pico observadas e estimadas e de 18,6 a 21,6h para a função objetivo nomeada soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e estimados do hidrograma de ESD.

A análise de desempenho do HUIC para a BHAC e para a BHRJ, para cada evento analisado, empregando medidas estatísticas apropriadas e considerando os métodos Índice ϕ , CN e CN Modificado para determinação de P_e , serão abordados na seção 4.5.

4.4.5. Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUICG)

Para modelar o HUICG, foi calculado o tempo de concentração da bacia hidrográfica, sendo este de 5,19 horas para a BHAC e de 2,18 horas para a BHRJ. Contudo, como o HTA para a bacia deve estar no mesmo intervalo de tempo da simulação, empregaram-se os tempos de concentração de 5 horas para a primeira bacia e de 2,5 horas para a segunda.

Nas Figuras 37 e 38 é possível observar a variação do tempo de viagem do ESD de cada célula que compõe a BHAC e a BHRJ, até a respectiva seção de controle. Além disso, pode-se visualizar também as isócronas das bacias hidrográficas, que são linhas que representam locais da bacia hidrográfica que tem o mesmo tempo de viagem de ESD até a seção de controle, num intervalo correspondente ao intervalo de simulação empregado neste trabalho (0,5 horas).

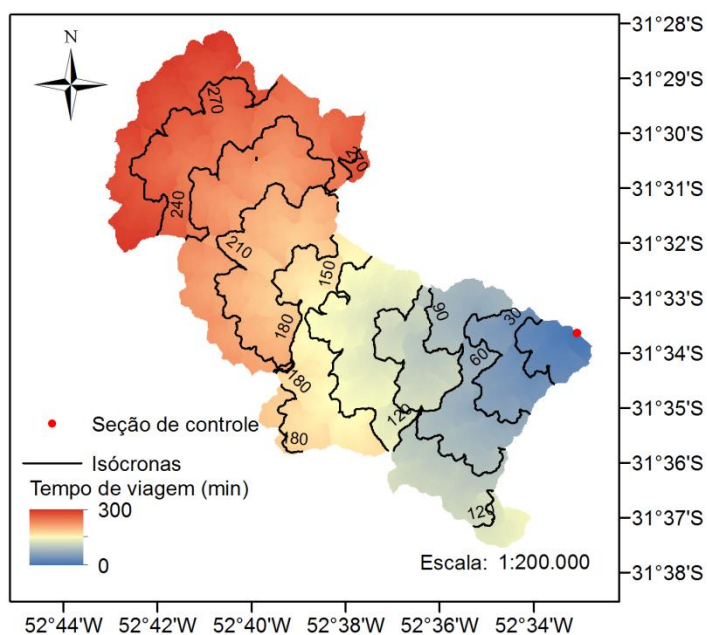


Figura 37 - Isócronas para a BHAC considerando o tempo de concentração de 5 horas

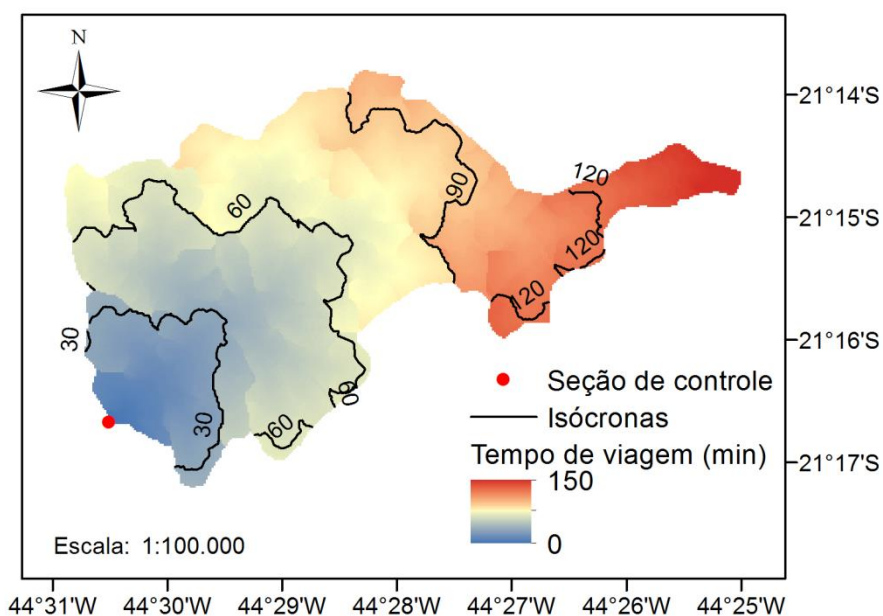


Figura 38 - Isócronas para a BHRJ considerando o tempo de concentração de 2,5 horas

As informações contidas nas figuras supracitadas podem ser visualizadas, de forma sintetizada, na Figura 39 e na Figura 40, onde são apresentados o HTA da BHAC e o HTA da BHRJ, respectivamente.

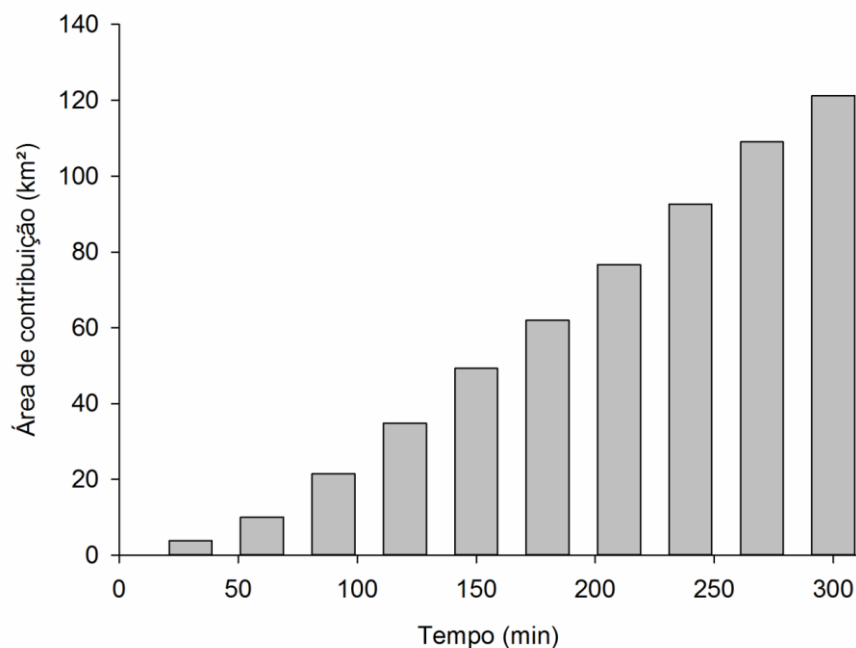


Figura 39 - Histograma tempo-área (HTA) acumulado, empregado na modelagem do HUICG para BHAC

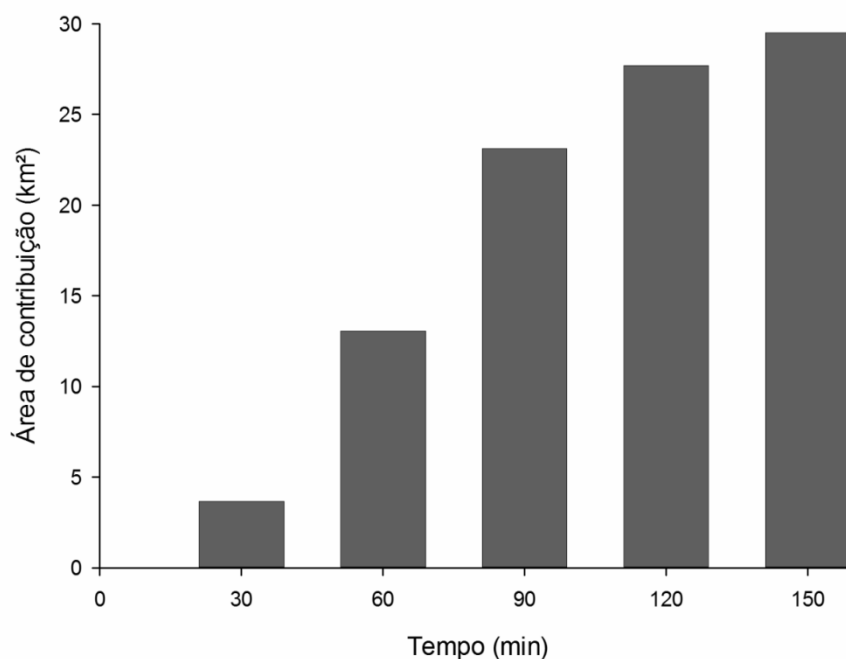


Figura 40 - Histograma tempo-área (HTA) acumulado, empregado na modelagem do HUICG para BHRJ

O parâmetro tempo de concentração (t_c), juntamente com a distância máxima percorrida pelo ESD (23,68 km para a BHAC e 10,59 km para a BHRJ) e a área da bacia hidrográfica, embasaram a estimativa do parâmetro coeficiente de armazenamento (R), conforme metodologia descrita na seção 3.6.5. Este parâmetro R assumiu o valor de 2,12h para a BHAC e de 1,28h para a BHRJ e, permitiu estimar, por sua vez, os coeficientes de ponderação

C_0 e C_1 em 0,11 e 0,79 (BHAC) e 0,16 e 0,67 (BHRJ), respectivamente. Seguindo a definição e interpretação de Sabol (1988) acerca de R , pode-se inferir que a BHRJ tem um efeito de armazenamento temporário de P_e na bacia menor que a BHAC, sendo este resultado e as explicações para este fato análogos à discussão conduzida para o HUIC.

Todavia, deve ser ressaltado que, diferentemente da modelagem com o HUIC, no HUICG os valores de R e t_c não foram ajustados por evento e sim considerados como únicos e representativos de cada bacia para todos os eventos analisados. Neste sentido, o equacionamento usado para estimar os parâmetros t_c e R exerce grande impacto na modelagem do HUICG.

Ao avaliar o HUICG para 13 eventos chuva x vazão em uma bacia hidrográfica no Irã, Adib *et al.* (2010) constataram que t_c variou entre 3,7 e 9,7h, enquanto o R variou de 3,2 a 9,5h. Os autores verificaram que os valores de t_c e R para cada evento foram substancialmente diferentes daqueles obtidos para o HUIC ajustado no ambiente do HEC-HMS através de dados monitorados.

Sahoo *et al.* (2006) analisaram o HUICG para uma bacia de 2.881,7 km² na Índia através de 15 eventos chuva-vazão. Os autores derivaram as variáveis geomorfológicas para HUICG a partir de mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, obtendo valores de t_c de 11,3 a 21,1h para o primeiro caso e entre 11,0 e 20,4h para o segundo. O parâmetro R foi analisado da mesma forma, variando de 0,4 a 0,9h para a escala mais detalhada e entre 1,0 e 1,9h para a escala menos detalhada.

A análise de desempenho do HUICG para a BHAC e para a BHRJ, para cada evento analisado, empregando medidas estatísticas apropriadas e considerando os métodos Índice ϕ , CN e CN Modificado para determinação de P_e , serão abordados na seção 4.5.

4.5. Desempenho dos modelos de Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

Na Figura 41 podem ser visualizados os hidrogramas de ESD para a BHAC, obtidos para cada evento com base na separação do escoamento pelo método das inflexões A e C, assim como os hidrogramas de ESD estimados através do modelo HUT, considerando as 3 diferentes estimativas de distribuição temporal de P_e (Índice ϕ , CN e CN Modificado). Para os eventos

ocorridos na BHRJ, os hidrogramas de ESD observados e estimados pelo modelo de HUT podem ser observados na Figura 42. Os mesmos resultados, porém para o HUA, são ilustrados na Figura 43 (BHAC) e na Figura 44 (BHRJ).

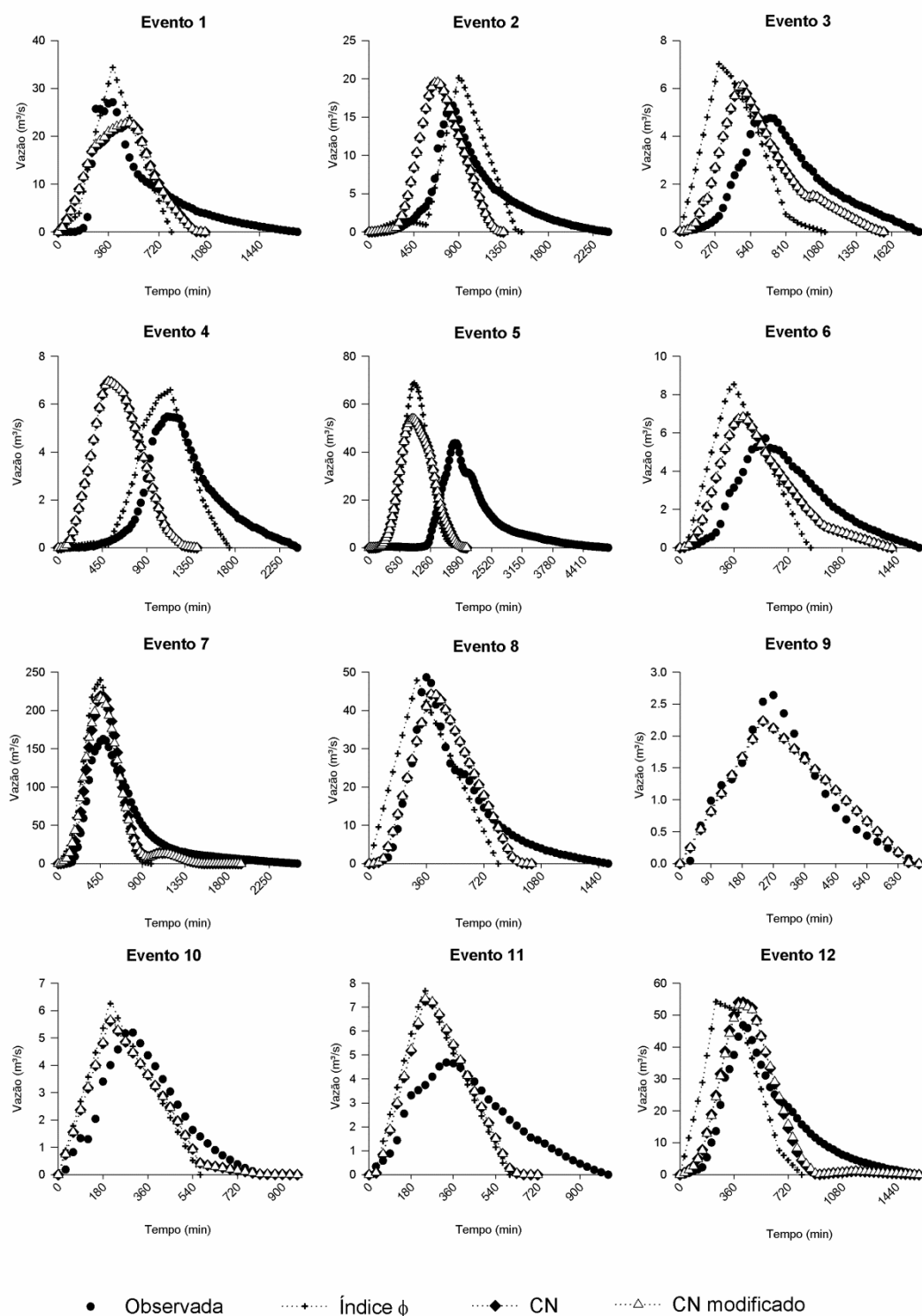


Figura 41 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUT para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e

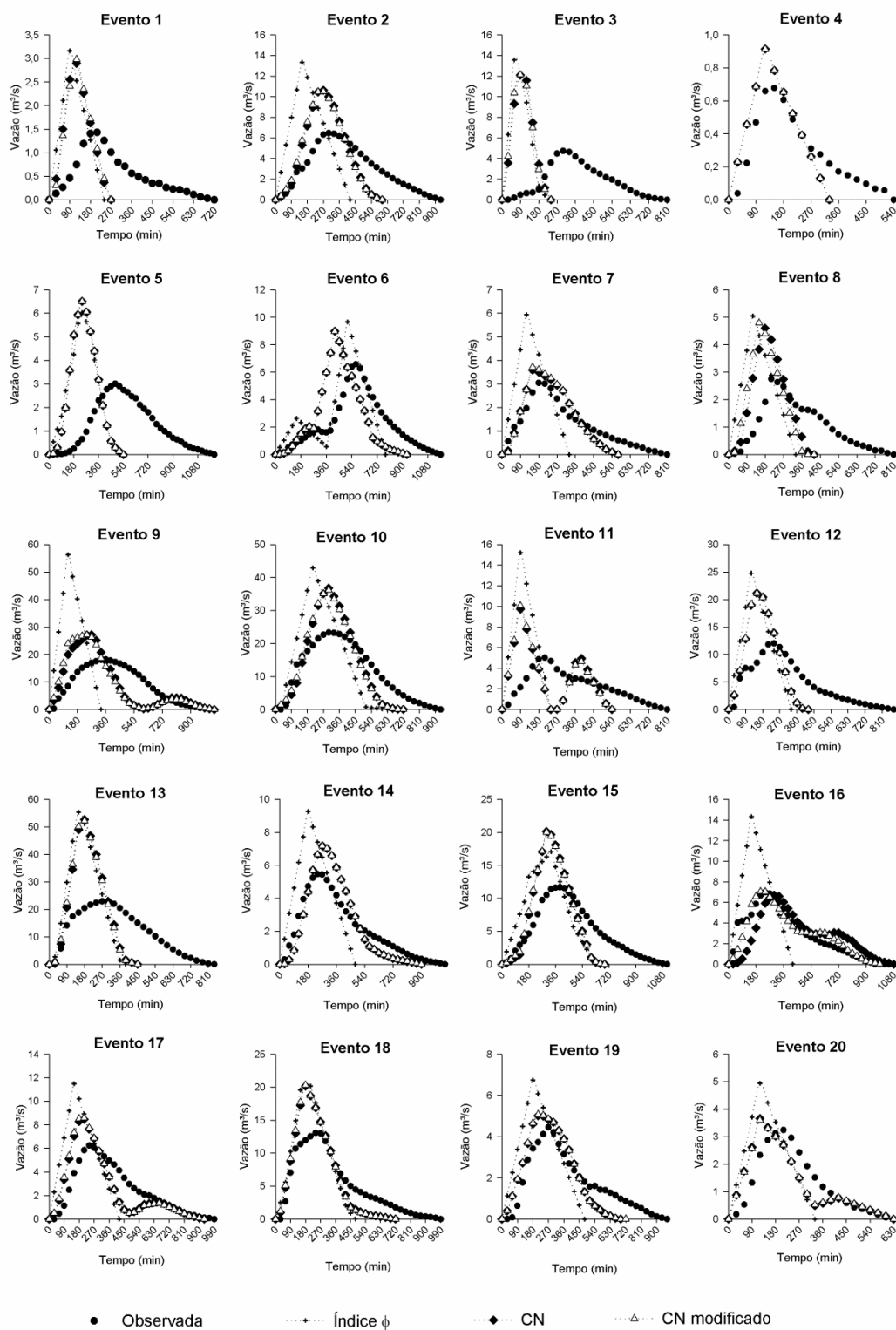


Figura 42 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHRJ e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUT para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e

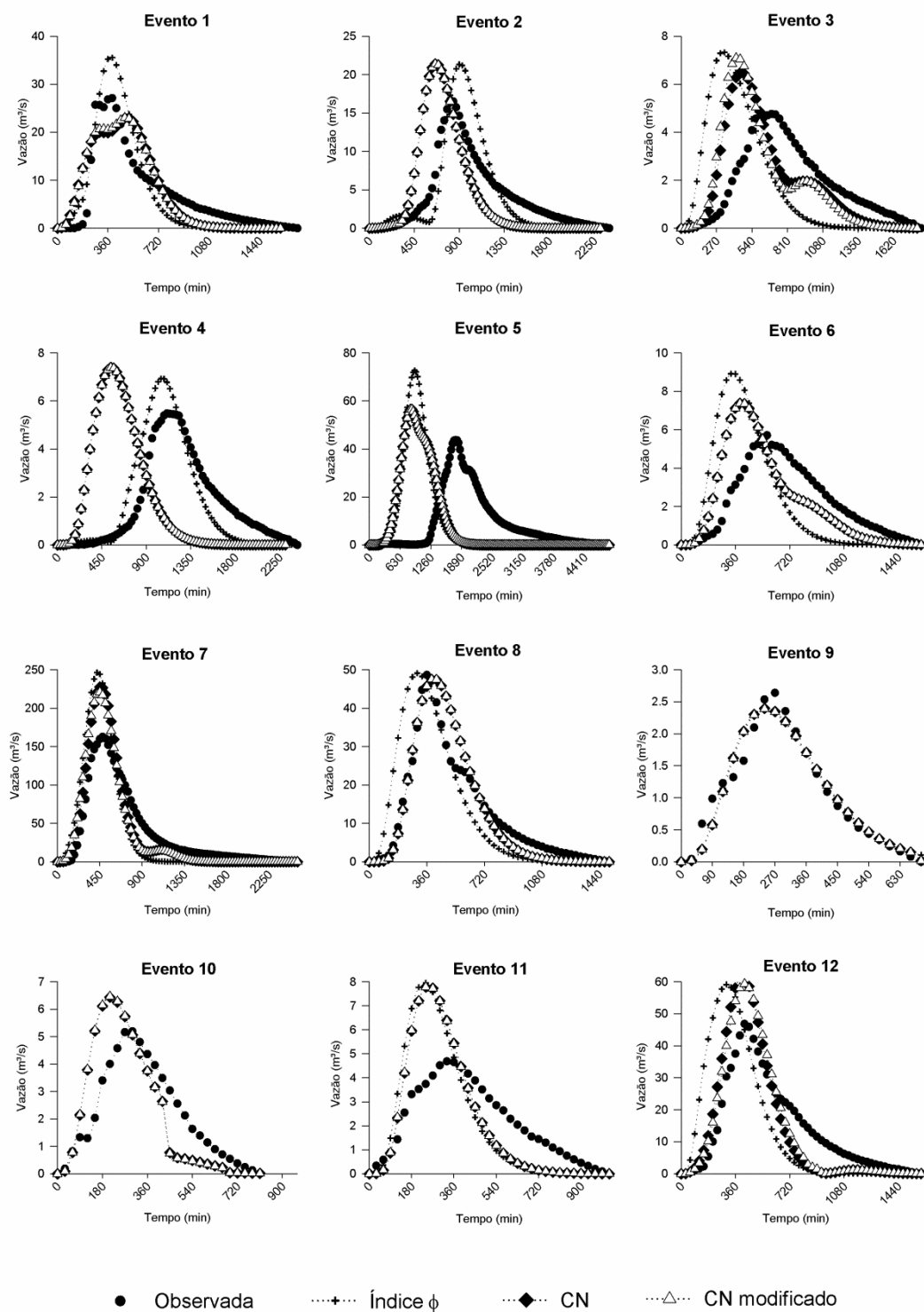


Figura 43 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHAC e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUA para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e

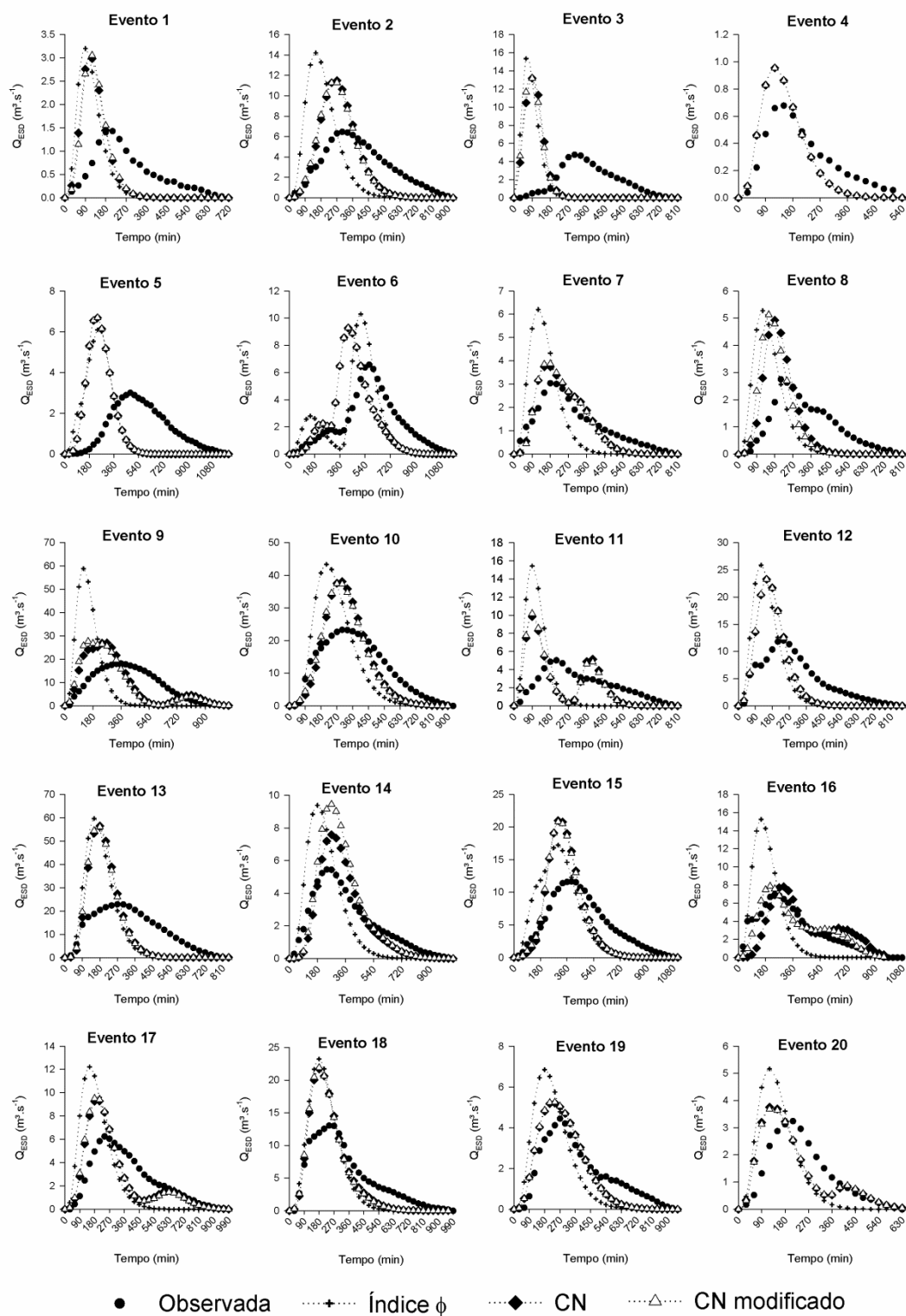


Figura 44 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle da BHRJ e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo HUA para cada evento analisado, seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e

Analisando os resultados provenientes da modelagem com o HUT (Figura 41 e Figura 42) e HUA (Figura 43 e Figura 44) nas duas bacias, pôde-se verificar que, de forma geral, os dois modelos não foram capazes de estimar de forma adequada os hidrogramas decorrentes dos eventos de chuva analisados, sendo comumente constatada uma superestimativa da vazão de pico e antecipação do hidrograma estimado em relação ao observado. No entanto, os resultados foram superiores para a BHAC (Figura 41 e Figura 43) quando comparados à BHRJ (Figura 42 e Figura 44).

Comparando os resultados do HUT e HUA para a mesma bacia hidrográfica, pôde observar que o desempenho foi similar. Este comportamento é esperado visto que a formulação matemática é idêntica, especialmente no tocante à determinação de t_{lag} e q_p , diferindo apenas na maneira de representar a ascensão e recessão do hidrograma de ESD. Deve ser ressaltado que o HUT e HUA são HU's sintéticos desenvolvidos para determinadas condições de bacias hidrográficas norte-americanas e que a principal abstração é a proposição de estimativa do t_{lag} , sendo estes métodos amplamente empregados no Brasil na área de engenharia hidrológica. No entanto, como pôde ser observado nos resultados deste estudo, mesmo calibrando o valor de CN para determinação do S, os valores de t_{lag} não foram adequados para as bacias hidrográficas analisadas, desta forma dando indícios de que estes HU's sintéticos devem ser empregados com cautela.

Ao comparar os métodos de determinação de P_e , pôde-se observar maior dificuldade de estimativa do hidrograma de ESD pelos modelos HUT e HUA quando da utilização do hidrograma de P_e derivado do método do Índice ϕ . A explicação para esse comportamento reside no fato de tal método tender a concentrar a P_e em um ou poucos intervalos de tempo, tendo sido mais sensível no caso da BHRJ porque a mesma apresenta comportamento de chuva de menor duração. Estes resultados corroboram com as constatações de Šraj, Dirnbek e Brilly (2010).

Os hidrogramas estimados pelo HUIN para a BHAC são ilustrados na Figura 45 e para a BHRJ na Figura 46.

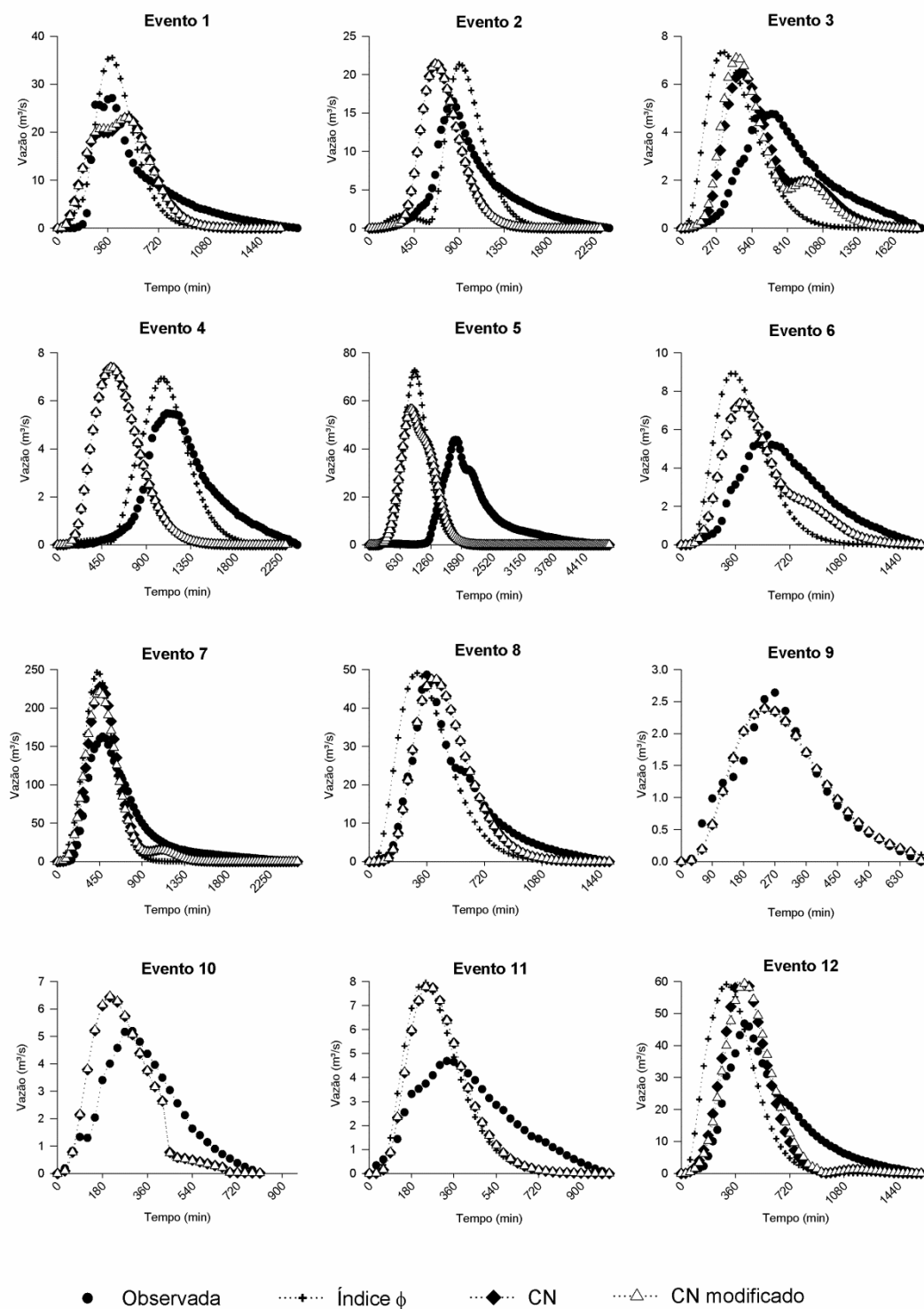


Figura 45 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIN seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC

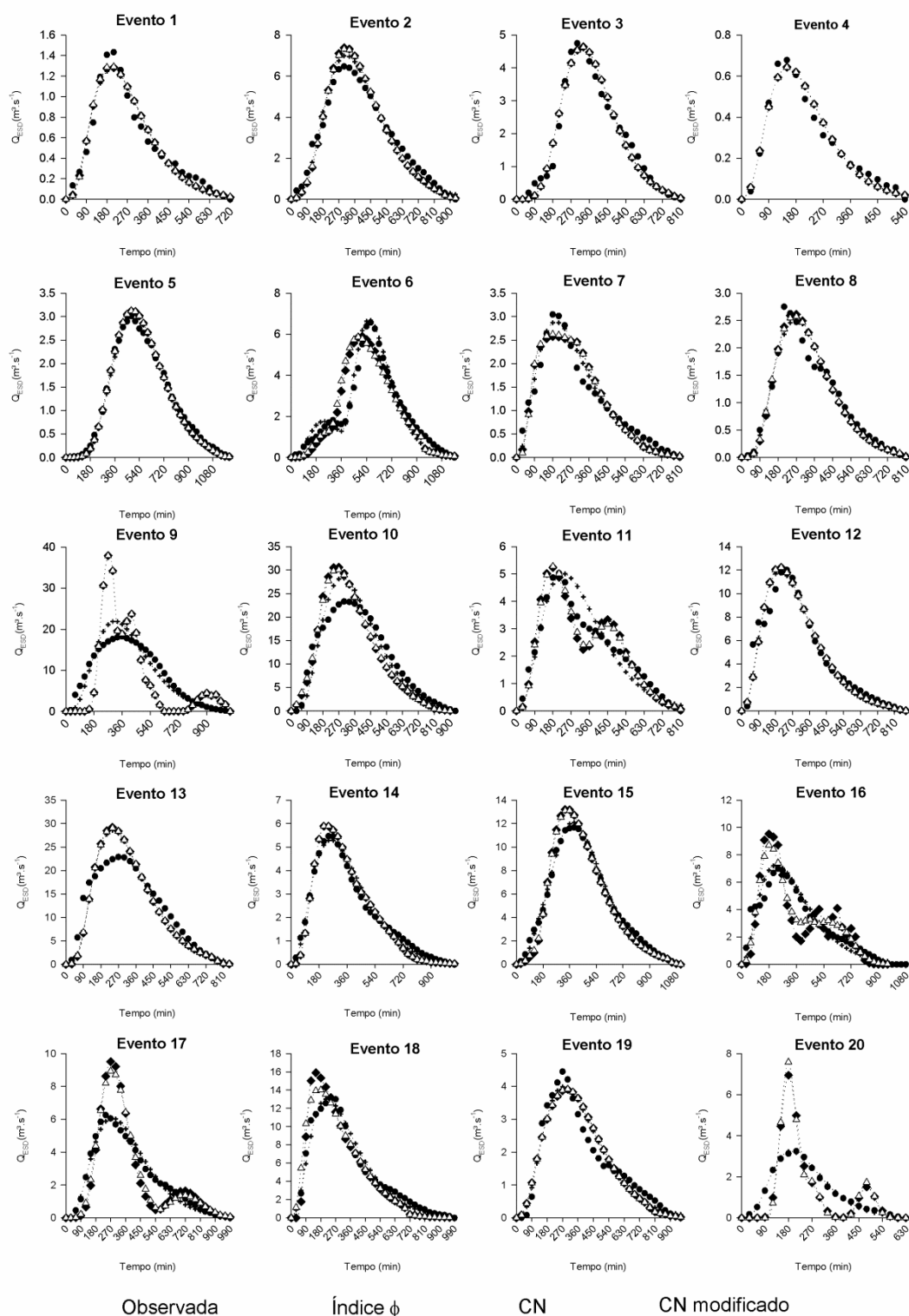


Figura 46 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIN seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ

Os resultados derivados da modelagem com HUIN (Figura 45 e Figura 46) indicam que o referido modelo foi capaz de reproduzir de forma satisfatória o hidrograma da maior parte dos eventos. Pôde-se observar nas mesmas figuras que o ajuste para a BHAC foi inferior ao da BHRJ, podendo ser notado em vários eventos dificuldades no ajuste tanto da vazão de pico quanto do tempo de pico. A maior dificuldade de ajuste do HUIN para a BHAC pode ser justificada por dois motivos: i) representatividade espacial da precipitação em virtude da área da bacia hidrográfica e do número e distribuição de estações pluviométricas; e ii) falta de um componente no HUIN como o HTA do método HUIC, conforme destacado por Ghumman *et al.* (2014), para considerar a variação temporal do ESD na bacia, podendo esta carência ser mais impactante no caso de bacias hidrográficas maiores como a BHAC. Outros estudos que empregaram o HUIN para modelagem de cheias, como os de Adib *et al.* (2010), Bhaskar, Parida e Nayak (1997), Ghumman *et al.* (2014), Kumar *et al.* (2002) e Sahoo *et al.* (2006), também constaram resultados satisfatórios com este método.

Em relação aos métodos de determinação de P_e , foi possível constatar que o método teve um impacto visualmente imperceptível no ajuste do HUIN para a BHRJ. Na BHAC ocorreu um pequeno impacto no ajuste para apenas alguns eventos modelados na BHAC com diferenciação perceptível entre o Índice ϕ e os outros dois métodos, porém, o ajuste do HUIN não foi adequado nestes eventos onde foi percebido o impacto. A explicação para esse comportamento reside no fato de tal método tender a concentrar a P_e em um ou poucos intervalos de tempo. Estes resultados estão de acordo com as limitações do Índice ϕ conforme constatadas por Šraj, Dirnbek e Brilly (2010).

Os hidrogramas de ESD estimados pelo HUING na BHAC e na BHRJ podem ser visualizados na Figura 47 e na Figura 48, respectivamente.

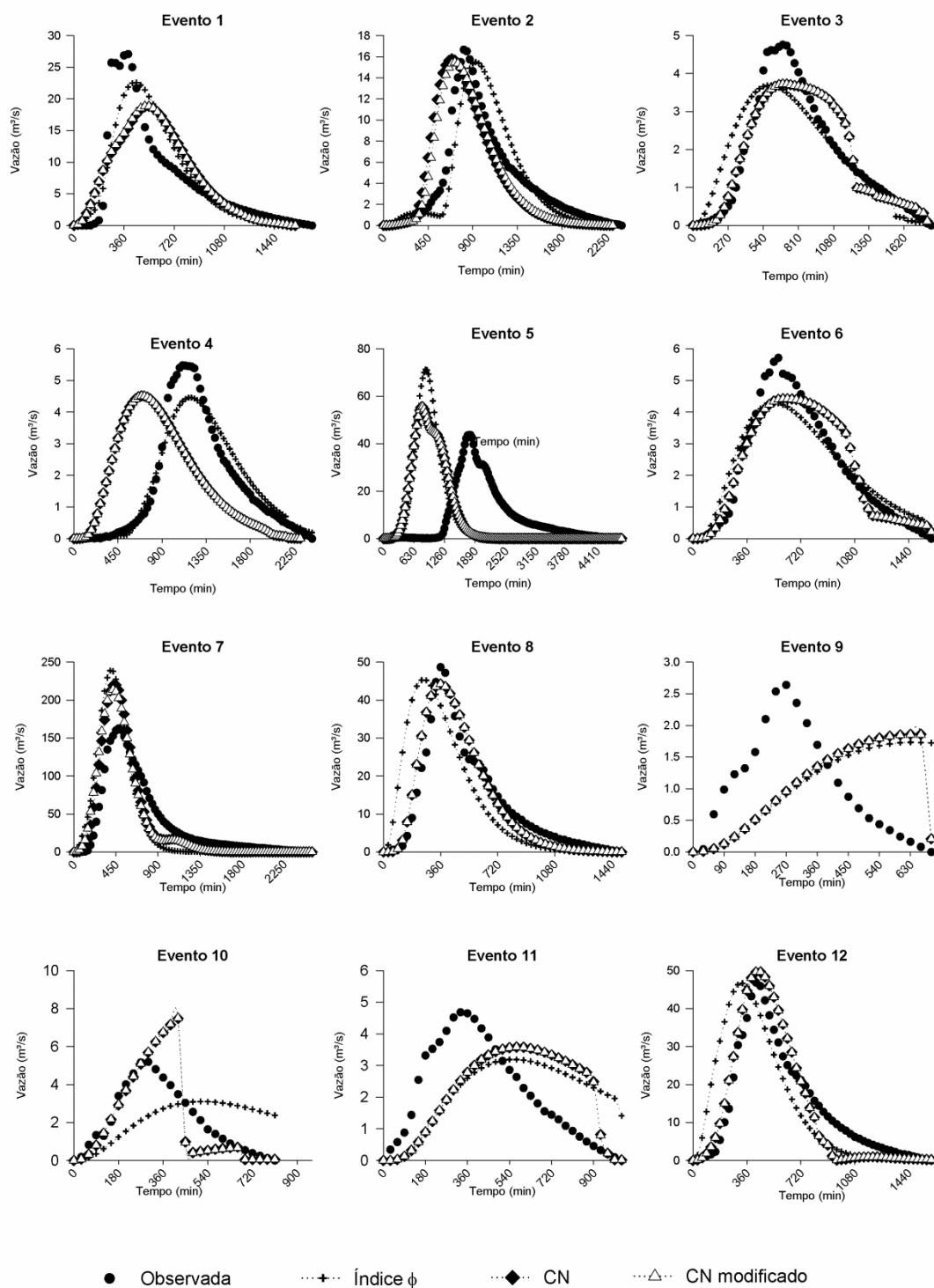


Figura 47 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUING seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC

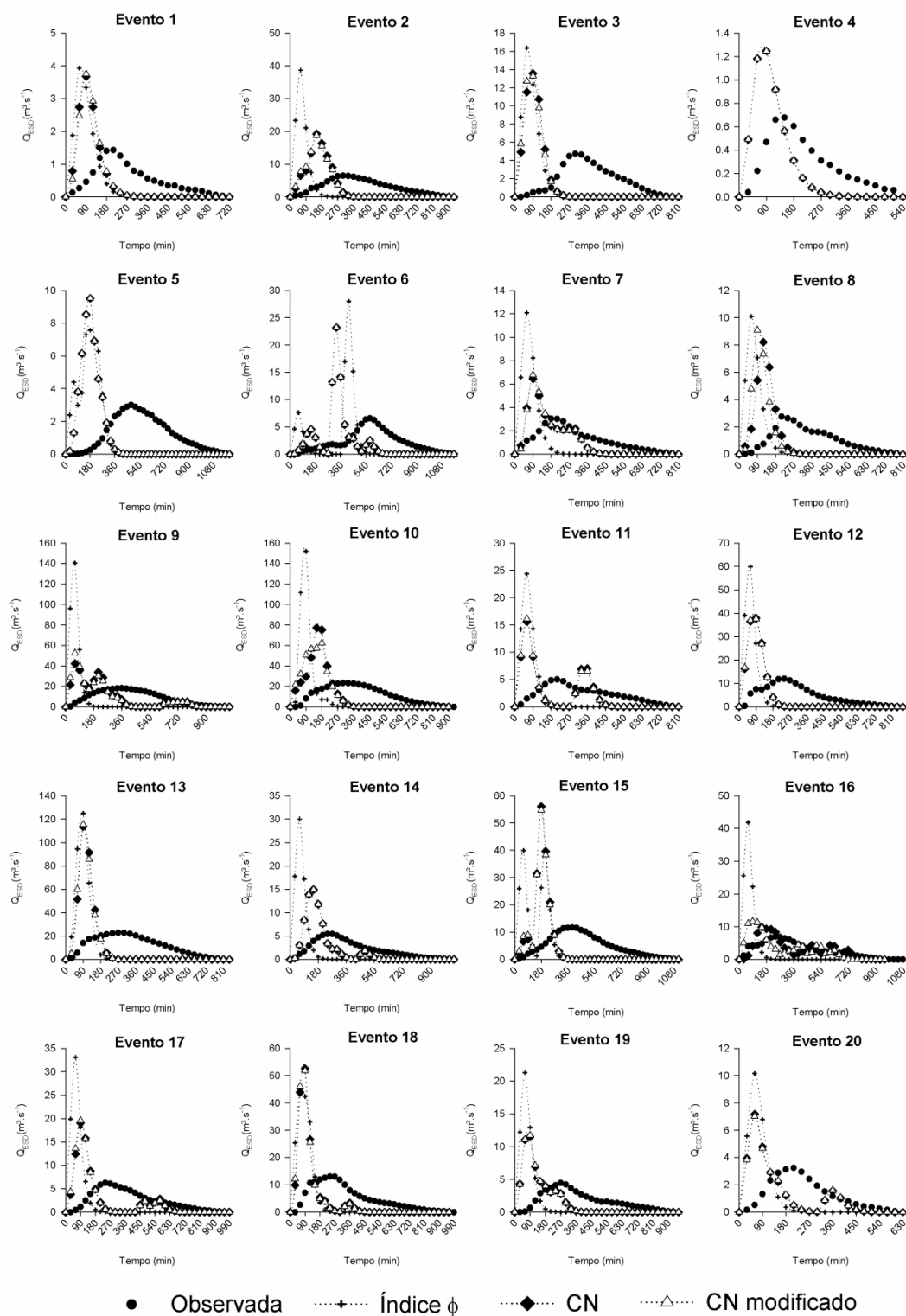


Figura 48 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUING seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ

Os resultados da modelagem com o HUING (Figura 47 e Figura 48) nas duas bacias indicam que, de forma geral, os hidrogramas estimados não tiveram boa aderência aos observados, sendo comumente constatada, no caso da BHAC, uma superestimativa ou subestimativa da vazão de pico e também antecipação ou retardo do hidrograma estimado em relação ao observado; no caso do BHRJ, foi observado em todos os eventos superestimativa da vazão de pico e antecipação do hidrograma estimado em relação ao observado. No entanto, os resultados foram superiores para a BHAC (Figura 47) quando comparados à BHRJ (Figura 48).

Bhaskar, Parida e Nayak (1997) avaliaram o modelo HUING para estudar os hidrogramas resultantes de 12 eventos em uma bacia situada na Índia. Embora Bhaskar, Parida e Nayak (1997) também tenham analisado o HUING a partir de dados observados de chuva-vazão, o objetivo não foi traçar um comparativo entre os modelos. Todavia, de acordo com os mesmos, os resultados obtidos com o HUING foram capazes de reproduzir as características gerais dos trechos de ascensão e recessão dos hidrogramas. Foi verificado que, em quase todos os eventos, o HUING superestimou o ESD inicialmente e subestimou no estágio final, podendo ser justificado pelo erro introduzido ao assumir uma intensidade constante de infiltração de água no solo (ϕ) para determinar as intensidades de P_e . Ainda, Bhaskar, Parida e Nayak (1997) destacam que as equações usadas para determinar n e k para o HUING estão sujeitas a erros de regressão, os expoentes das variáveis geomorfológicas não são universais, mas sim dependentes do local.

Adib *et al.* (2010) consideram que o HUING foi capaz de estimar satisfatoriamente os hidrogramas de ESD para 13 eventos em uma bacia de 67,5 km² no Irã, destacando que tal modelo, por não necessitar de dados históricos de chuva e vazão, tem sido empregado amplamente na área de hidrologia.

Sahoo *et al.* (2006) analisaram o HUING para uma bacia de 2.881,65 km² na Índia através de 15 eventos chuva-vazão, considerando mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000. Estes autores consideraram que, apesar do HUING ter sempre superestimado a vazão de pico dos hidrogramas, o modelo teve desempenho razoavelmente bom para a modelagem de cheias na bacia em questão quando comparado aos modelos

HUIN e HUIC, os quais são derivados de dados históricos chuva-vazão. Sahoo *et al.* (2006) concluíram que o HUING teve desempenho semelhante quando foram empregados os mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, indicando que o mapa de escala mais baixa também pode ser usado para bacias não monitoradas com precisão aceitável. Ao comparar com outro modelo geomorfológico (HUICG), os autores observaram que o HUING estimou hidrogramas de ESD com precisão comparável, porém ao avaliar as estatísticas C_{NS} , erro percentual na vazão de pico e erro percentual no tempo da vazão de pico, Sahoo *et al.* (2006) verificaram que o HUICG apresentou desempenho levemente superior ao HUING para as duas escalas de mapas topográficos. Os autores atribuem este comportamento ao fato do HUICG considerar o efeito do armazenamento da bacia na forma de um HTA, a qual é mais eficiente do que o parâmetro de forma (n) usado no HUING.

Em relação aos métodos de determinação de P_e , pôde-se observar maior dificuldade de estimativa do hidrograma de ESD pelo modelo HUING quando da utilização do hietograma de P_e derivado do método do Índice ϕ . A explicação para esse comportamento, também observado na modelagem do HUT e do HUA, reside no fato de tal método tender a concentrar a P_e em um ou poucos intervalos de tempo, tendo sido mais sensível no caso da BHRJ porque a mesma apresenta comportamento de chuva de menor duração. Estes resultados corroboram com as constatações de Šraj, Dirnbek e Brilly (2010).

Os hidrogramas de ESD estimados pelo HUIC na BHAC e na BHRJ podem ser visualizados na Figura 49 e na Figura 50, respectivamente.

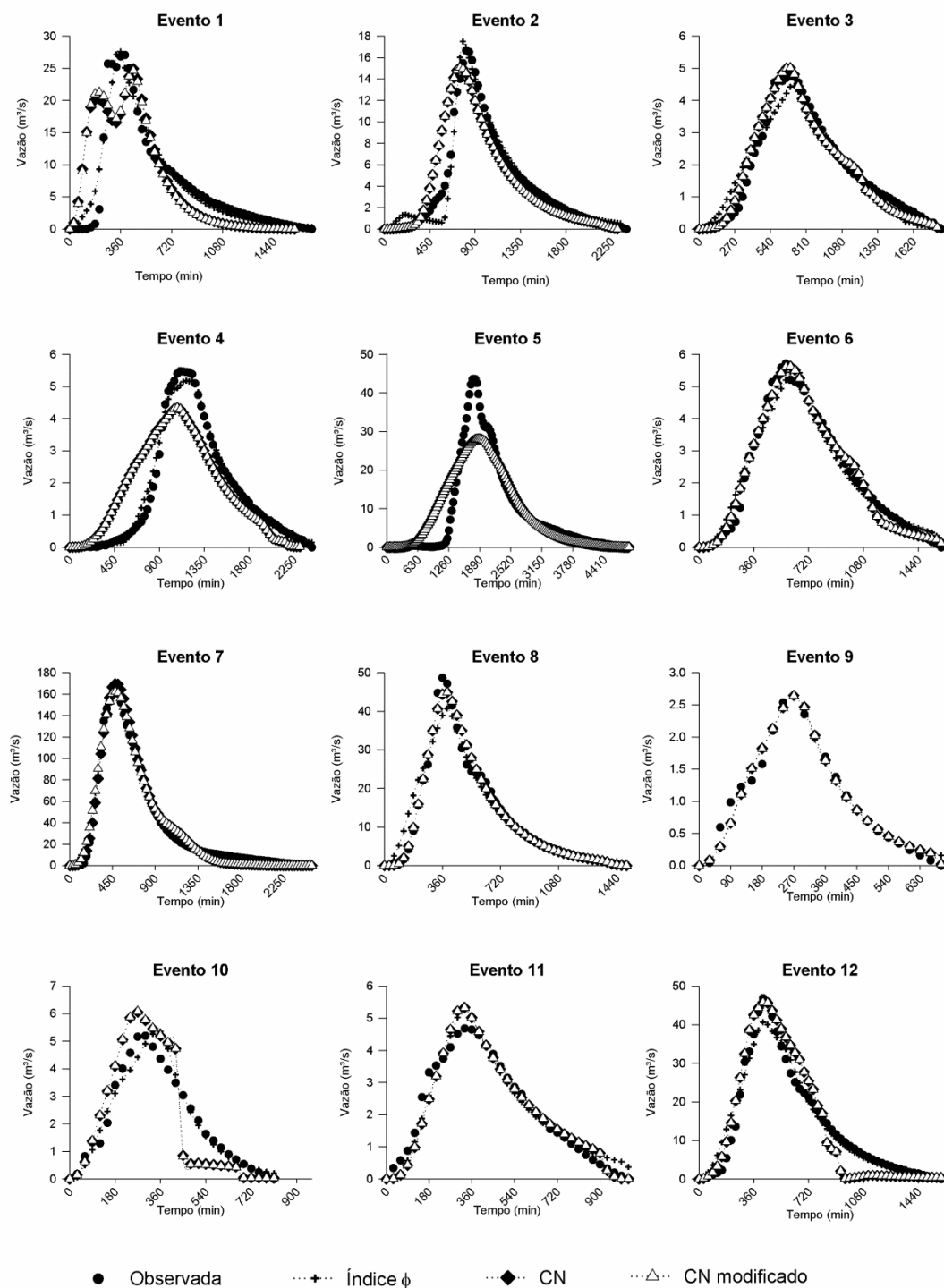


Figura 49 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIC seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC

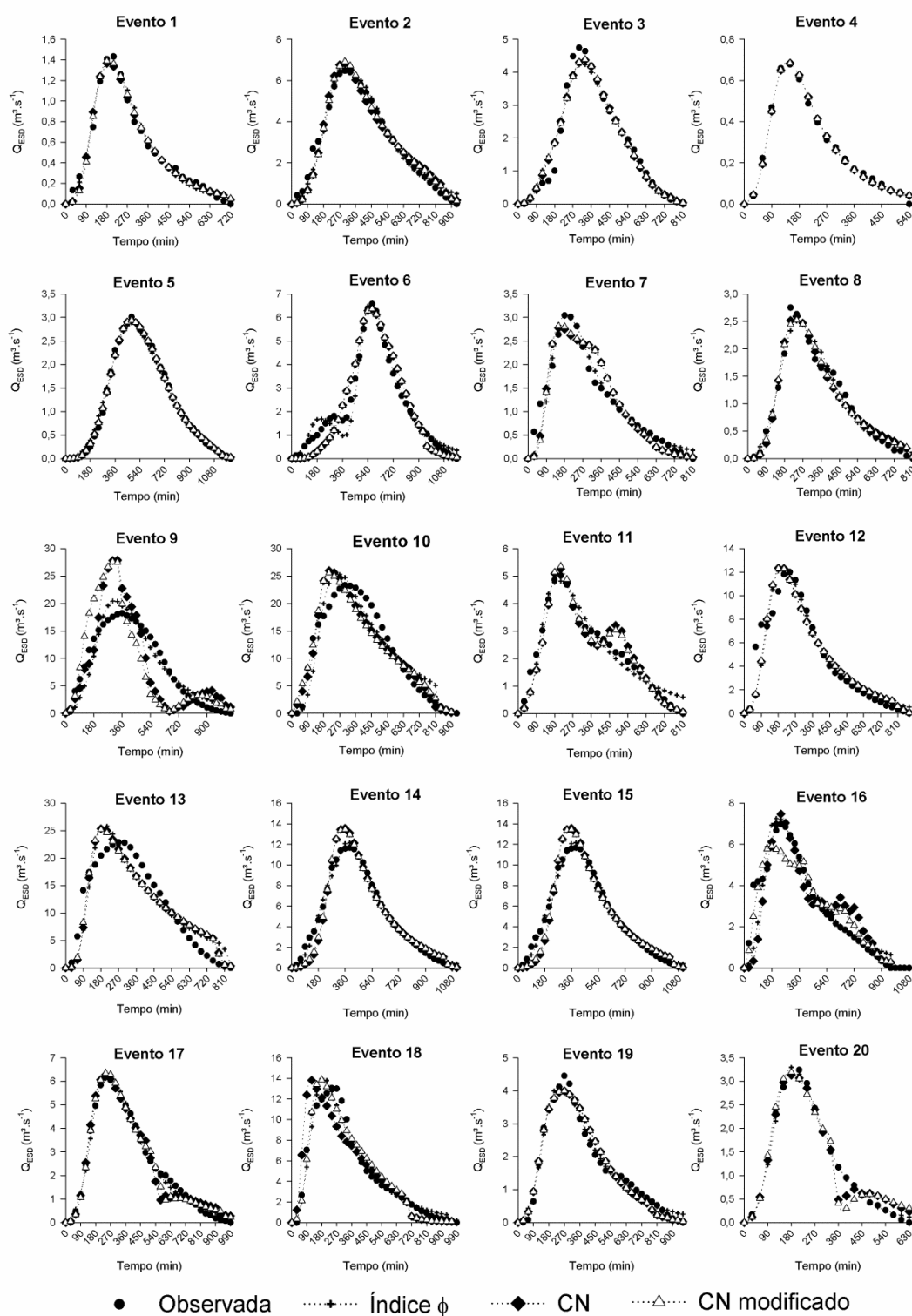


Figura 50 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUIC seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ

Pode-se observar nas Figuras 49 e 50 que o modelo HUIC permitiu reproduzir de forma satisfatória o hidrograma na maioria dos eventos para as duas bacias hidrográficas analisadas. Deve ser ressaltado que tanto o modelo HUIN quanto o HUIC tiveram seus parâmetros calibrados a partir de dados observados de chuva e de vazão, portanto, é esperado que estes dois modelos apresentem desempenho superior aos demais empregados neste estudo, concordando com Bhaskar, Parida e Nayak (1997). Com base nas conclusões de Ghumman *et al.* (2014) acerca da importância da consideração do HTA na formulação teórica do HUIC, por conseguir representar a variação temporal do ESD na bacia, pode-se inferir este componente representando a translação do ESD foi o responsável pelo bom desempenho do HUIC na BHAC e na BHRJ. Outros estudos que empregaram o HUIC para modelagem de cheias, como os de Adib *et al.* (2010), Ghumman *et al.* (2014), Kumar *et al.* (2002) e Sahoo *et al.* (2006), também constaram resultados satisfatórios com este modelo.

Em relação aos métodos de determinação de P_e , foi possível constatar que o método teve um impacto visualmente imperceptível no ajuste do HUIC para as duas bacias hidrográficas, com algumas exceções (eventos 1, 4, 5 e 10 da BHAC e eventos 6, 9, 16 e 18 da BHRJ). Esta menor influência do método de P_e para o HUIC, em relação ao HUIN, pode ser justificada pelo fato do HUIC ter tido, visualmente, um melhor ajuste aos eventos modelados; desta forma, minimizou o efeito do método de determinação de P_e .

Os hidrogramas de ESD estimados pelo HUICG na BHAC e na BHRJ podem ser visualizados na Figura 51 e na Figura 52, respectivamente.

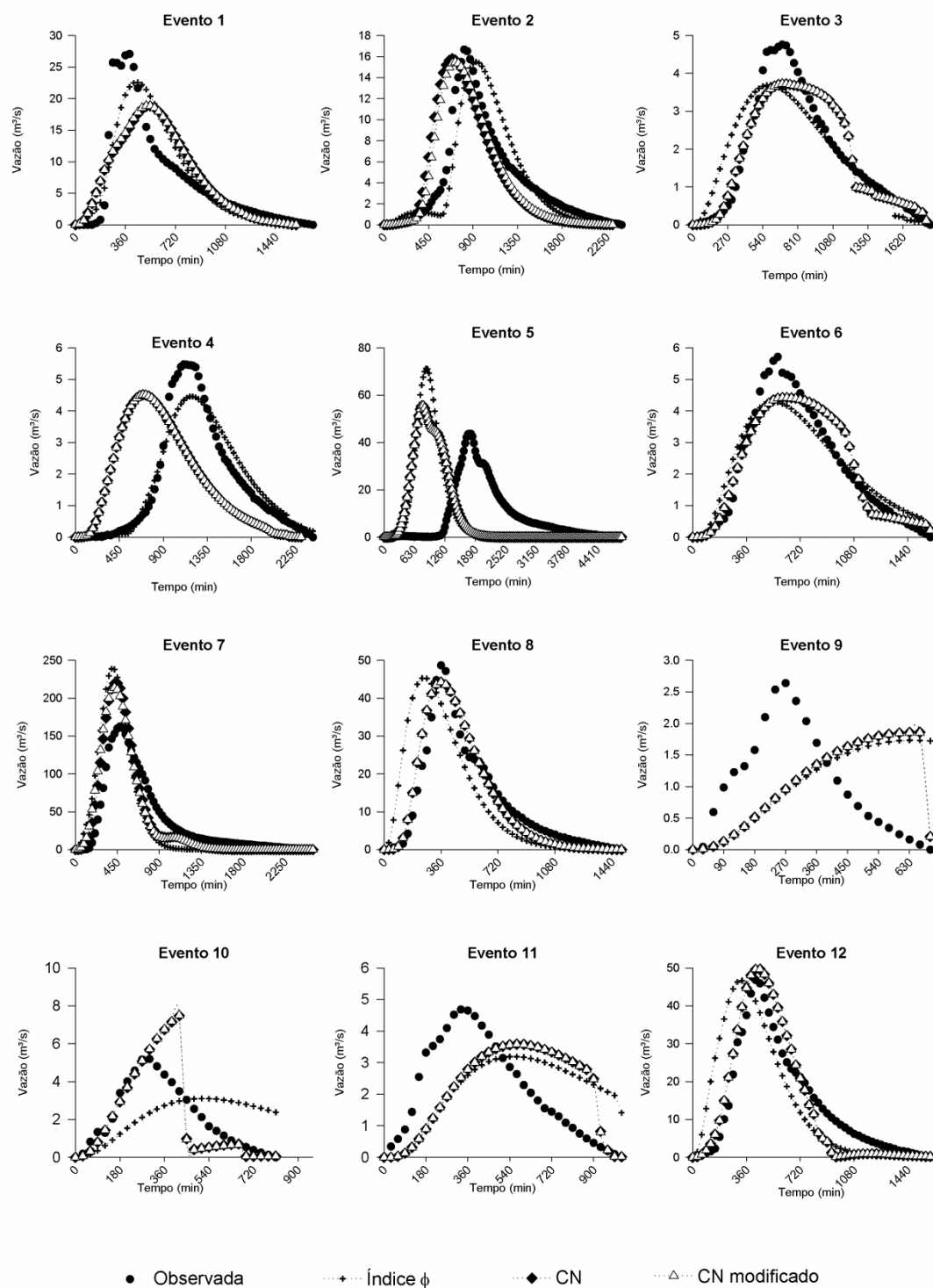


Figura 51 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUICG seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHAC

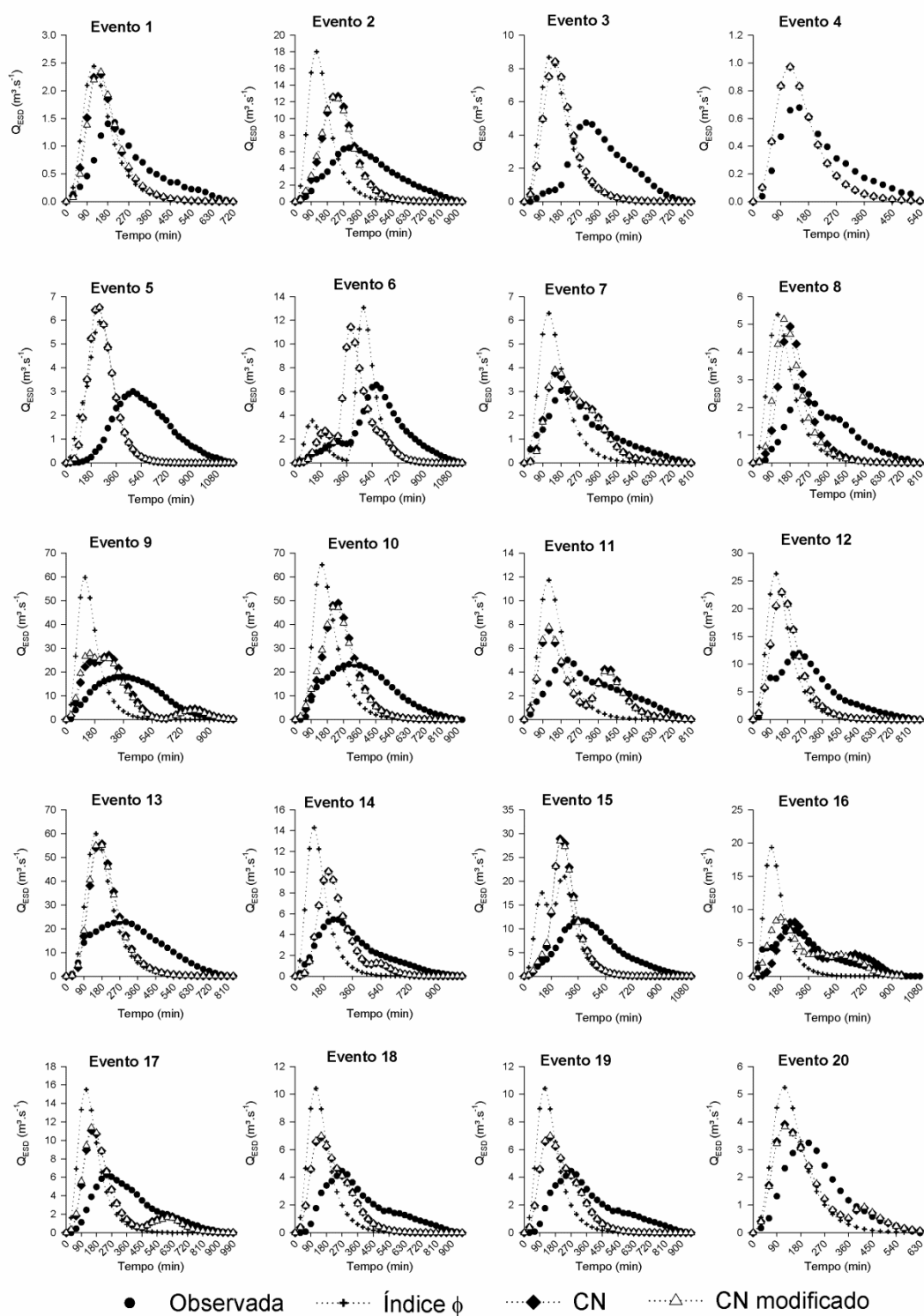


Figura 52 - Hidrograma de ESD observado na seção de controle e hidrogramas de ESD estimados pelo modelo de HUICG seguindo as 3 metodologias de estimativa da P_e , para cada evento analisado na BHRJ

Os resultados da modelagem com o HUICG (Figura 51 e Figura 52) nas duas bacias indicam que, de forma geral, os hidrogramas estimados não tiveram boa aderência aos observados, sendo constatada, no caso da BHAC, na maioria das vezes uma subestimativa da vazão de pico e também antecipação ou retardo do hidrograma estimado em relação ao observado; no caso do BHRJ, foi observado em todos os eventos superestimativa da vazão de pico e antecipação do hidrograma estimado em relação ao observado. No entanto, os resultados foram aparentemente superiores para a BHAC (Figura 51) quando comparados à BHRJ (Figura 52). Os resultados, de forma geral, não satisfatórios para a modelagem com o HUICG, podem ser atribuídos à: i) formulação do parâmetro R (seção 3.6.5) recomendada por County (2009) e empregada neste estudo, alertando para a necessidade de cautela ao adotar metodologias para a estimativa deste parâmetro do HUICG a partir de informações geomorfológicas da bacia; ii) incerteza na estimativa de t_c a partir das equações empregadas (seção 3.6.5); e iii) invariância temporal dos valores de R e t_c , não contemplando a peculiaridade de cada evento de chuva-vazão, em contraste com a metodologia do HUIC, conforme apresentado na Tabela 15 e na Tabela 16. Contudo, alguns estudos têm apontado para desempenho satisfatório do modelo HUICG (KUMAR *et al.*, 2002, KUMAR *et al.*, 2004, SAHOO *et al.*, 2006).

Kumar *et al.* (2002), ao avaliarem o modelo HUICG para 7 eventos em uma bacia na Índia, constataram que tal modelo foi capaz de estimar hidrogramas de ESD razoavelmente bem quando comparados aos hidrogramas observados, especialmente levando em consideração que este modelo emprega diretamente características geomorfológicas da bacia,

Kumar *et al.* (2004) constataram que, quando da utilização unicamente de características geomorfológicas de uma grande bacia hidrográfica na Índia, os modelos HUING e HUICG, proporcionaram a estimativa de hidrogramas de ESD com precisão razoável e similar entre os modelos.

Sahoo *et al.* (2006) avaliaram o modelo HUICG para uma bacia de 2.881,7 km² na Índia através de 15 eventos chuva-vazão considerando mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000. Apesar do HUICG ter sempre superestimado a vazão de pico dos hidrogramas, Sahoo *et al.* (2006)

consideraram que o modelo teve desempenho razoavelmente bom para a modelagem de cheias na bacia em questão quando comparado aos modelos HUIN e HUIC, os quais são derivados de dados históricos chuva-vazão. Os autores concluíram que o HUICG teve desempenho semelhante quando foram empregados os mapas topográficos nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, indicando que o mapa de escala mais baixa também pode ser usado para bacias não monitoradas com precisão aceitável. Ao avaliar as estatísticas C_{NS} , erro percentual na vazão de pico e erro percentual no tempo da vazão de pico, De acordo com Ghumman *et al.* (2014), a escala da imagem de satélite pode ter um grande impacto para a modelagem do HUING e que melhores resultados podem ser obtidos se o padrão de drenagem da bacia for definido de uma maneira mais detalhada. Sahoo *et al.* (2006) verificaram que o HUICG apresentou desempenho levemente superior ao HUING para as duas escalas de mapas topográficos. Os autores atribuem este comportamento ao fato do HUICG considerar o efeito do armazenamento da bacia na forma de um HTA, a qual é mais eficiente do que o parâmetro de forma (n) usado no HUING.

Em relação aos métodos de determinação de P_e , pôde-se observar maior dificuldade de estimativa do hidrograma de ESD pelo modelo HUICG quando da utilização do hietograma de P_e derivado do método do Índice ϕ . A explicação para esse comportamento, também observado na modelagem do HUT, HUA e HUING, reside no fato de tal método tender a concentrar a P_e em um ou poucos intervalos de tempo, tendo sido mais sensível no caso da BHRJ porque a mesma apresenta comportamento de chuva de menor duração. Estes resultados corroboram com as constatações de Šraj, Dirnbek e Brilly (2010).

As Tabelas 17, 18 e 19 permitem visualizar os valores das estatísticas C_{NS} , r e ER_{Qp} calculadas para cada evento baseando-se na P_e estimada pelos métodos do Índice ϕ , CN e CN Modificado, respectivamente, considerando a BHAC. Já as Tabelas 20, 21 e 22 permitem visualizar tais estatísticas para os eventos ocorridos na BHRJ, também considerando a precipitação efetiva estimada pelos métodos do Índice ϕ , CN e CN modificado, respectivamente.

Tabela 17 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	0,80	0,81	0,91	0,86	0,96	0,78	0,94	0,96	0,95	0,93	0,98	0,95	26,80	31,20	23,64	16,67	1,91	34,41
2	0,69	0,61	0,95	0,80	0,97	0,27	0,91	0,91	0,97	0,89	0,98	0,91	20,82	28,02	12,65	7,03	5,01	86,25
3	-1,36	-1,57	0,98	0,83	0,95	-2,85	-0,17	-0,18	0,99	0,79	0,96	-0,34	47,56	54,03	5,31	22,41	6,49	104,82
4	0,69	0,69	0,98	0,93	0,99	-0,38	0,85	0,85	0,99	0,94	0,99	0,52	20,37	26,52	4,72	18,68	5,39	45,35
5	-1,81	-1,83	0,91	-1,79	0,88	-2,27	-0,62	-0,61	0,96	-0,62	0,94	-0,63	57,65	66,49	35,32	63,25	34,51	93,24
6	-0,82	-1,09	0,99	0,90	0,97	-2,72	0,50	0,46	0,98	0,95	0,97	0,20	49,37	56,12	2,85	24,95	2,67	103,14
7	0,66	0,66	0,96	0,61	0,99	0,82	0,92	0,92	0,98	0,90	1,00	0,97	47,55	51,63	21,97	46,80	0,65	41,12
8	0,67	0,62	0,92	0,42	0,94	-0,08	0,86	0,86	0,96	0,75	0,97	0,67	1,54	1,02	27,89	6,95	16,20	35,37
9	0,94	0,95	0,92	-0,90	0,98	0,96	0,98	0,97	0,97	-0,21	0,99	0,98	14,12	9,27	2,04	34,33	0,36	1,86
10	0,23	0,01	0,88	0,13	0,94	0,68	0,70	0,65	0,95	0,42	0,97	0,87	20,46	24,28	2,39	40,22	3,12	17,24
11	-0,12	-0,35	0,96	0,00	0,96	0,39	0,79	0,77	0,99	0,33	0,98	0,90	64,00	69,73	9,27	31,94	13,58	56,04
12	0,05	-0,10	0,95	0,51	0,96	0,00	0,69	0,66	0,97	0,80	0,98	0,69	15,66	26,26	21,08	0,38	13,17	38,64

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

Tabela 18 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	0,63	0,66	0,77	0,49	0,81	0,63	0,83	0,85	0,88	0,69	0,91	0,83	16,08	15,20	16,05	30,58	7,95	20,73
2	0,60	0,52	0,93	0,87	0,98	-0,62	0,87	0,86	0,96	0,94	0,99	0,63	17,00	28,45	22,70	5,22	9,53	69,54
3	0,44	0,29	0,94	0,86	0,99	-0,58	0,53	0,52	0,95	0,92	0,99	0,23	28,55	35,96	5,07	21,75	5,46	71,27
4	-1,77	-1,87	0,96	0,23	0,87	-3,66	0,08	0,07	0,98	0,56	0,94	-0,19	27,00	35,07	10,32	17,67	20,76	86,33
5	-1,30	-1,30	0,89	-1,31	0,88	-1,64	-0,56	-0,55	0,95	-0,58	0,93	-0,61	23,05	29,42	36,27	27,29	35,65	49,50
6	0,40	0,26	0,97	0,91	0,98	-0,66	0,76	0,73	0,98	0,94	0,98	0,51	19,06	29,09	6,67	22,60	1,44	59,22
7	0,85	0,84	0,97	0,83	0,99	0,92	0,97	0,97	0,98	0,96	1,00	0,99	34,64	39,99	13,94	35,07	4,33	31,95
8	0,90	0,91	0,95	0,94	0,99	0,76	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,96	9,05	2,32	23,25	9,04	7,72	25,35
9	0,93	0,95	0,92	-0,84	0,98	0,95	0,97	0,97	0,97	-0,09	0,99	0,98	15,28	9,16	1,67	29,46	0,27	2,28
10	0,79	0,58	0,71	0,52	0,76	0,73	0,91	0,86	0,94	0,88	0,93	0,93	8,20	20,62	26,38	44,06	16,73	28,08
11	0,13	-0,09	0,95	-0,01	0,95	0,50	0,85	0,83	0,99	0,43	0,98	0,93	55,40	66,10	11,35	23,53	13,91	56,57
12	0,77	0,65	0,86	0,88	0,89	0,73	0,95	0,93	0,96	0,97	0,97	0,95	15,38	30,93	2,66	6,01	0,14	28,28

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

Tabela 19 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHAC, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	0,64	0,67	0,79	0,50	0,83	0,64	0,84	0,85	0,89	0,69	0,92	0,83	16,09	15,12	17,20	30,42	8,94	18,18
2	0,59	0,52	0,94	0,92	0,98	-0,62	0,87	0,86	0,97	0,97	0,99	0,63	17,38	28,41	21,17	7,03	9,54	69,49
3	0,43	-0,11	0,94	0,86	0,99	-0,58	0,53	0,36	0,95	0,92	0,99	0,23	28,64	49,09	5,14	21,70	5,52	71,38
4	-1,77	-1,87	0,96	0,23	0,87	-3,65	0,08	0,07	0,98	0,56	0,94	-0,19	26,92	34,98	10,38	17,73	20,80	86,21
5	-1,31	-1,30	0,89	-1,31	0,88	-1,64	-0,56	-0,55	0,95	-0,58	0,93	-0,61	23,51	29,44	36,26	27,31	35,64	49,53
6	0,40	0,26	0,97	0,91	0,98	-0,66	0,76	0,73	0,98	0,94	0,98	0,51	19,53	29,03	6,62	22,63	1,47	59,14
7	0,83	0,83	0,96	0,79	0,99	0,92	0,96	0,96	0,98	0,94	1,00	0,99	33,37	36,02	17,01	31,65	0,13	27,19
8	0,90	0,91	0,95	0,94	0,99	0,76	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,96	9,04	2,30	23,24	9,02	7,72	25,36
9	0,93	0,95	0,92	-0,83	0,98	0,96	0,97	0,97	0,97	-0,09	0,99	0,98	15,51	9,40	1,93	29,65	0,08	2,01
10	0,79	0,49	0,70	0,51	0,75	0,82	0,90	0,84	0,94	0,88	0,93	0,95	8,75	24,61	26,68	44,49	17,22	23,40
11	0,10	-0,10	0,95	-0,01	0,95	0,50	0,85	0,83	0,99	0,44	0,98	0,93	56,82	66,09	11,26	23,57	13,68	56,44
12	0,79	0,73	0,89	0,88	0,89	0,73	0,95	0,95	0,97	0,97	0,97	0,95	13,37	26,73	0,14	5,99	0,16	28,27

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

Tabela 20 - Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHRJ, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	-3,31	-3,49	0,96	-5,94	0,98	-0,90	0,26	0,24	0,98	-0,01	0,99	0,58	120,91	123,66	11,88	174,29	5,87	70,37
2	-2,58	-3,28	0,97	-17,90	0,98	-5,41	0,33	0,28	0,99	-0,32	0,99	0,05	106,35	119,54	7,88	497,51	3,75	178,47
3	-7,66	-8,22	0,97	-8,62	0,96	-3,24	-0,38	-0,37	0,99	-0,37	0,98	-0,12	186,30	223,80	2,46	244,93	10,72	82,98
4	0,59	0,49	0,97	-1,63	0,99	0,53	0,91	0,91	0,99	0,50	1,00	0,90	34,92	40,96	5,07	84,16	0,94	43,35
5	-3,70	-3,76	0,99	-6,43	0,99	-3,46	-0,10	-0,10	1,00	-0,39	1,00	-0,08	100,50	102,75	2,79	151,64	4,15	97,44
6	0,40	0,11	0,97	-8,44	0,97	-0,97	0,85	0,80	0,99	0,02	0,98	0,59	46,90	56,79	1,55	326,14	0,99	98,89
7	-0,60	-0,99	0,85	-8,70	0,81	-0,84	0,86	0,82	0,93	0,24	0,91	0,82	95,23	103,95	5,63	297,34	0,72	106,99
8	-2,37	-2,86	0,96	-9,85	0,97	-2,68	0,26	0,22	0,98	-0,30	0,99	0,21	83,67	91,90	8,63	266,70	9,02	94,74
9	-5,00	-5,54	0,91	-20,38	0,92	-5,14	0,15	0,15	0,97	-0,23	0,96	0,16	209,13	222,94	20,04	669,35	12,07	227,74
10	-0,22	-0,38	0,91	-16,22	0,91	-3,02	0,76	0,75	0,97	-0,14	0,95	0,41	84,23	86,02	21,44	552,07	8,49	179,65
11	-6,97	-7,22	0,90	-15,64	0,95	-3,05	0,21	0,21	0,97	-0,13	0,98	0,51	202,88	206,64	0,45	385,45	4,11	133,56
12	-2,54	-2,94	0,97	-12,57	0,96	-2,71	0,23	0,21	0,98	-0,31	0,98	0,21	106,56	115,79	6,52	399,04	4,47	119,00
13	-2,03	-2,41	0,87	-12,87	0,87	-2,13	0,60	0,58	0,96	0,03	0,93	0,59	141,96	160,91	24,83	445,78	12,71	162,11
14	0,02	-0,12	0,98	-13,37	0,99	-3,00	0,83	0,83	0,99	-0,13	0,99	0,41	69,70	71,93	3,35	449,88	0,85	161,67
15	-0,06	-0,06	0,99	-8,11	0,99	-1,71	0,73	0,73	1,00	-0,13	1,00	0,37	46,14	47,69	3,42	242,06	4,09	78,96
16	-1,60	-2,20	0,95	-17,41	0,93	-4,11	0,61	0,57	0,98	-0,17	0,96	0,37	104,92	118,02	0,30	498,62	0,14	176,53
17	-1,61	-2,16	0,98	-13,50	0,99	-4,00	0,39	0,33	0,99	-0,32	0,99	0,06	83,66	95,40	5,01	429,65	4,20	147,84
18	0,40	0,19	0,98	-6,86	0,97	-0,61	0,92	0,89	0,99	0,10	0,98	0,75	55,95	77,95	0,37	243,40	7,02	111,15
19	-0,11	-0,22	0,95	-13,40	0,98	-3,38	0,76	0,76	0,98	-0,29	0,99	0,27	51,67	53,66	10,39	377,87	8,40	133,88
20	-0,08	-0,35	1,00	-6,37	0,99	-0,31	0,71	0,66	1,00	-0,10	1,00	0,65	52,34	59,14	0,54	213,61	1,58	61,61

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

Tabela 21 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHRJ, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	-2,35	-2,48	0,88	-4,65	0,98	-0,31	0,44	0,42	0,94	0,14	0,99	0,73	102,29	108,68	13,06	156,76	4,58	60,11
2	-0,10	-0,32	0,42	-5,60	0,96	-1,18	0,84	0,81	0,75	0,12	0,98	0,66	64,28	77,83	4,91	197,08	5,52	95,74
3	-6,87	-7,23	0,97	-7,50	0,97	-2,77	-0,36	-0,36	0,99	-0,36	0,99	-0,02	154,99	178,24	2,21	185,95	7,90	77,43
4	0,59	0,49	0,97	-1,62	0,99	0,53	0,91	0,91	0,99	0,50	1,00	0,90	34,92	40,78	5,19	83,92	0,87	43,35
5	-4,07	-4,20	0,54	-7,35	1,00	-3,85	-0,07	-0,07	0,78	-0,35	1,00	-0,05	116,24	122,23	0,25	216,09	2,32	117,43
6	-0,35	-0,61	-0,27	-5,90	0,93	-1,51	0,57	0,51	0,51	-0,03	0,98	0,31	36,62	41,18	5,27	252,94	3,17	73,99
7	0,68	0,66	0,00	-0,73	0,76	0,71	0,95	0,95	0,47	0,74	0,89	0,95	17,96	23,02	19,88	111,37	8,90	24,17
8	-0,64	-0,86	0,57	-6,05	0,98	-0,73	0,69	0,67	0,79	0,03	0,99	0,67	67,25	79,16	10,11	198,37	5,78	78,90
9	-0,12	-0,21	0,37	-2,56	0,47	-0,19	0,65	0,64	0,84	0,17	0,84	0,64	49,08	48,22	80,92	132,35	52,85	48,74
10	0,51	0,43	0,39	-4,89	0,92	-0,70	0,92	0,91	0,74	0,24	0,96	0,72	58,06	63,50	15,29	230,63	8,91	110,07
11	-2,12	-2,27	0,72	-6,65	0,93	-0,30	0,34	0,33	0,85	-0,01	0,97	0,62	93,65	96,06	28,43	210,35	4,72	49,79
12	-1,48	-1,73	0,87	-7,76	0,96	-1,53	0,45	0,42	0,93	-0,21	0,98	0,43	76,28	93,79	8,26	215,83	3,28	91,66
13	-1,51	-1,85	0,60	-10,21	0,87	-1,59	0,69	0,67	0,84	0,17	0,94	0,67	130,08	146,86	19,10	396,93	10,84	143,51
14	0,74	0,69	0,37	-2,88	0,97	0,19	0,96	0,95	0,70	0,48	0,99	0,90	31,62	39,03	7,02	173,72	6,06	84,48
15	0,09	-0,02	0,34	-9,05	0,94	-2,04	0,87	0,86	0,70	0,04	0,98	0,55	72,48	79,69	2,72	380,01	16,16	147,52
16	0,75	0,74	0,29	0,01	0,86	0,76	0,87	0,87	0,64	0,67	0,93	0,89	4,15	8,03	10,80	41,69	3,13	14,11
17	0,10	-0,14	0,74	-5,77	0,97	-1,14	0,68	0,63	0,88	-0,20	0,98	0,38	35,26	48,18	0,67	204,59	1,91	76,77
18	0,62	0,46	0,54	-6,40	0,96	0,05	0,95	0,93	0,77	0,18	0,98	0,88	54,35	66,18	6,82	302,55	6,20	103,49
19	0,68	0,71	0,66	-4,65	0,97	-0,46	0,93	0,95	0,82	0,04	0,99	0,67	12,79	17,02	17,20	158,03	10,26	54,86
20	0,62	0,48	0,92	-2,75	0,96	0,46	0,81	0,77	0,96	0,03	0,98	0,76	12,85	15,75	4,63	121,20	3,58	20,45

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

Tabela 22 – Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento de chuva-vazão ocorrido na BHRJ, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN modificado

Evento	C_{NS}						r						ER_{Qp}					
	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG	T	A	NA	NG	CA	CG
1	-2,23	-2,37	0,84	-4,58	0,98	-0,23	0,47	0,46	0,92	0,18	0,99	0,76	108,16	113,40	12,85	162,29	3,17	63,34
2	-0,14	-0,36	0,48	-5,59	0,97	-1,23	0,82	0,79	0,77	0,09	0,99	0,63	62,46	74,73	4,79	190,68	6,84	94,11
3	-6,96	-7,34	0,97	-7,62	0,97	-2,77	-0,37	-0,36	0,99	-0,37	0,99	-0,02	155,92	178,02	2,33	180,43	7,53	77,43
4	0,59	0,49	0,97	-1,62	0,99	0,53	0,91	0,91	0,99	0,50	1,00	0,90	34,92	40,78	5,19	83,92	0,87	43,35
5	-4,08	-4,21	0,54	-7,36	1,00	-3,86	-0,07	-0,07	0,78	-0,35	1,00	-0,05	116,43	122,42	0,16	216,32	2,25	117,61
6	-0,35	-0,61	-0,26	-5,90	0,93	-1,51	0,56	0,51	0,51	-0,03	0,98	0,31	36,62	41,18	5,30	252,94	3,17	73,99
7	0,73	0,67	0,39	-1,37	0,89	0,71	0,97	0,96	0,68	0,59	0,95	0,96	21,93	27,39	19,19	122,87	7,53	28,48
8	-1,31	-1,66	0,74	-8,00	0,97	-1,52	0,53	0,50	0,88	-0,12	0,99	0,49	74,23	86,38	9,75	230,72	8,19	88,37
9	-0,36	-0,47	0,35	-3,37	0,26	-0,46	0,59	0,58	0,79	0,09	0,78	0,58	48,72	51,26	72,89	188,24	51,39	52,18
10	0,51	0,44	0,48	-4,55	0,93	-0,70	0,92	0,91	0,78	0,16	0,96	0,70	55,38	60,65	14,43	166,81	10,17	103,34
11	-2,26	-2,41	0,76	-6,96	0,95	-0,36	0,33	0,32	0,87	-0,02	0,98	0,62	100,14	102,62	26,04	220,74	6,71	54,81
12	-1,49	-1,74	0,88	-7,80	0,96	-1,55	0,44	0,42	0,94	-0,21	0,98	0,42	76,34	93,84	8,28	214,10	3,48	91,61
13	-1,56	-1,89	0,64	-10,34	0,88	-1,63	0,67	0,65	0,86	0,15	0,94	0,66	128,16	145,09	18,95	404,80	10,06	140,77
14	0,74	0,21	0,37	-2,88	0,95	0,19	0,96	0,96	0,70	0,48	0,98	0,90	31,62	73,19	7,02	173,72	9,86	84,48
15	0,09	-0,01	0,38	-8,68	0,95	-1,98	0,86	0,85	0,71	0,02	0,98	0,54	71,40	78,17	2,40	368,62	15,02	143,90
16	0,88	0,80	0,68	-1,28	0,91	0,53	0,94	0,90	0,83	0,34	0,96	0,80	0,84	11,67	6,59	66,16	14,22	24,52
17	0,02	-0,25	0,75	-6,10	0,96	-1,29	0,66	0,61	0,89	-0,21	0,98	0,36	37,26	51,91	2,70	213,14	1,11	81,74
18	0,59	0,42	0,81	-6,65	0,96	-0,27	0,94	0,92	0,90	0,15	0,98	0,79	55,62	67,95	6,83	296,92	5,60	105,16
19	0,68	0,70	0,66	-4,79	0,97	-0,50	0,93	0,94	0,82	0,04	0,99	0,66	13,98	18,04	16,96	163,55	10,11	57,13
20	0,64	0,51	0,92	-2,61	0,94	0,49	0,82	0,78	0,96	0,04	0,97	0,77	10,95	13,49	5,59	116,51	1,53	18,12

T = HU Triangular; A = HU Adimensional; NA = HUI Nash Ajustado; NG = HUI Nash Geomorfológico; CA = HUI Clark Ajustado; CG = HUI Clark Geomorfológico

No intuito de facilitar a comparação entre os diferentes modelos de HU e HUI analisados neste estudo, bem como a influência do método de determinação de P_e , para cada bacia hidrográfica, foram calculados os valores médios das estatísticas de desempenho apresentadas nas Tabelas 17 à 22, podendo ser visualizados nas Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do Índice Φ

Método	BHAC			BHRJ		
	C_{NS}	r	ER_{Qp}	C_{NS}	r	ER_{Qp}
HUT	0,05	0,61	32,16	-1,95	0,49	99,20
HUA	-0,05	0,60	37,05	-2,27	0,47	108,97
HUIN	0,94	0,97	14,09	0,95	0,98	7,13
HUING	0,28	0,57	26,13	-11,21	-0,12	347,47
HUIC	0,96	0,98	8,59	0,96	0,98	5,21
HUICG	-0,37	0,56	54,79	-2,51	0,39	123,35

Tabela 24 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN

Método	BHAC			BHRJ		
	C_{NS}	r	ER_{Qp}	C_{NS}	r	ER_{Qp}
HUT	0,28	0,68	22,39	-0,71	0,65	61,26
HUA	0,20	0,67	28,53	-0,86	0,64	69,67
HUIN	0,90	0,96	14,69	0,54	0,79	13,14
HUING	0,36	0,63	22,69	-5,15	0,12	198,52
HUIC	0,92	0,97	10,32	0,92	0,97	8,35
HUICG	-0,16	0,60	44,09	-0,78	0,61	75,83

Tabela 25 - Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}), coeficiente de correlação (r) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, considerando a precipitação efetiva estimada pelo método do CN Modificado

Método	BHAC			BHRJ		
	C_{NS}	r	ER_{Qp}	C_{NS}	r	ER_{Qp}
HUT	0,28	0,68	22,41	-0,76	0,64	62,05
HUA	0,17	0,65	29,27	-0,95	0,63	72,61
HUIN	0,91	0,96	14,75	0,62	0,83	12,41
HUING	0,37	0,64	22,60	-5,40	0,08	201,67
HUIC	0,92	0,97	10,08	0,92	0,97	8,94
HUICG	-0,15	0,60	43,05	-0,87	0,59	77,22

Analisando os resultados contidos nas Tabelas 23, 24 e 25, pode-se constatar, considerando a estatística C_{NS} , que em média os hidrogramas

estimados de forma mais próxima aos observados foram obtidos a partir do HUIC, seguido do HUIN, com valores de C_{NS} iguais ou superiores a 0,92 para as duas bacias hidrográficas analisadas e para os três métodos de determinação de P_e . Por outro lado, ainda considerando os valores de C_{NS} , pôde-se verificar que existiu menor precisão quando da estimativa do hidrograma de ESD através do HUICG, para a BHAC, e do HUING, para a BHRJ, independente do método de determinação de P_e . O mesmo comportamento foi verificado com os resultados da estatística ER_{QP} , a qual se refere à capacidade do modelo de estimar a vazão de pico.

De forma complementar, são apresentados nas Figuras 53, 54, 55 e 56 os enquadramentos das estatísticas C_{NS} e ER_{QP} quanto à classificação de Moriasi *et al.* (2007) e Van Liew *et al.* (2007), respectivamente, considerando os eventos analisados na BHAC e na BHRJ para os diferentes métodos de determinação de P_e .

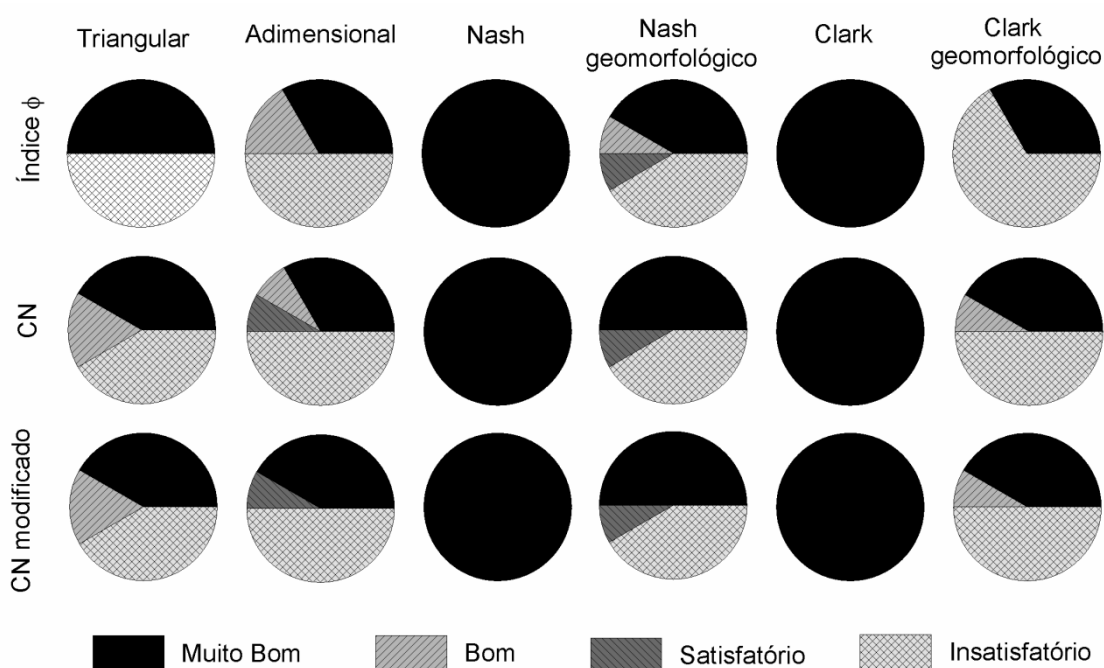


Figura 53 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Nash-Stucliff (C_{NS}), segundo classificação proposta Moriasi *et al.* (2007), considerando os eventos ocorridos na BHAC e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados

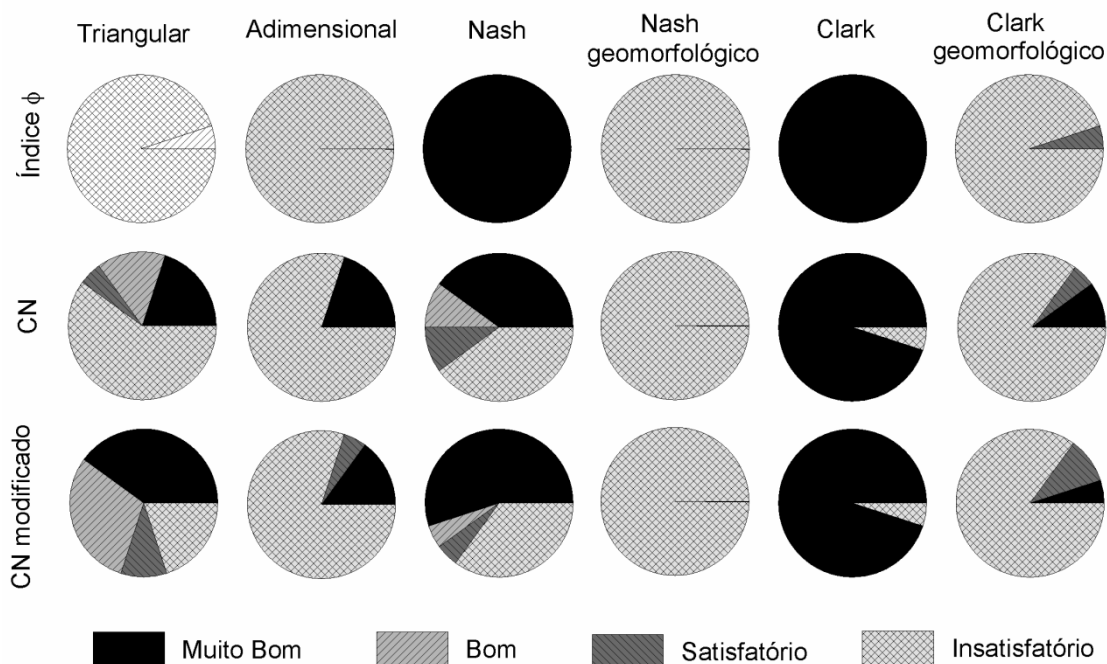


Figura 54 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Nash-Stucliffe (C_{NS}), segundo classificação proposta Moriasi et al. (2007), considerando os eventos ocorridos na BHRJ e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados

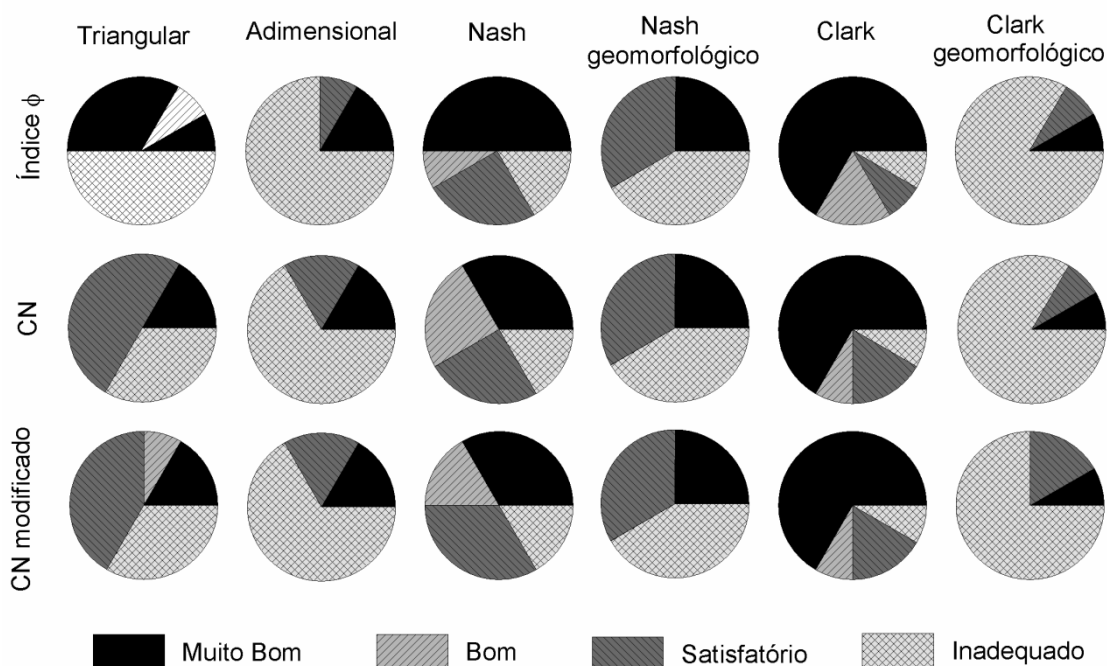


Figura 55 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Erro Relativo da Vazão de Pico (ER_{Qp}), segundo classificação proposta Van Liew et al. (2007), considerando os eventos ocorridos na BHAC e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados

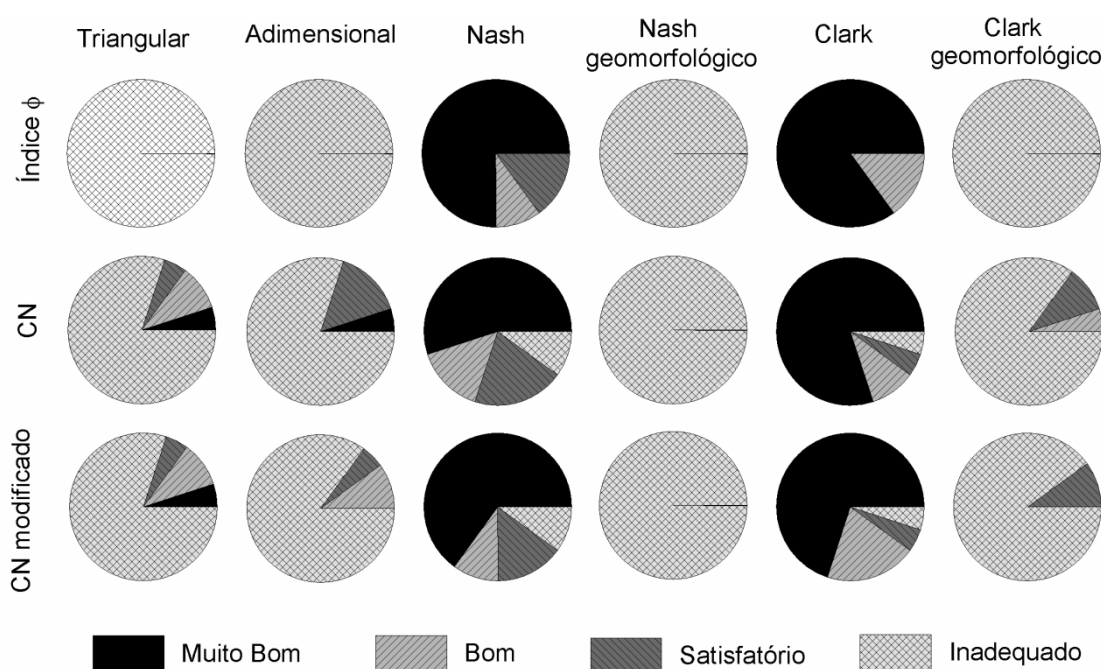


Figura 56 - Síntese dos resultados obtidos para o Coeficiente de Erro Relativo da Vazão de Pico (ER_{Qp}), segundo classificação proposta Van Liew *et al.* (2007), considerando os eventos ocorridos na BHRJ e os 3 métodos de precipitação efetiva empregados

Os resultados ilustrados nas Figuras 53, 54, 55 e 56 reforçam esta discussão, entretanto, fornecem um maior detalhamento sobre as estatísticas, haja vista que representam cada evento analisado na BHAC e na BHRJ, enquadrando nas classes propostas por Moriasi *et al.* (2007) para C_{NS} e por Van Liew *et al.* (2007) para ER_{Qp} . Os hidrogramas de ESD estimados tanto pelo HUIC quanto pelo HUIN, quando comparados aos observados para a BHAC (Figura 53), considerando a estatística C_{NS} , tiveram acurácia enquadrada como “Muito Bom”, independente do método de determinação de P_e . Já para a BHRJ (Figura 54), o modelo HUIC permitiu enquadrar um maior número de hidrogramas de ESD estimados em “Muito Bom” quando comparado ao HUIN. Destaca-se ainda que na BHRJ o método de determinação de P_e exerceu maior influência na estimativa do hidrograma de ESD.

No tocante à estatística ER_{Qp} pôde-se constatar que, para os eventos analisados na BHAC (Figura 55), o HUIC proporcionou vazões de pico de ESD estimadas com maior precisão para um maior número de eventos quando comparado aos demais modelos, enquanto que o HUICG, em termos gerais, apresentou os piores resultados. No entanto, é evidente que os modelos HUT,

HUA e HUING também resultaram em um grande número de eventos enquadrados como “Inadequado”. Para a BHRJ (Figura 56) a estimativa da vazão de pico de ESD foi melhor representada pelos modelos HUIC e HUIN, enquanto que para os modelos HUT, HUA, HUING e HUICG, foi “Inadequado”, segundo a classificação empregada, para a maior parte dos eventos, indicando que os projetistas devem ter cautela ao usarem tais modelos, especialmente na estimativa de vazões máximas.

Outros trabalhos científicos têm abordado a comparação entre diferentes modelos de HU e HUI, tais como os utilizados neste estudo, para modelagem de cheias em bacias hidrográficas, sendo os resultados e constatações, de certa forma, variáveis entre os estudos.

Khaleghi *et al.* (2011) avaliaram diferentes modelos de HU e HUI para modelagem de cheias em uma bacia hidrográfica de 68 km² localizada no Irã e observaram desempenho bastante superior do HUI geomorfoclimático proposto por Rodriguez-Iturbe, Sanabira e Caamano (1982) e do HUI geomorfológico inicialmente proposto por Rodriguez-Iturbe e Valdez (1979) em relação aos HU's triangular, Snyder e SCS (adimensional) e ao HUI Rosso. Khaleghi *et al.* (2011) destacaram que o HUI geomorfológico pode ser adotado como uma ferramenta padrão para modelagem processo de transformação de precipitação em P_e em bacias com carência de dados.

Ao avaliar os modelos de HUIN e HUIC, além de uma versão geomorfológica do HUIC, para 7 eventos em uma bacia na região central da Índia, Kumar *et al.* (2002) constaram que, com base em uma medida estatística de eficiência, o HUIN teve desempenho superior para 4 eventos, o HUIC para 1 evento, enquanto o HUIC geomorfológico gerou resultados melhores para 2 eventos. Estes autores destacam que o HUIC geomorfológico foi capaz de estimar hidrogramas de ESD razoavelmente bem comparados aos hidrogramas observados, especialmente levando em consideração que este modelo emprega diretamente características geomorfológicas da bacia, enquanto o HUIC e o HUIN são ajustados a partir de eventos monitorados.

Os modelos HUI distribuído exponencialmente (HUIDE), HUIC e HU espacialmente distribuído foram estudados por Sarangi *et al.* (2007) na modelagem de 5 eventos chuva x vazão da bacia hidrográfica St. Esprit (21,1 km²), no Canadá, os quais verificaram que o HUIDE apresentou um

desempenho melhores que os outros. Entretanto, nenhum dos modelos foi capaz de estimar satisfatoriamente o hidrograma de ESD de um evento com longa duração e intensidade baixa.

Kumar *et al.* (2004) constaram que, quando da utilização unicamente de características geomorfológicas de uma grande bacia hidrográfica na Índia, os modelos HUING e HUICG, proporcionaram a estimativa de hidrogramas de ESD com precisão razoável e similar entre os métodos.

Os modelos HUIN, HUIC, HUING e HUIC geomorfoclimático foram estudados por Adib *et al.* (2010) para uma bacia de 66,7 km² no Irã, os quais verificaram os modelos HUIC geomorfoclimático e o HUING foram capazes de estimar adequadamente os hidrogramas de ESD, destacando que, como estes modelos não requerem séries históricas de dados e calibração, os mesmos têm sido bastante empregados na área de hidrologia. Os mesmos autores destacaram que mesmo os modelos HUIN e HUIC sendo baseados em dados observados de chuva e vazão, eles podem não ser capazes de estimar os hidrogramas de ESD de determinados eventos de precipitação, em contraste aos resultados obtidos neste estudo.

Sahoo *et al.* (2006) comparam o desempenho dos modelos HUIC, HUIN e suas versões geomorfológicas para modelagem de cheias em uma bacia da Índia, e constataram que os quatro modelos geraram resultados com precisão razoável. No entanto, estes autores também destacaram que as versões geomorfológicas de HUIC e HUIN tiveram como vantagem sobre os modelos convencionais de HUIC e de HUIN o fato de não necessitarem de dados históricos e calibração de parâmetros para a estimativa de hidrogramas de ESD.

Bhaskar, Parida e Nayak (1997) analisaram os modelos HUIN e HUING em uma bacia de 615 km² na Índia e constataram que o HUIN apresentou desempenho superior, estando de acordo com os resultados encontrados neste estudo. Segundo estes autores, tal comportamento é esperado visto que os parâmetros do HUIN são derivados dos dados observados. Bhaskar, Parida e Nayak (1997) atribuem, parcialmente, o desempenho inferior do HUING ao uso da equação geomorfológica envolvendo as razões de bifurcação, área e comprimento, a velocidade e a intensidade de pico de P_e , para a estimativa dos parâmetros do HUING. Estes autores alertam que a equação geomorfológica

usada não é uma equação universal e sua transposição para esta bacia indiana é questionável. As constatações de Bhaskar, Parida e Nayak (1997) corroboram com os resultados apontados neste estudo.

Os resultados deste estudo também corroboram com os de Ghumman *et al.* (2014), os quais verificaram que o HUIC teve desempenho superior aos modelos HUIN e HUING para modelagem de hidrograma de ESD em uma bacia no Paquistão. Estes autores destacam a importância do histograma tempo-área do método HUIC, em função de considerar a variação temporal do ESD na bacia, enquanto no HUIN este componente não é contemplado. Por outro lado, o HUIN apresentou melhor desempenho para estimativa da vazão de pico por permitir considerar um maior número de atenuações do que o HUIC.

O desempenho dos modelos de HU e HUI empregados neste estudo, com relação aos hidrogramas de ESD estimados frente aos dados observados de vazão, ainda pode ser visualizado, para cada evento e com base nos três métodos de determinação de P_e , no Apêndice A, para a BHAC, e no Apêndice B, para a BHRJ.

5 Considerações finais

Com base nos resultados apresentados e discutidos neste estudo, pode-se concluir que:

- Os preceitos das técnicas de HU e de HUI foram válidos para a modelagem do hidrograma de ESD para as duas bacias hidrográficas analisadas;
- Houveram diferenças nos hidrogramas de ESD estimados nas duas bacias pelos modelos de HU e HUI empregados;
- Além de ter sido verificado o impacto das diferenças de características fisiográficas entre as bacias, especialmente aquelas vinculadas ao solo, na modelagem de cheias, também foi constatado que a diferença do padrão de chuvas entre as duas regiões exerceu influência na referida modelagem;
- O método de determinação de P_e exerceu influência significativa sobre os resultados dos diferentes métodos de HU e HUI, especialmente quando da estimativa de vazões de pico;
- O modelo HUIC foi o que estimou os hidrogramas de ESD para as duas bacias hidrográficas de forma mais satisfatória, seguido do HUIN, sendo que ambos apresentaram substancial superioridade em relação aos modelos de HU tradicionalmente empregados (HUT e HUA) e também aos modelos de HUING e HUICG;
- Os modelos de HU e HUI empregados exclusivamente a partir de características geomorfológicas não foram adequados para modelagem de cheias na BHAC e na BHRJ;
- Os modelos geomorfológicos de HUIC e HUIN apresentaram desempenhos semelhantes aos modelos tradicionais HUT e HUA, não justificando suas aplicações na BHAC e na BHRJ.

A análise realizada neste estudo, contemplando diferentes métodos que empregam a teoria de HU e HUI, para duas bacias hidrográficas com condições fisiográficas e climatológicas distintas, apresenta uma importância significativa no contexto de engenharia hidrológica, mais diretamente

relacionada à área de modelagem de cheias. Isso se deve ao fato de que os projetistas, especialmente no Brasil, têm empregado formulações empíricas e simplificadas, obtidas a partir de dados monitorados e características geomorfológicas de bacias hidrográficas específicas, na maioria das vezes sem verificar previamente a acurácia das estimativas, podendo acarretar em problemas de dimensionamento hidrológico e hidráulico, bem como de gestão de recursos hídricos.

Ainda que os resultados deste estudo tenham sido promissores em virtude de elucidar a respeito de modelos de HU e HUI mais apropriados para modelagem de cheias nas duas bacias hidrográficas, indica-se que estudos futuros nesta temática sejam desenvolvidos no intuito de:

- analisar a influência da densidade de postos pluviográficos sobre a modelagem de cheias com as técnicas de HU e HUI, especialmente no caso do HUIC e HUIN;
- avaliar os modelos HUIC, HUIN, HUICG e HUING considerando a discretização espacial em sub-bacias hidrográficas;
- avaliar alternativas para determinar I_a nos métodos CN e CN Modificado;
- investigar métodos alternativos de separação do escoamento; e
- contemplar um maior número de bacias hidrográficas experimentais para tornar a análise mais ampla, bem como para possibilitar o desenvolvimento de técnicas para estimativa dos parâmetros do HU e HUI com abordagem geomorfológica.

Referências

- ADIB, A. et al. Comparison between GclUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH and Nash-IUH models. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 34, p. 91-103, 2010. doi: 10.3906/muh-0908-1.
- AGIRRE, U. et al. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Catena**, v. 64, p. 321-332, 2005. doi: 10.1016/j.catena.2005.08.013.
- AHMAD, M. M. et al. Estimation of a unique pair of Nash model parameters: an optimization approach. **Water Resources Management**, v. 24, n. 12, p. 2971-2989, 2010. doi: 10.1007/s11269-010-9590-3.
- AHMAD, M. M.; GHUMMAN, A. R.; AHMAD, S. Estimation of Clark's Instantaneous Unit Hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2417-2435, 2009. doi: 10.1007/s11269-008-9388-8.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745-1757, 2011. doi: 10.1590/S0100-06832011000500029.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. D.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013. doi: 10.1590/S1415-43662013000100010.
- AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região sul do Rio Grande do Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 101. 2014.
- BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118. 2009.

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**, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009. doi: 10.1590/S0100-06832009000100018.

BESKOW, S. et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011. doi: 10.1016/j.catena.2011.03.010.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265-274, 2011. doi: 10.1590/S0103-90162011000300001.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological Prediction in a Tropical Watershed Dominated by Oxisols Using a Distributed Hydrological Model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013. doi: 10.1007/s11269-012-0189-8.

BHAGWAT, T. N.; SHETTY, A.; HEGDE, V. S. Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management - A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka. **Catena**, v. 87, p. 52-59, 2011. doi: 10.1016/j.catena.2011.05.007.

BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P.; NAYAK, A. K. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, p. 228-238, 1997. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:4(228).

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento Nacional Depesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica.** Recife: Ministério da Agricultura., 1973. 431 p.

BURDEN, R. L.; FAIRES, D. **Análise Numérica.** 8ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 721 p.

CARVALHO, M. E.; CHAUDRHY, F. H. Aplicação de hidrograma unitário geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, 2001.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied hydrology - a compendium of water resources technology**. New York: McGraw-Hill, 1964. 1495 p. doi: 978-0070107748.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 200 p. ISBN 9788521201304.

CLARK, C. O. Storage and the Unit Hydrograph. **Transactions American Society Civil Engineers**, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 336 p. ISBN 9788588686342.

COUNTY. **Drainage Design Manual for Mohave County**. 1^a. ed. Star Valley: Arid Hydrology & Hydraulics, 2009.

CYSNE, J. R. **Modelo conceitual para gerenciamento de recursos hídricos em ambiente SIG**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Departamento de Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 94. 2004.

EMBRAPA. **Estação Agroclimatológica de Pelotas, Convênio Embrapa/UFPEL**, 2015. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/estacao.html>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**, 2014.

FRENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.. São Carlos, p. 174. 1984.

GENOVEZ, A. M. Vazões máximas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 3, p. 33-112. ISBN 9788588686052.

GHUMMAN, A. R. et al. Development of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 4, p. 3153-3163, 2011. doi: 10.1007/s10661-011-2179-3.

GHUMMAN, A. R. et al. Comparison of Clark, Nash Geographical Instantaneous Unit Hydrograph Models for Semi Arid Regions. **Water Resources**, v. 41, n. 4, p. 364-371, 2014. doi: 10.1134/S0097807814040071.

GIBBS, M. S.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. Evaluation of parameter setting for two GIS based unit hydrograph models. **Journal of Hydrology**, v. 393, n. 8, p. 197-205, 2010. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.08.014.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 163. 2010.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação dos métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidrelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. UFRGS - Centro de Ecologia. Porto Alegre. 2010. (9788563843012).

HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. **Transactions American Geophysical Union**, v. 13, p. 350-361, 1932. doi: 10.1029/TR013i001p00350.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, a hydro-physical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

JAIN, V.; SINHA, R. Derivation of unit hydrograph from GIUH analysis for a Himalayan river. **Water Resources Management**, v. 17, n. 5, p. 355-376, 2003. doi: 10.1023/A:1025884903120.

JENA, S. K.; TIWARI, K. N. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with morphologic parameters of watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 319, p. 1-14, 2006. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.025.

KHALEGHI, M. R. et al. Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, n. 2, p. 163-171, 2011. doi: 10.1016/j.catena.2011.04.005.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

KUMAR, R. et al. Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. **Water Resources Management**, v. 16, n. 4, p. 263-278, 2002. doi: 10.1023/A:1021920717410.

KUMAR, R. et al. GIUH based Clark and Nash models for runoff estimation for an ungauged basin and their uncertainty analysis. **International Journal of River Basin Management**, v. 2, n. 4, p. 281-290, 2004. doi: 10.1080/15715124.2004.9635238.

LUXON, N.; CHRISTOPHER, M.; PIUS, C. Validating the Soil Conservation Service triangular unit hydrograph (SCS-TUH) model in estimating runoff peak discharge of a catchment in Masvingo, Zimbabwe. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 3, p. 157-162, 2013. doi: 10.5897/ijwree12.085.

LUZ, E. P. D. et al. **Ferramenta computacional "Isochrones"**: Análise na bacia hidrográfica do Arroio Pelotas visando modelagem de cheias. Anais do XXIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel. 2014. p. 1-4.

MAHL, M. et al. **Desenvolvimentno da ferramenta computacional "Isochrones" em ambiente SIG para aplicação em modelagem hidrológica.**

Anais do XXIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel. 2014. p. 1-4.

MAJIDI, A. et al. Evaluation of Sythetic Unit Hydrograph (SCS) and rational methods in peak flow estimation (case study: Khoshehayeh Zarrin watershed, Iran). **International Journal of Hydraulic Engineering**, v. 1, n. 5, p. 43-47, 2012. doi: 10.5923/j.ijhe.20120105.03.

MELLO, C. R. D. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008. doi: 10.1016/j.catena.2008.07.002.

MELLO, C. R. D.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. D. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007. doi: 10.1590/S1415-43662007000400011.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p. ISBN 9788581280296.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007. doi: 10.1590/S1415-43662007000400011.

MISHRA, S. K. et al. A modified SCA-CN method: Characterization and testing. **Water Resources Management**, v. 17, n. 1, p. 37-68, 2003. doi: 10.1023/A:1023099005944.

MISHRA, S. K. et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v. 20, n. 5, p. 646-660, 2006. doi: 10.1007/s11269-005-9000-4.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007. doi: 10.13031/2013.23153.

NASH, J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph. **International Association of Scientific Hydrology**, v. 45, n. 3, p. 114-121, 1957.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NGUYEN, H. Q.; MAATHUIS, B. H. P.; RIENTJES, T. H. M. Catchment storm runoff modelling using the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. **Geocarto International**, v. 24, n. 5, p. 357-375, 2009. doi: 10.1080/10106040802677011.

NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. **Catena**, v. 76, n. 3, p. 206-214, 2009. doi: 10.1016/j.catena.2008.11.008.

PAIVA, E. M. C. D. D. Rede de monitoramento hidrológico. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 17, p. 493-506. ISBN: 9788588686052.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.06.007.

PERROTTA, M. M. **Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico – Programa ENVI**. Belo Horizonte: CPRM, 2005. 43 p.

QUINTELA, A. C.; PORTELA, M. M. A modelagem hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 51-64, 2002.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p. doi: 9788122418255.

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

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; SANABIRA, M. G.; CAAMANO, G. On the climatic dependence of the IUH: a rainfall-runoff analysis of the Nash model and the geomorphoclimatic theory. **Water Resources Research**, v. 18, n. 4, p. 887-903, 1982. doi: 10.1029/WR018i004p00887.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; VALDEZ, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979. doi: 10.1029/WR015i006p01409.

SABOL, G. V. Clark Unit Hydrograph and R-parameter estimation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 103-111, 1988. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(103).

SAHOO, B. et al. Flood estimation by GIUH-Based Clark and Nash Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 6, 2006. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(515).

SANTOS, S. et al. **Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelagem Hidrológica**. XII Congresso Nacional de Tecnologias de la información Geográfica. Granada: [s.n.]. 2006. p. 465-479.

SARANGI, A. et al. Evaluation of three unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed. **Water Resources Management**, v. 21, n. 7, p. 1127-1143, 2007. doi: 10.1007/s11269-006-9072-9.

SCHUMM, S. Evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy, New Jersey. **Bulletin of Geological Society of America**, v. 67, p. 597-646, 1956.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

SILVA, J. M. A. et al. Modelo para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 78-84, 2009. doi: 10.5039/agraria.v4i1a13.

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

SORMAN, A. U. Estimation of peak discharge using GIUH model in Saudi Arabia. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 4, p. 287-293, 1995. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:4(287).

ŠRAJ, M.; DIRNBEK, L.; BRILLY, M. The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 58, n. 1, p. 3-14, 2010. doi: 10.2478/v10098-010-0001-5.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of Geomorphology. **Geological Society America Bulletin**, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952. doi: 10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957. doi: 10.1029/TR038i006p00913.

SULE, B. F.; ALABI, S. A. Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 11, p. 639-647, 2013. doi: 10.5897/ijwree2013.0437.

TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v. 20, p. 137-157, 2007.

TOMAZ, P. Método do SCS. In: TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. [S.l.]: [s.n.], 2013. Cap. 38, p. 1-26.

- TONELLO, K. C. et al. Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhães - MG. **Revista Árvore**, 30, n. 5, 2006. 849-857.
- TUCCI, C. E. M. . P. R. L. . B. M. T. **Drenagem Urbana**. [S.l.]: UFRGS/ABRH, 1995. 428 p. ISBN 8570253658.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p. ISBN 8570258232.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.
- VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.
- VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região do Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120. 2008.
- VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** , v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009. doi: 10.1590/S1415-43662009000500011.
- VIOLA, M. R. et al. Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande river basin headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management** , v. 28, n. 13, p. 4537-4550, 2014. doi: 10.1007/s11269-014-0749-1.
- ZELAZINSKI, J. Application of the geomorphological instantaneous unit hydrograph theory to development of forecasting models in Poland. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 2, p. 263-270, 1986. doi: 10.1080/02626668609491043.

Apêndices

Apêndice A – Análise comparativa entre os modelos de HU e HUI empregados neste estudo, considerando as três metodologias de determinação de P_e , para os eventos analisados na BHAC

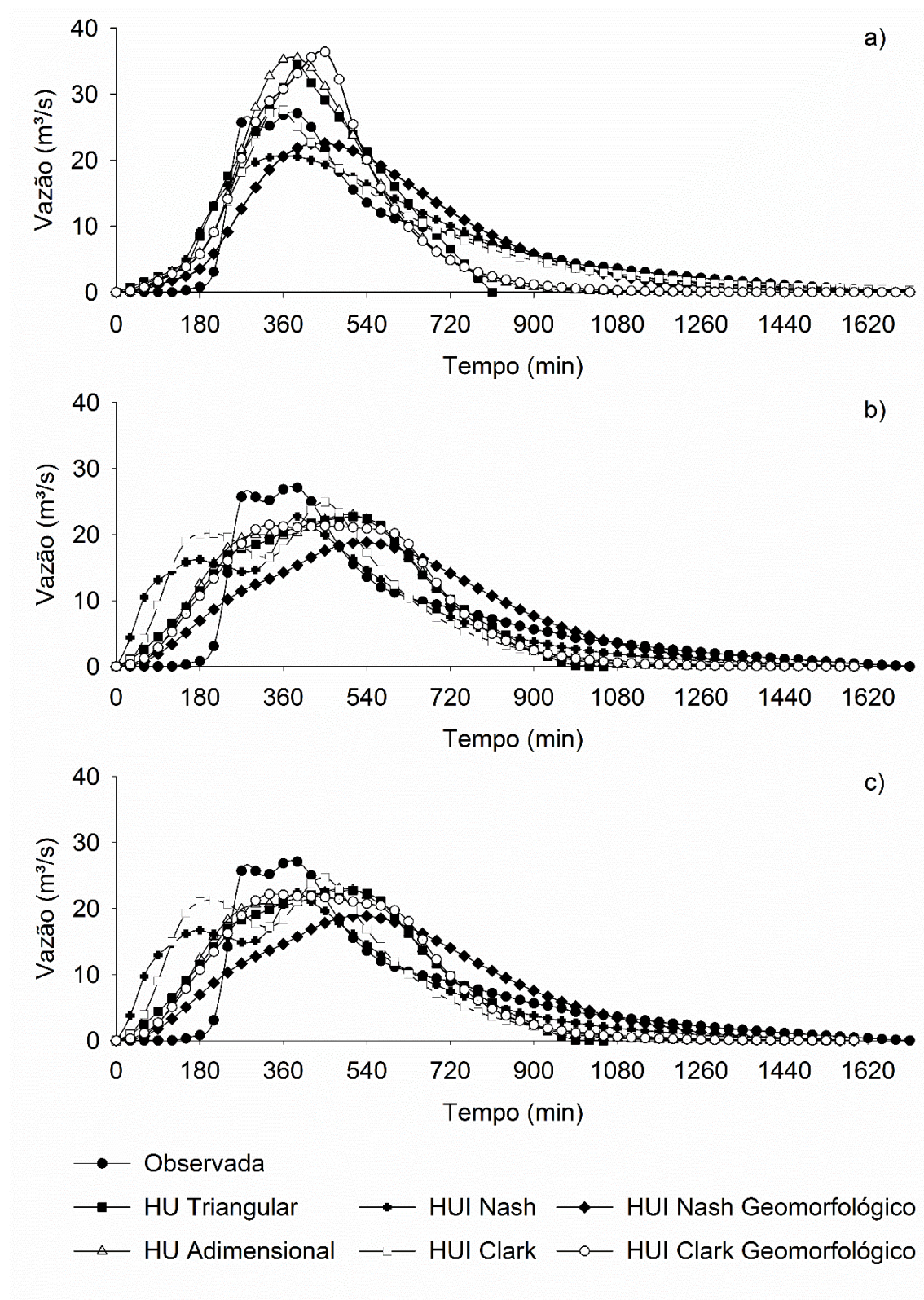


Figura 1A – Evento 1 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

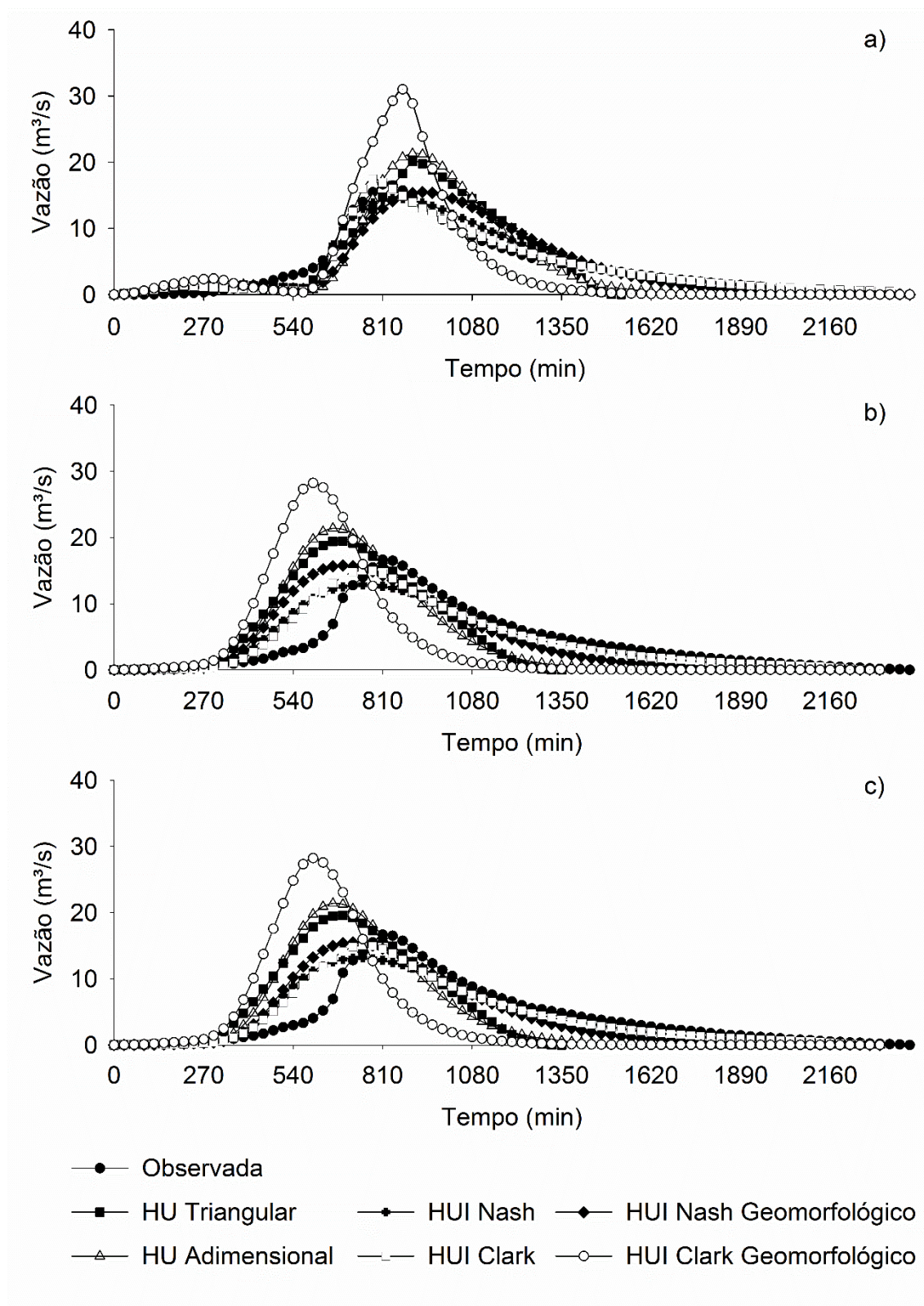


Figura 2A – Evento 2 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

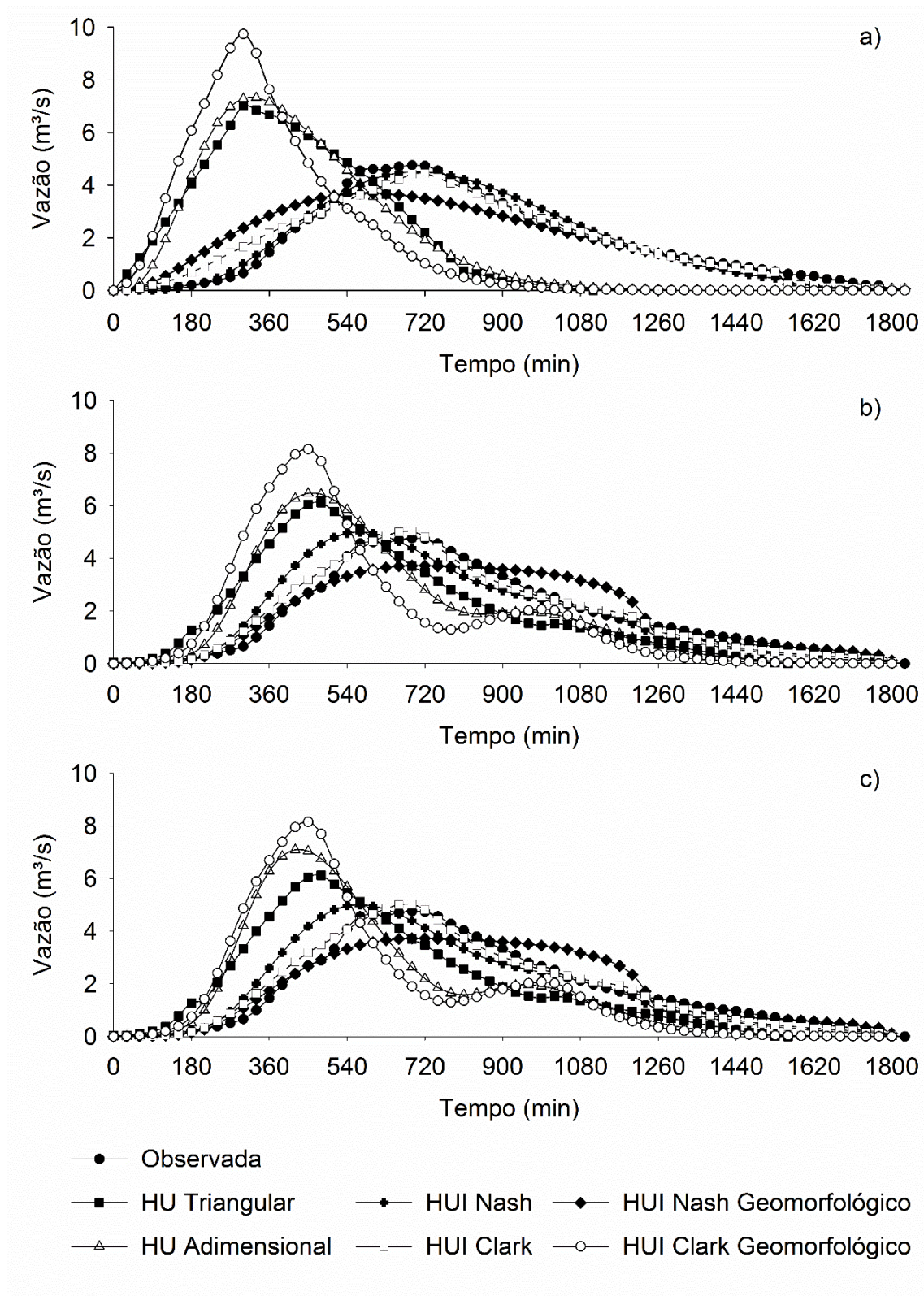


Figura 3A – Evento 3 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

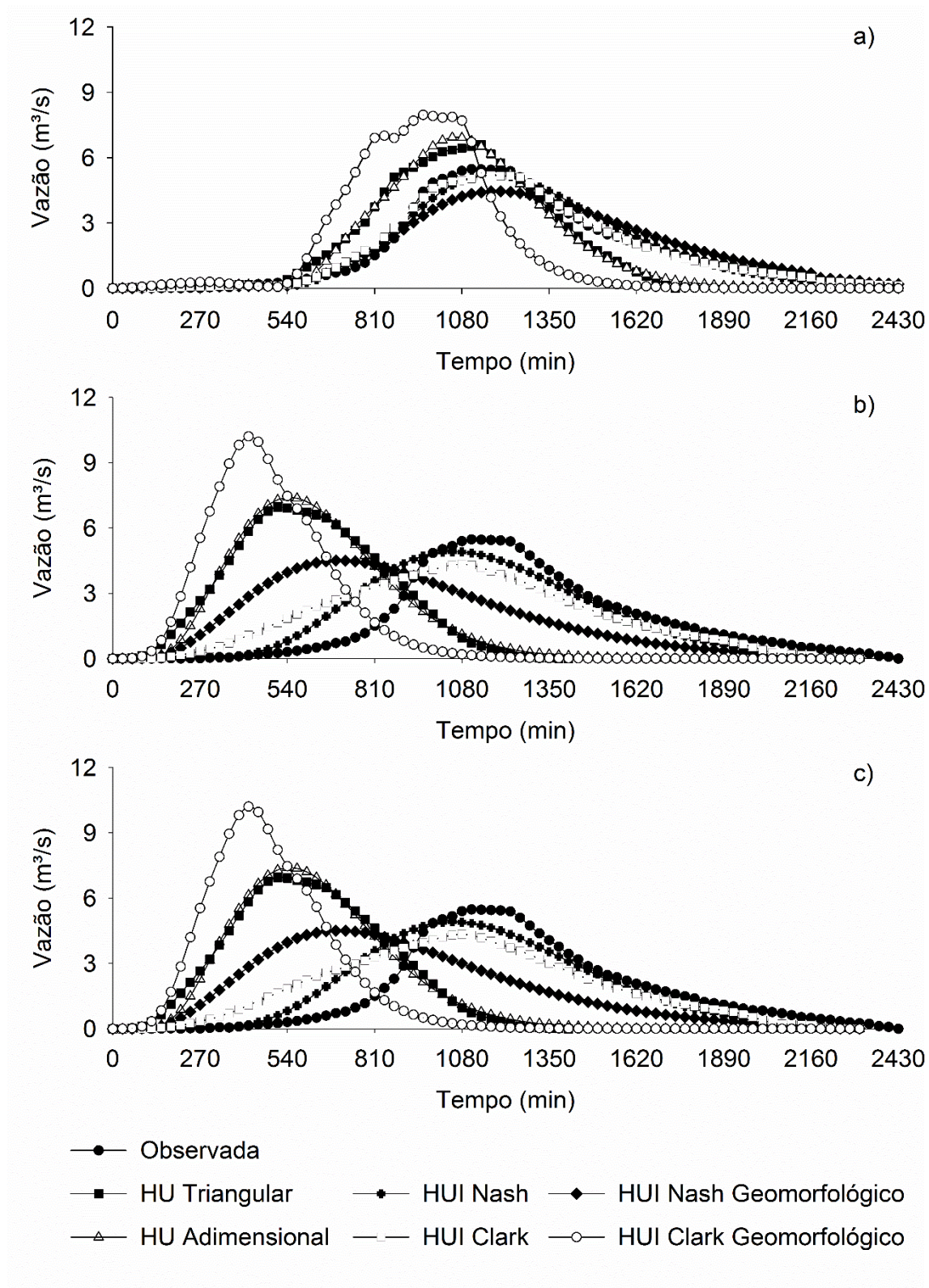


Figura 4A – Evento 4 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

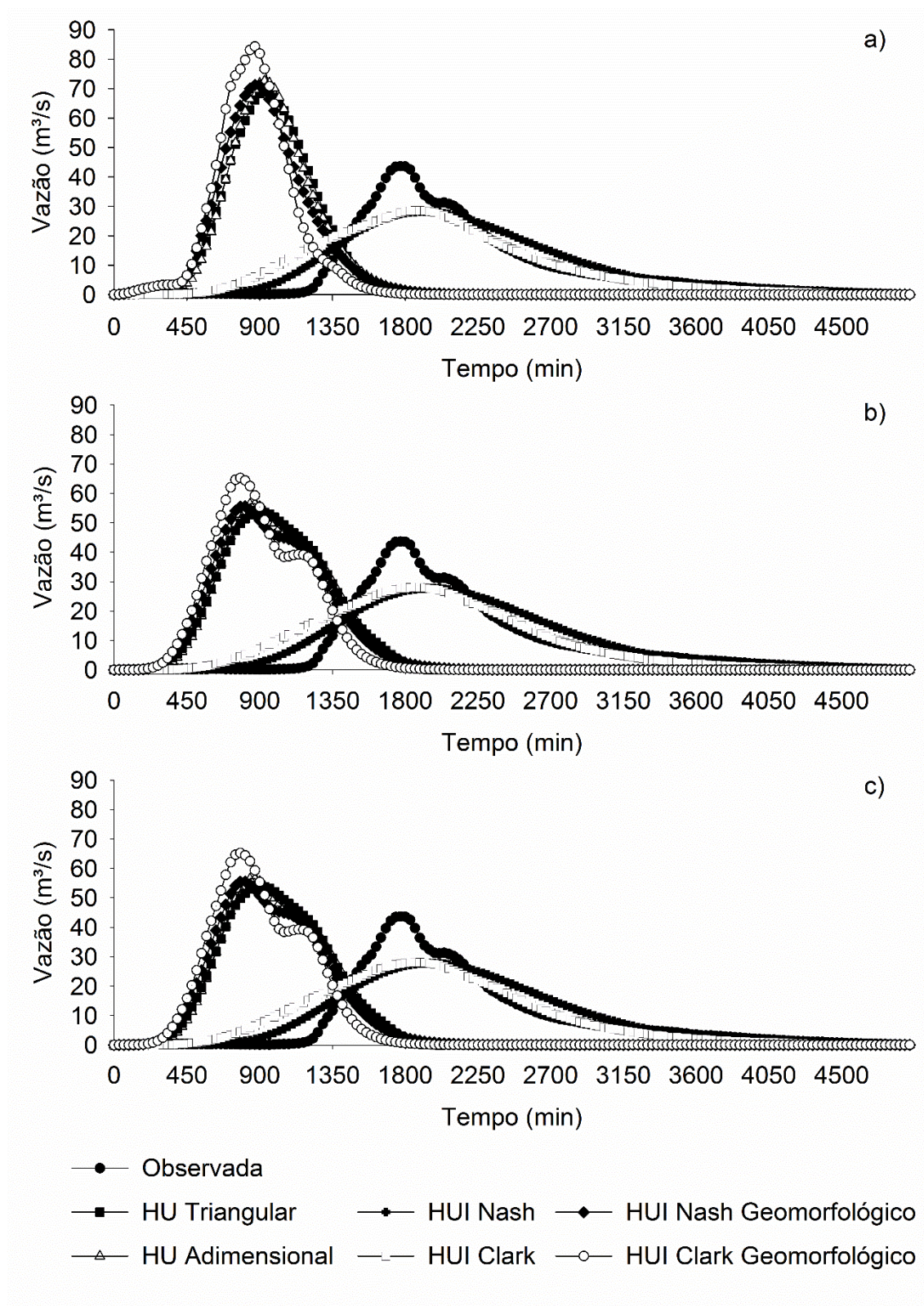


Figura 5A – Evento 5 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

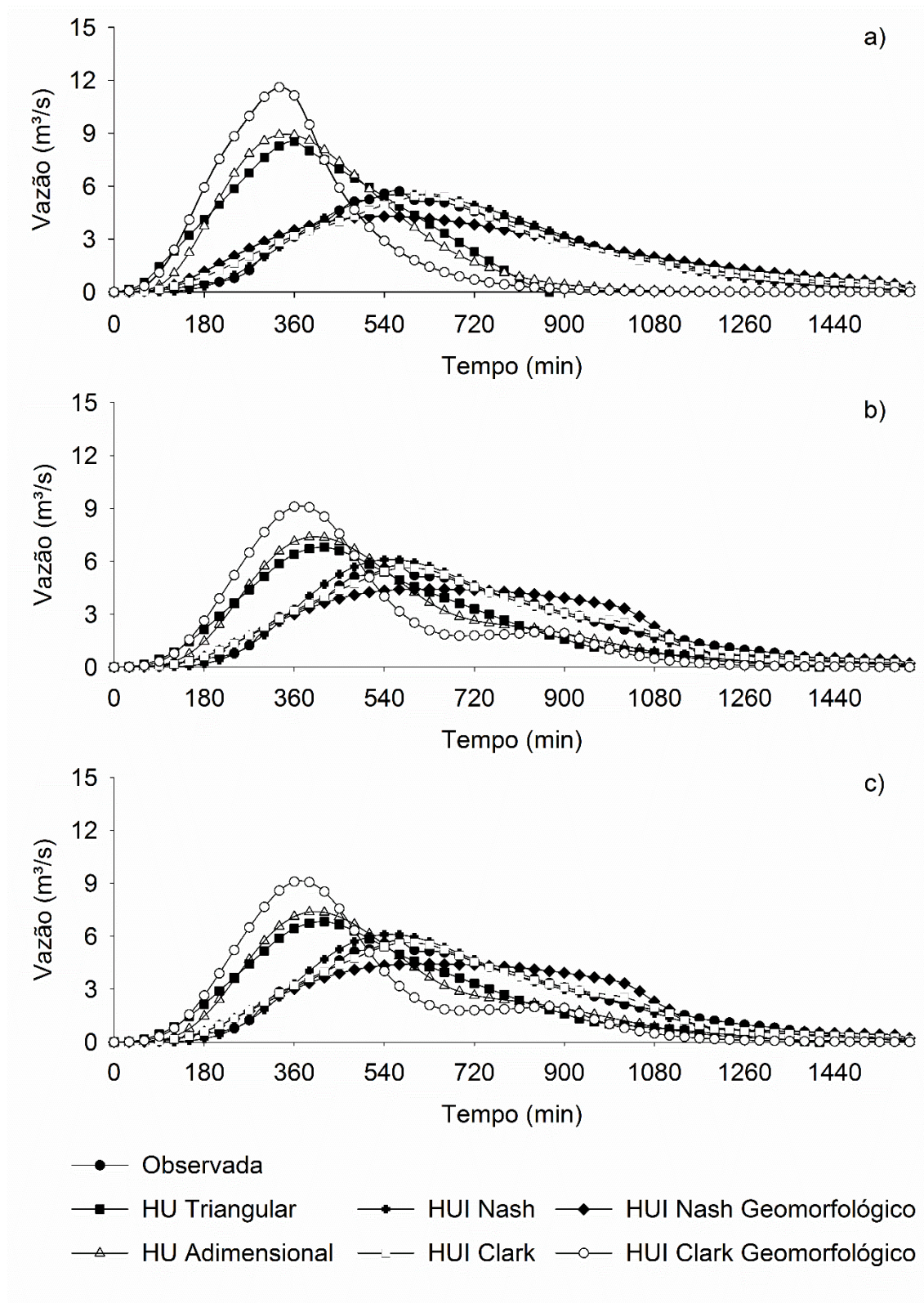


Figura 6A – Evento 6 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

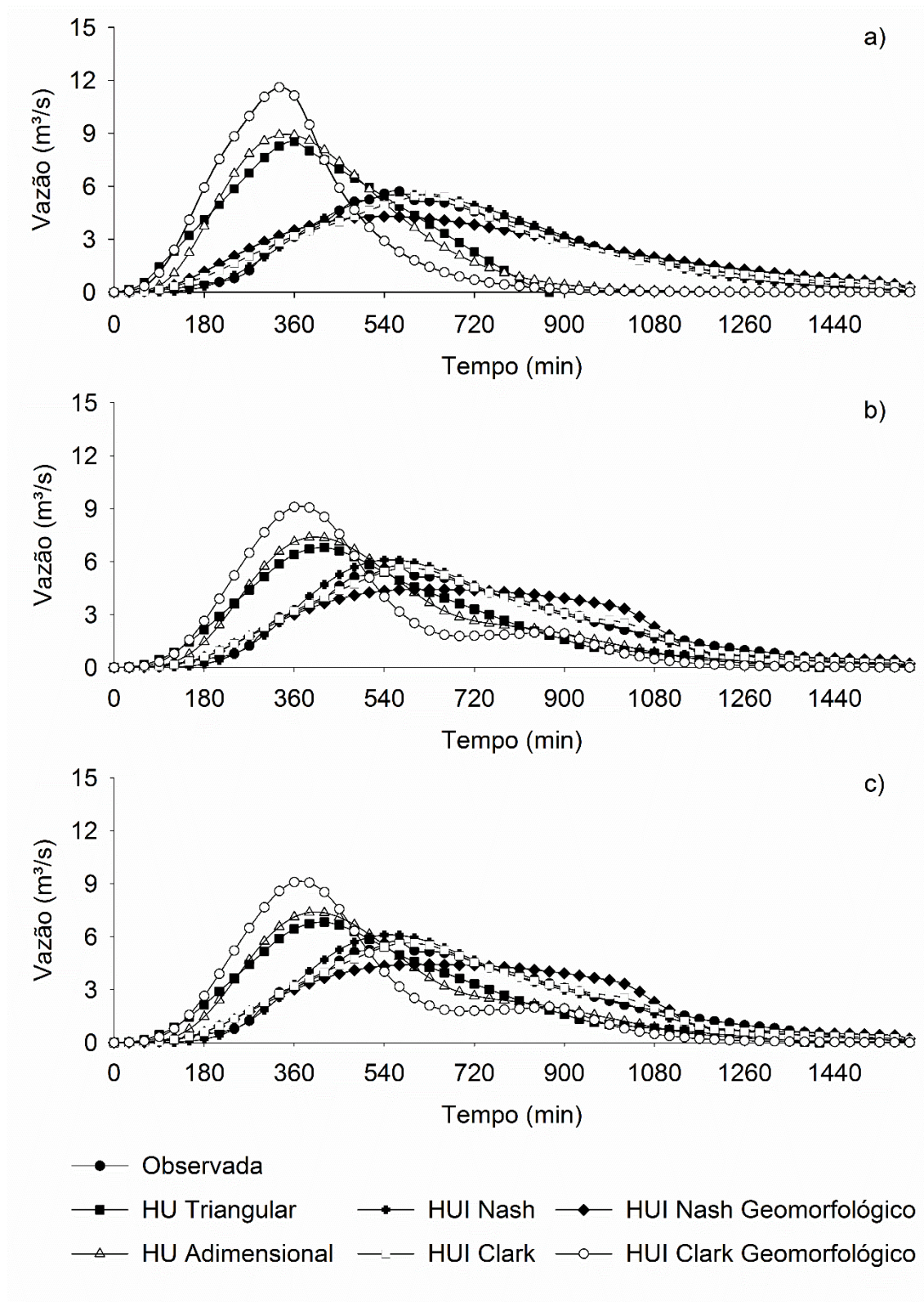


Figura 7A – Evento 7 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

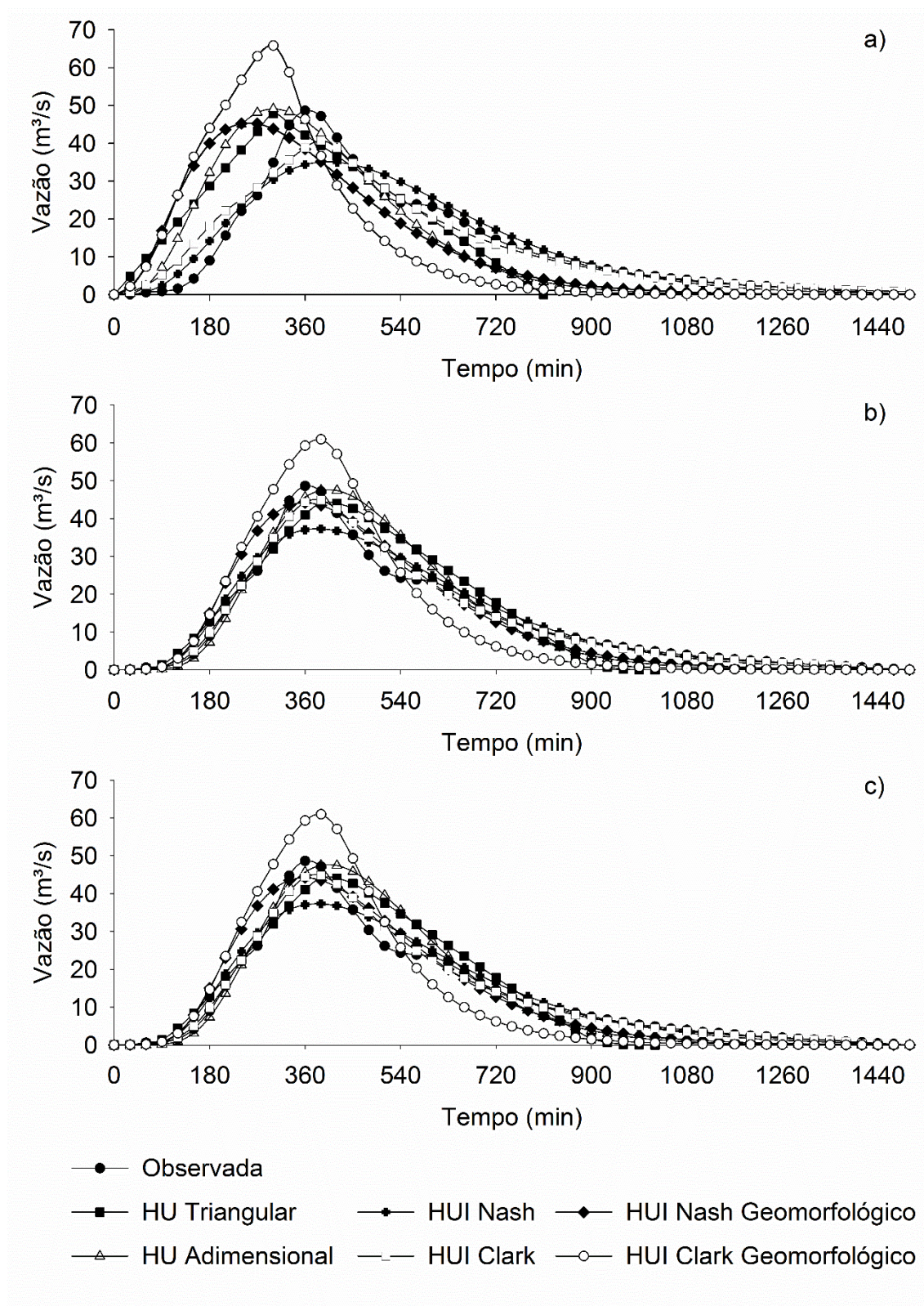


Figura 8A – Evento 8 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

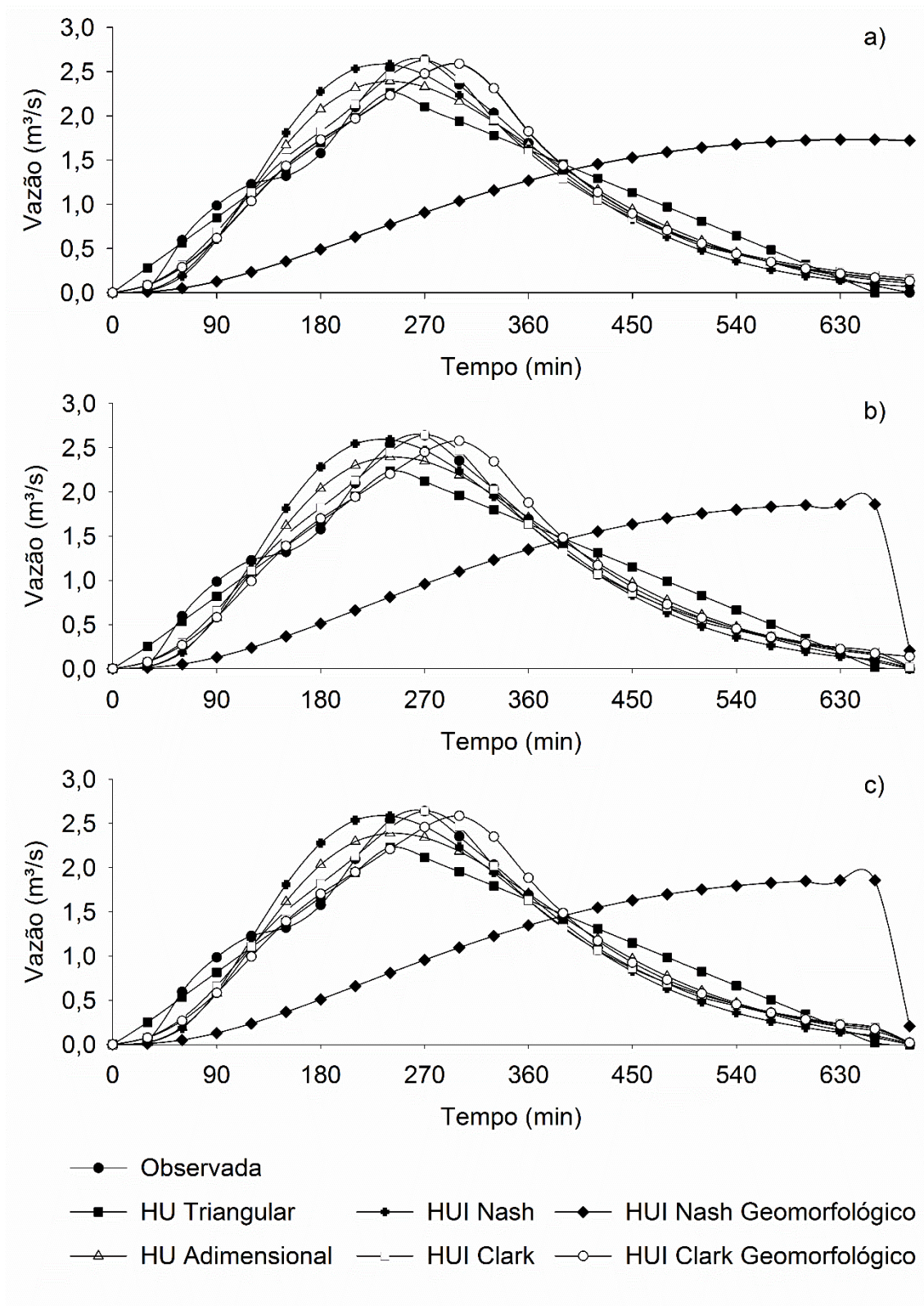


Figura 9A – Evento 9 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

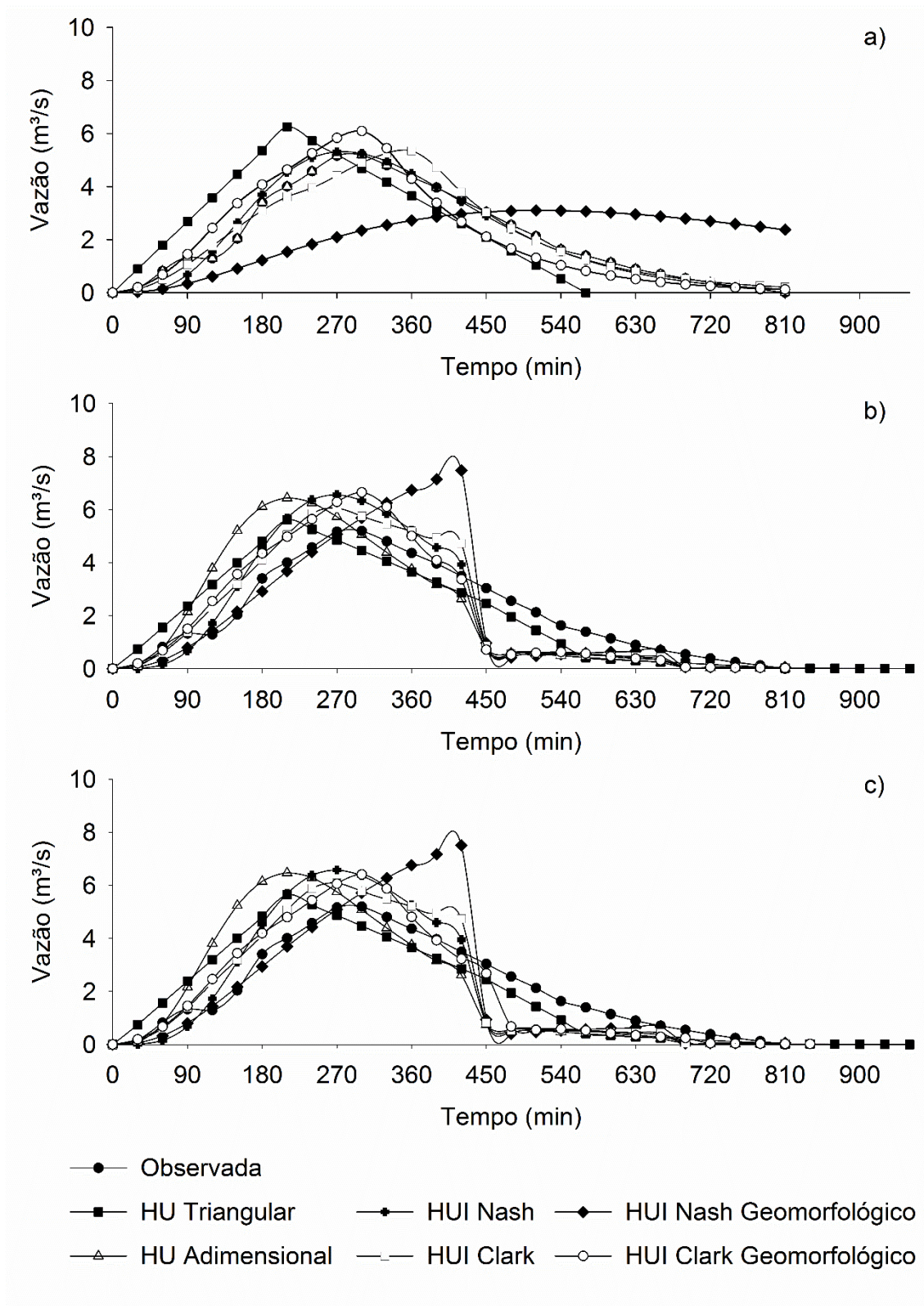


Figura 10A – Evento 10 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

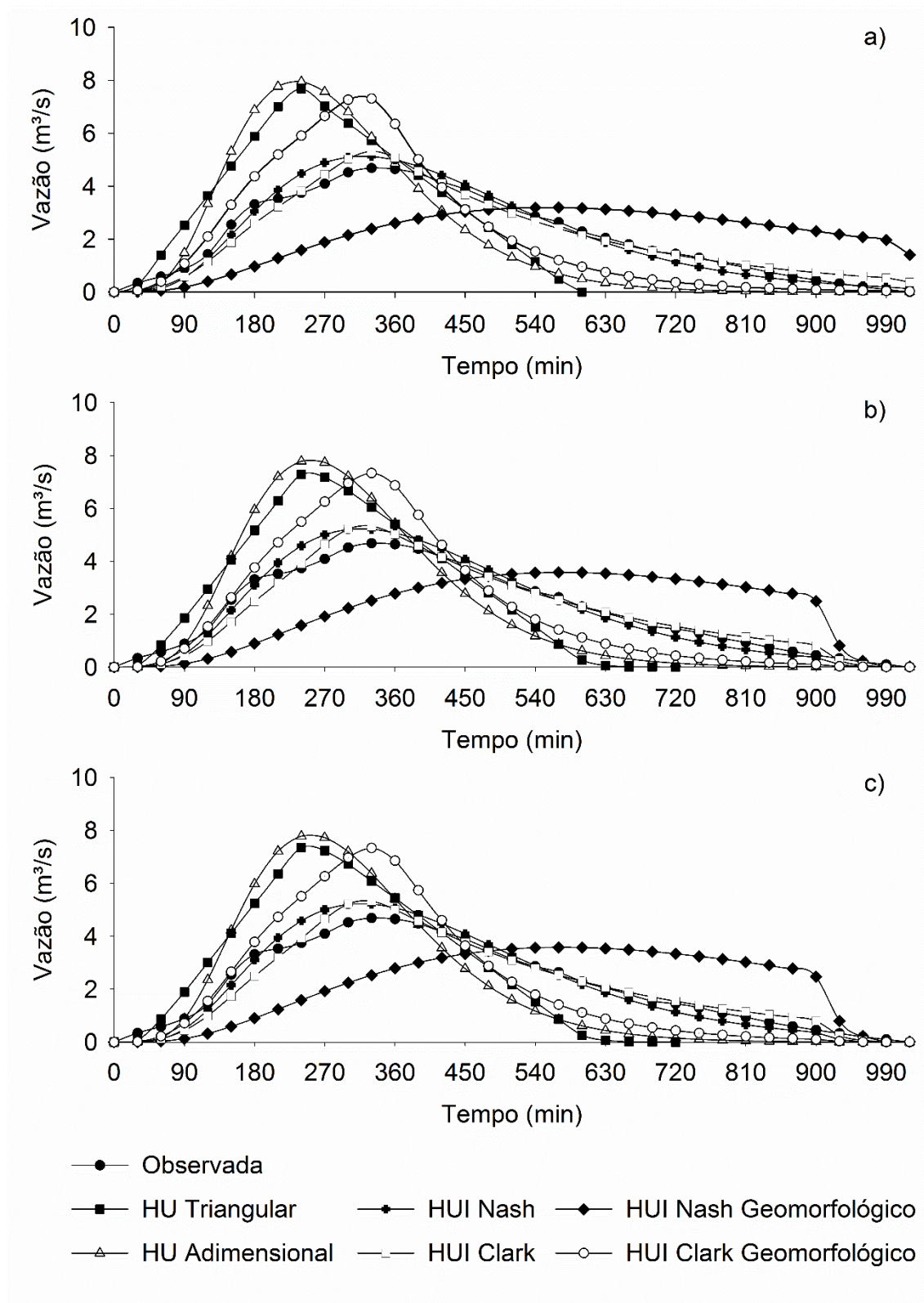


Figura 11A – Evento 11 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

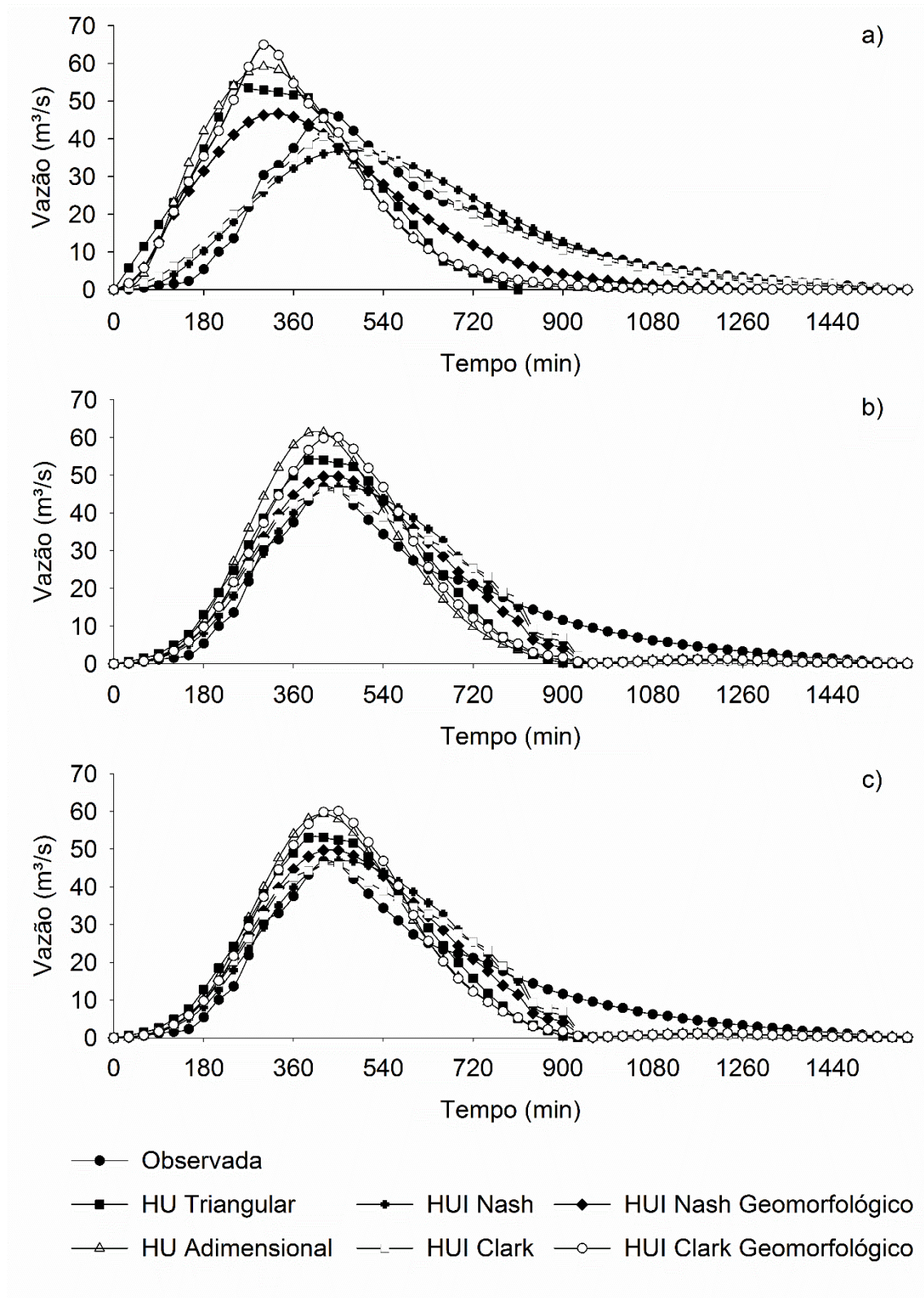


Figura 12A – Evento 12 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

Apêndice B – Análise comparativa entre os modelos de HU e HUI empregados neste estudo, considerando as três metodologias de determinação de P_e , para os eventos analisados na BHRJ

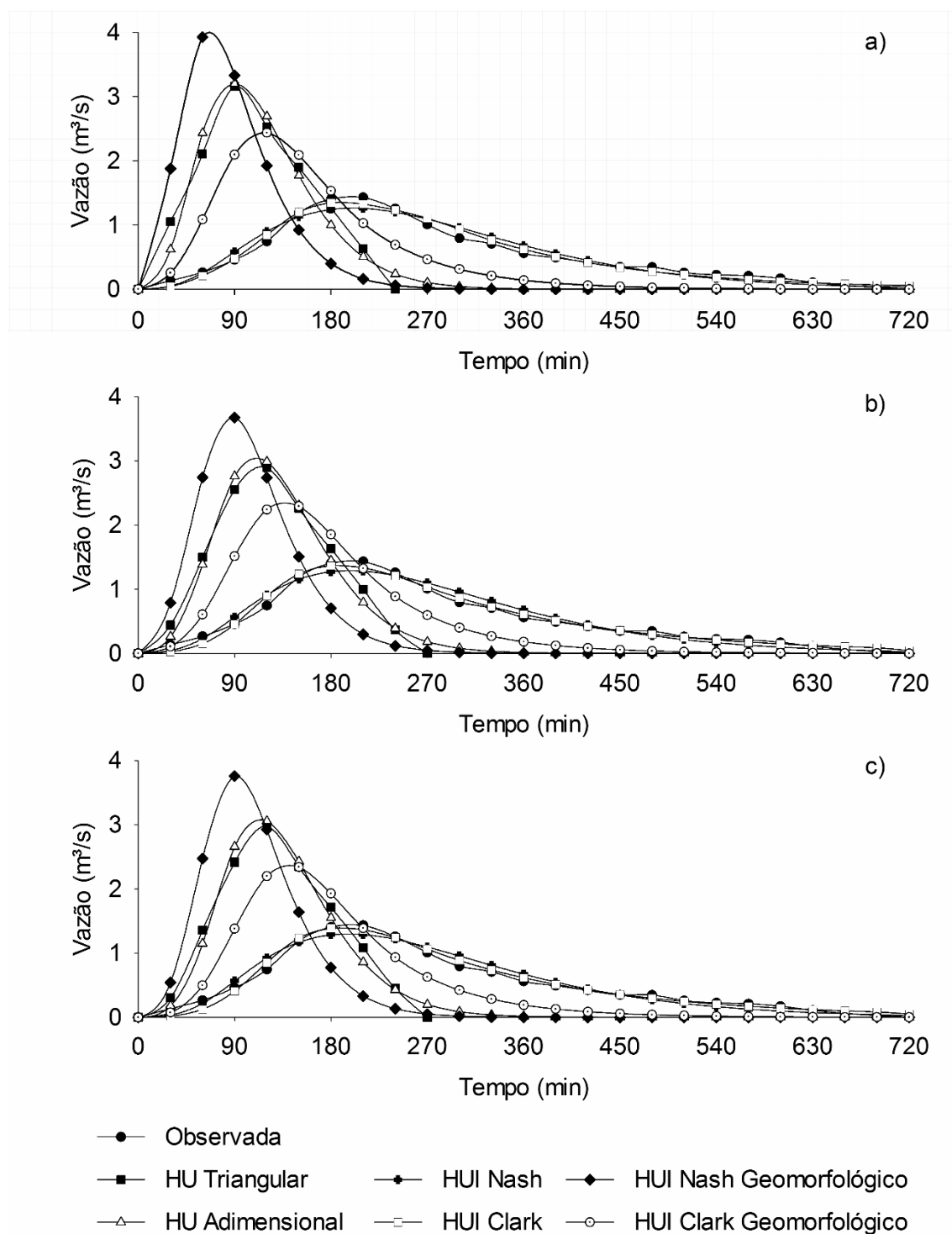


Figura 1B – Evento 1 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

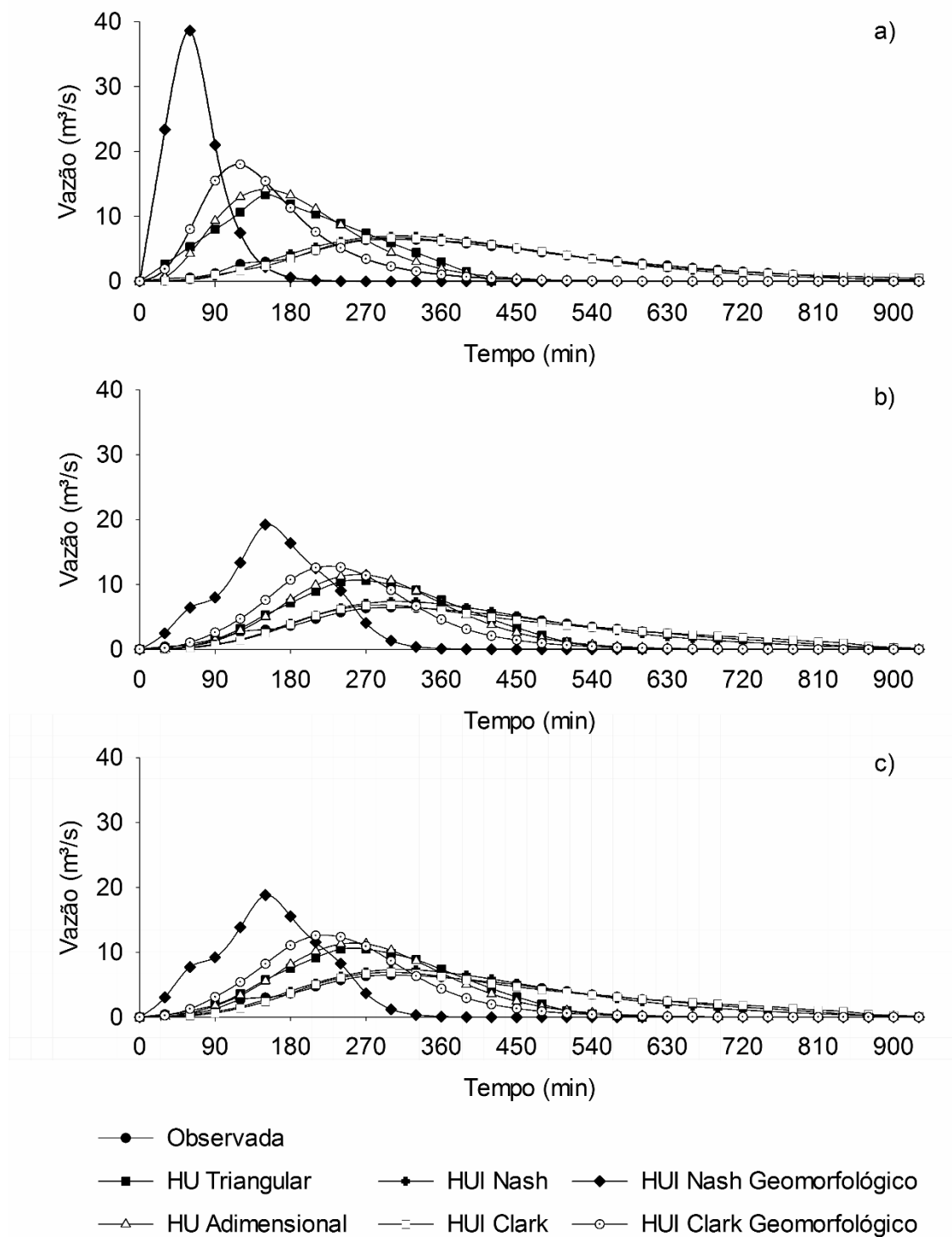


Figura 2B – Evento 2 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

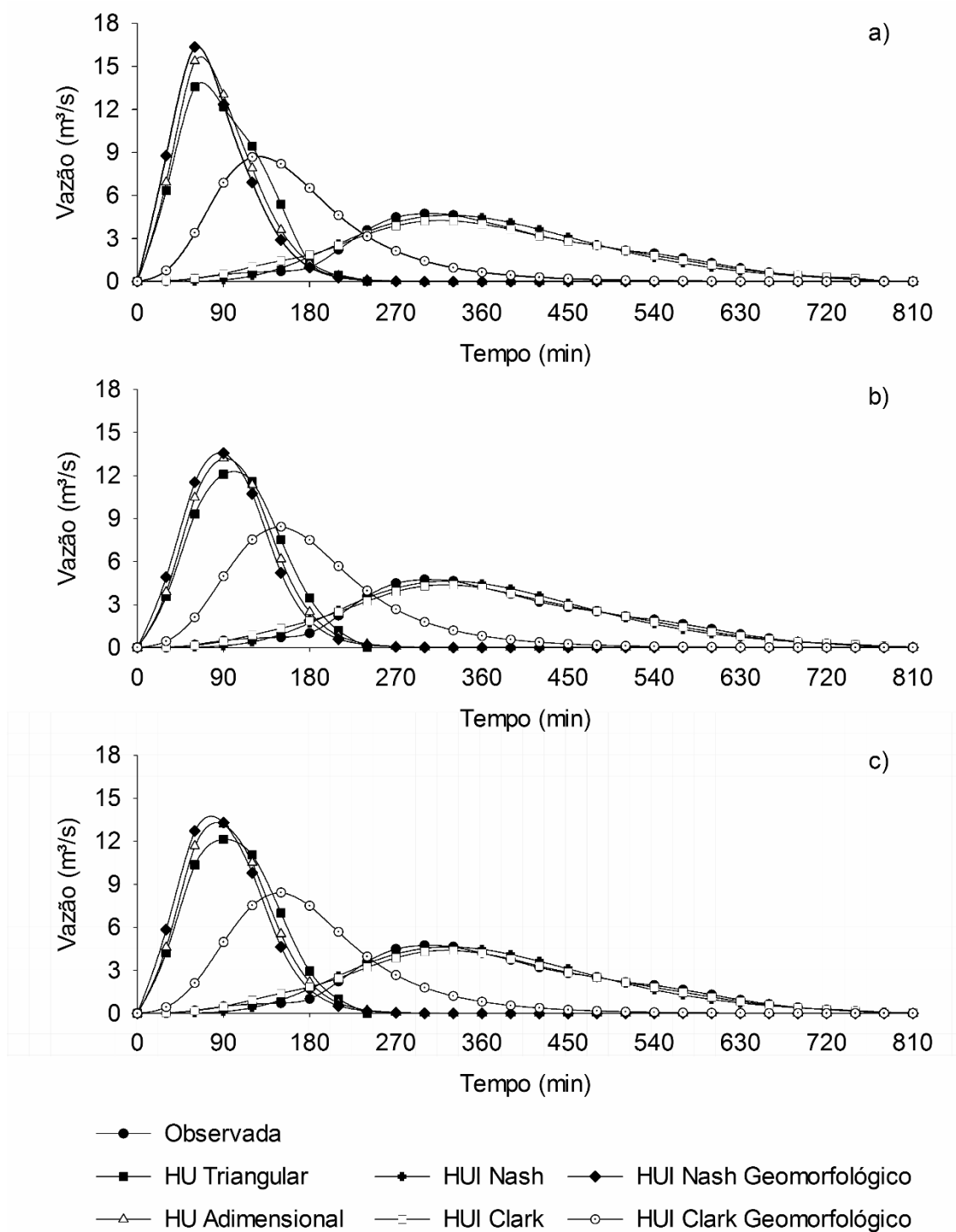


Figura 3B – Evento 3 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

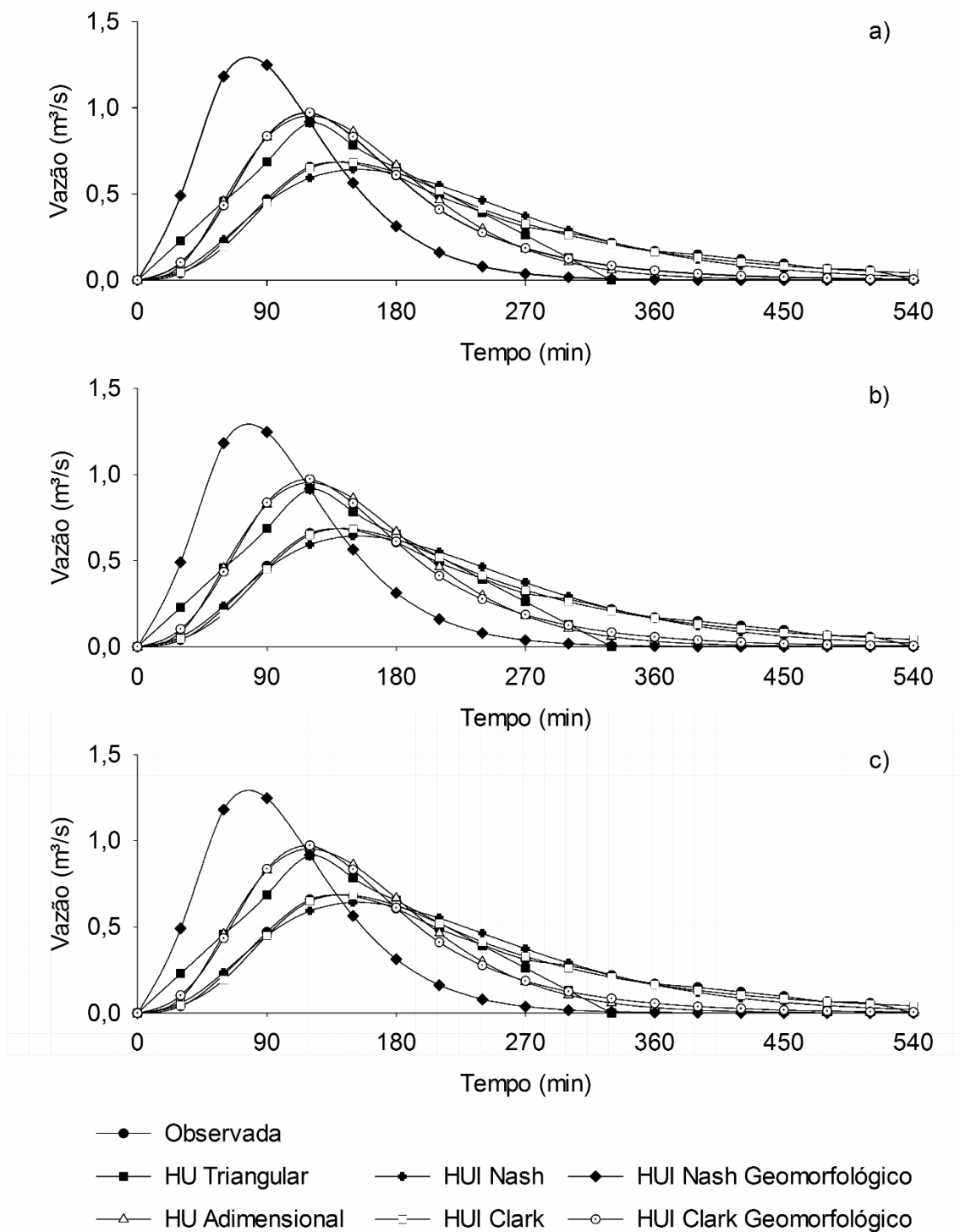


Figura 4B – Evento 4 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

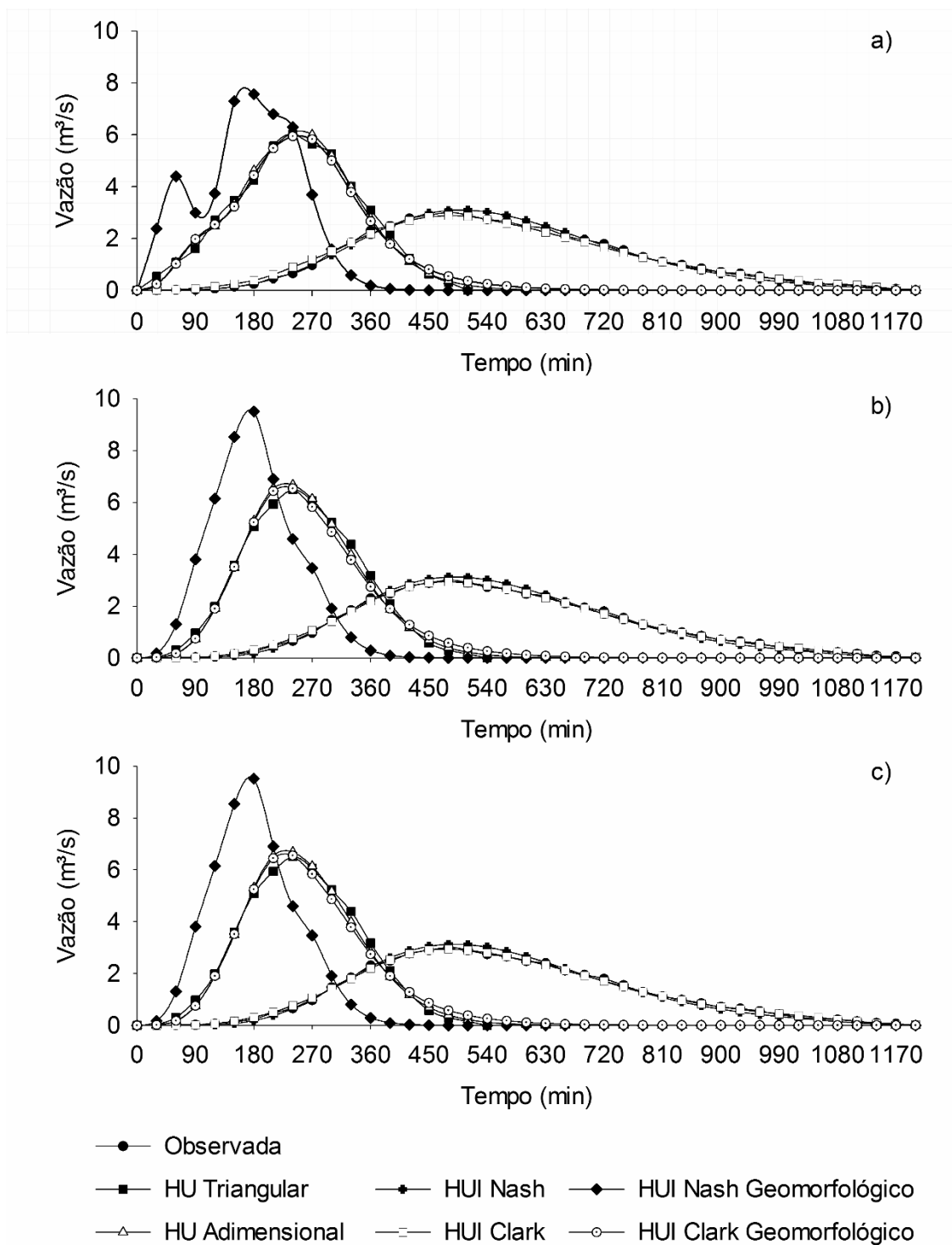


Figura 5B – Evento 5 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

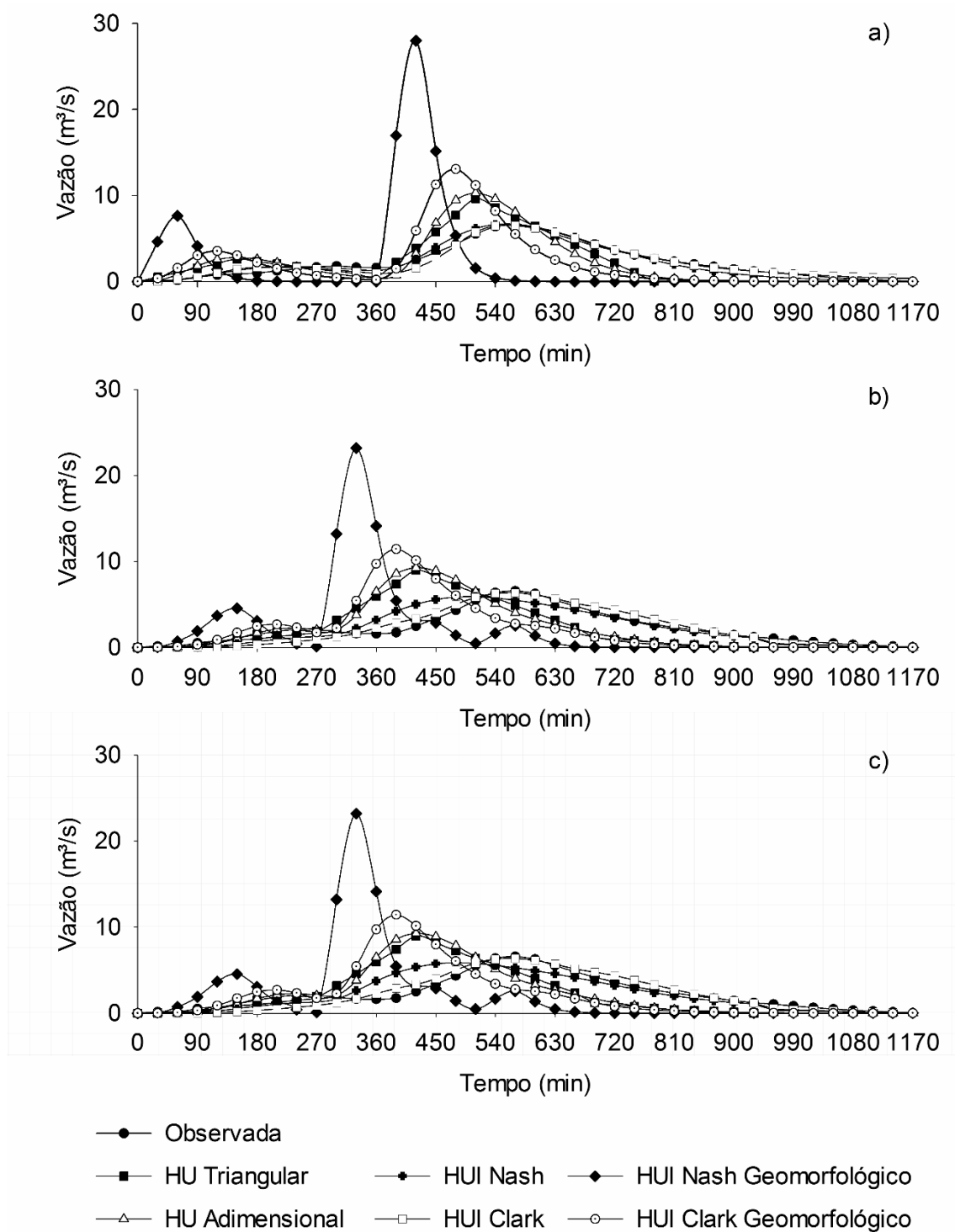


Figura 6B – Evento 6 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

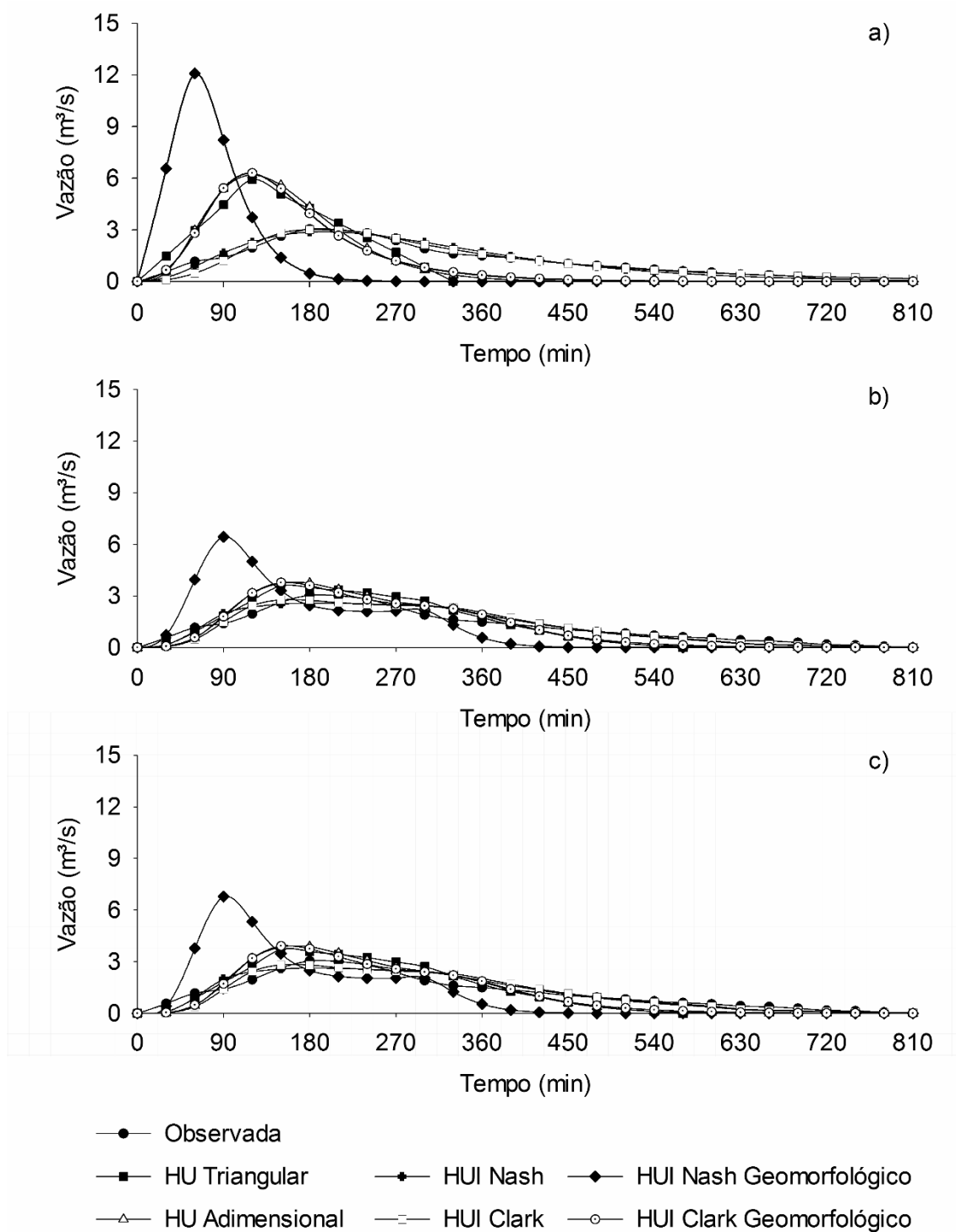


Figura 7B – Evento 7 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

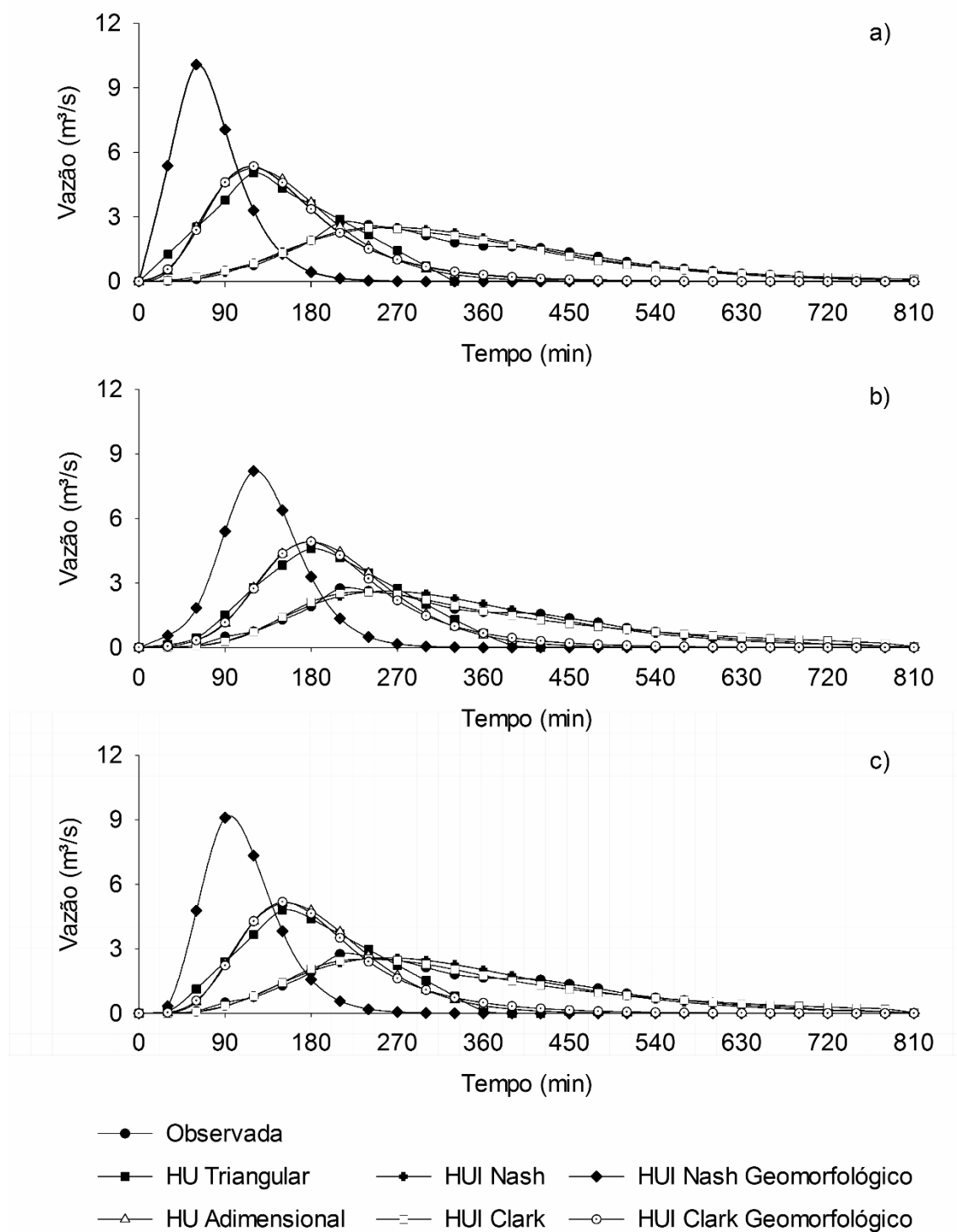


Figura 8B – Evento 8 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

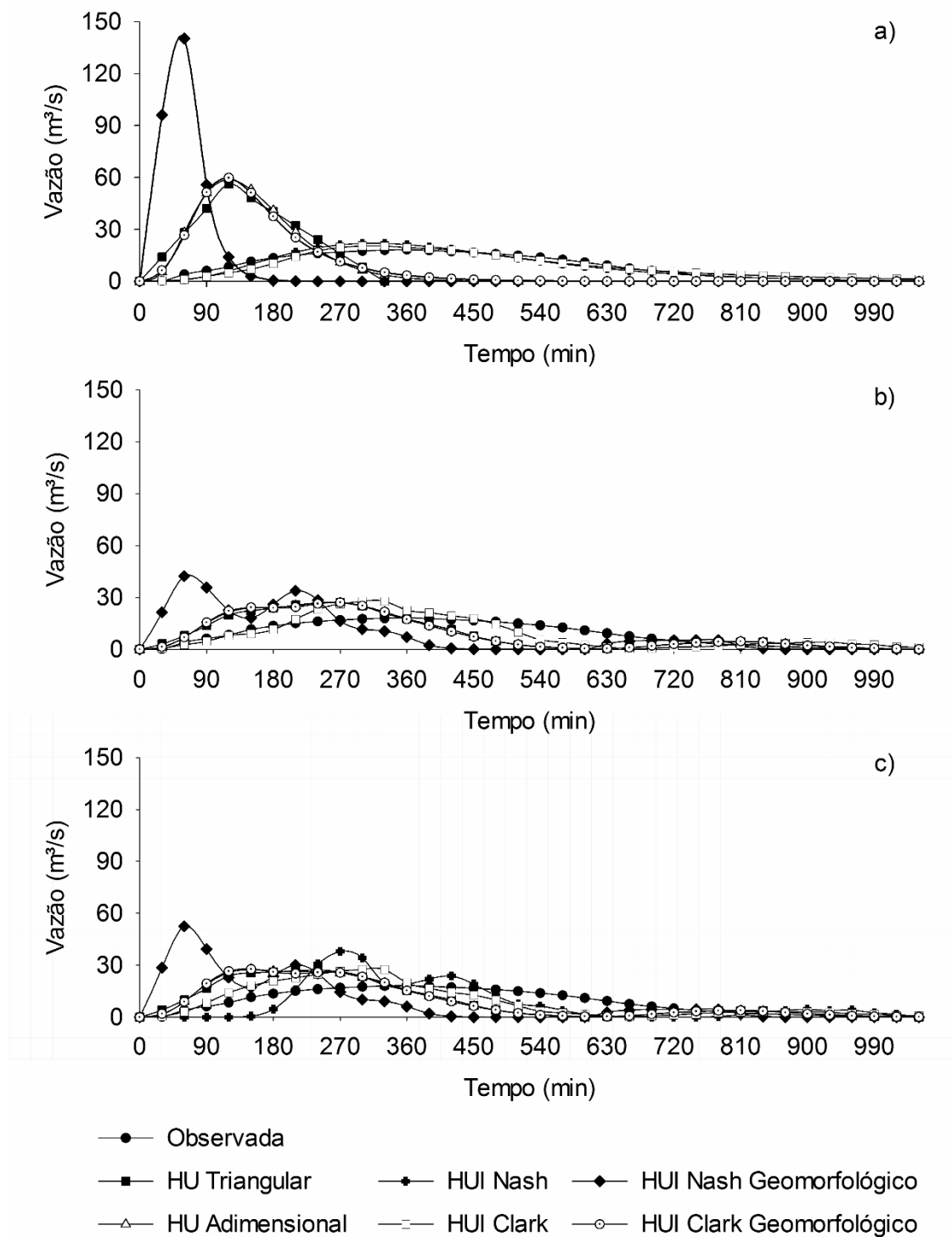


Figura 9B – Evento 9 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

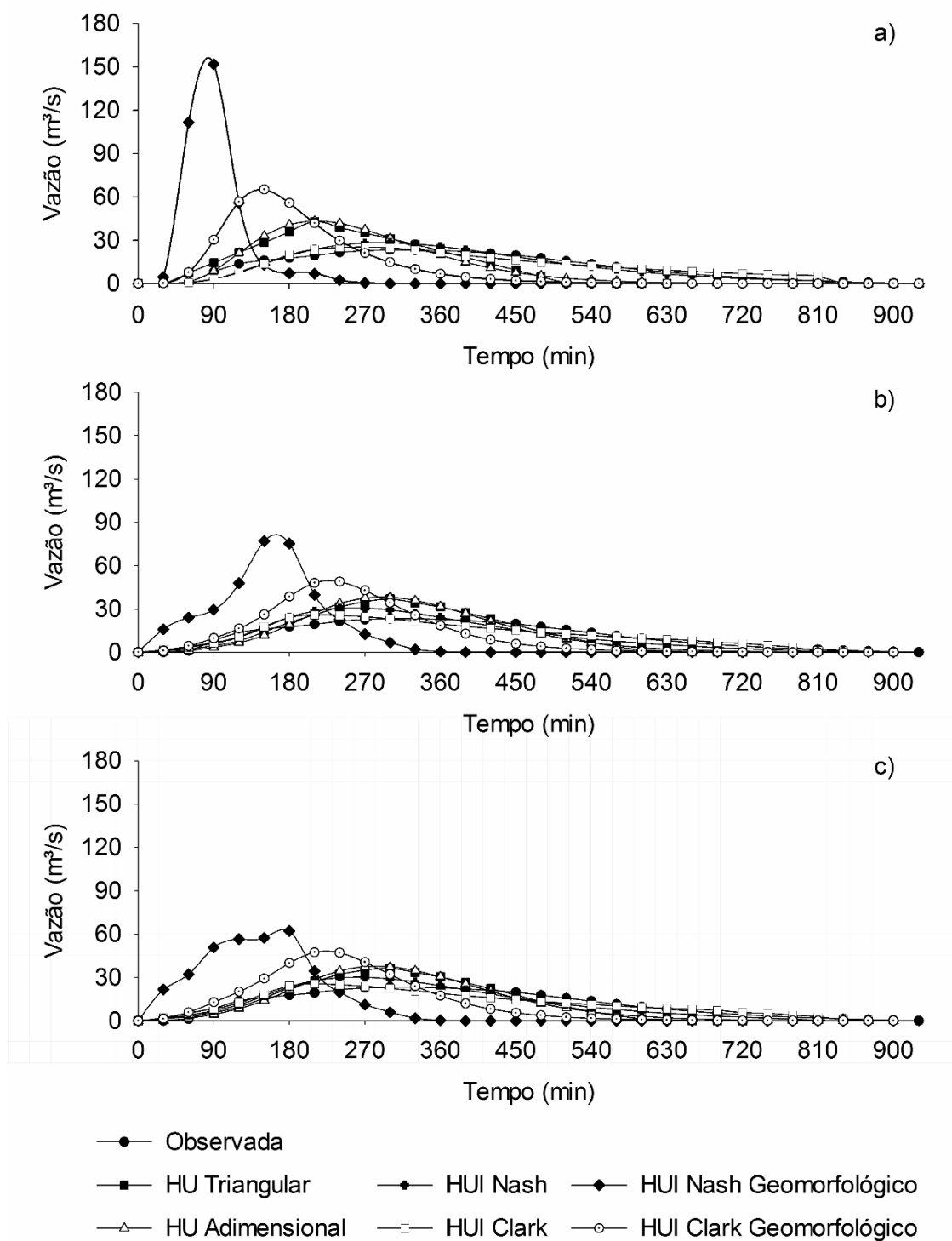


Figura 10B – Evento 10 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

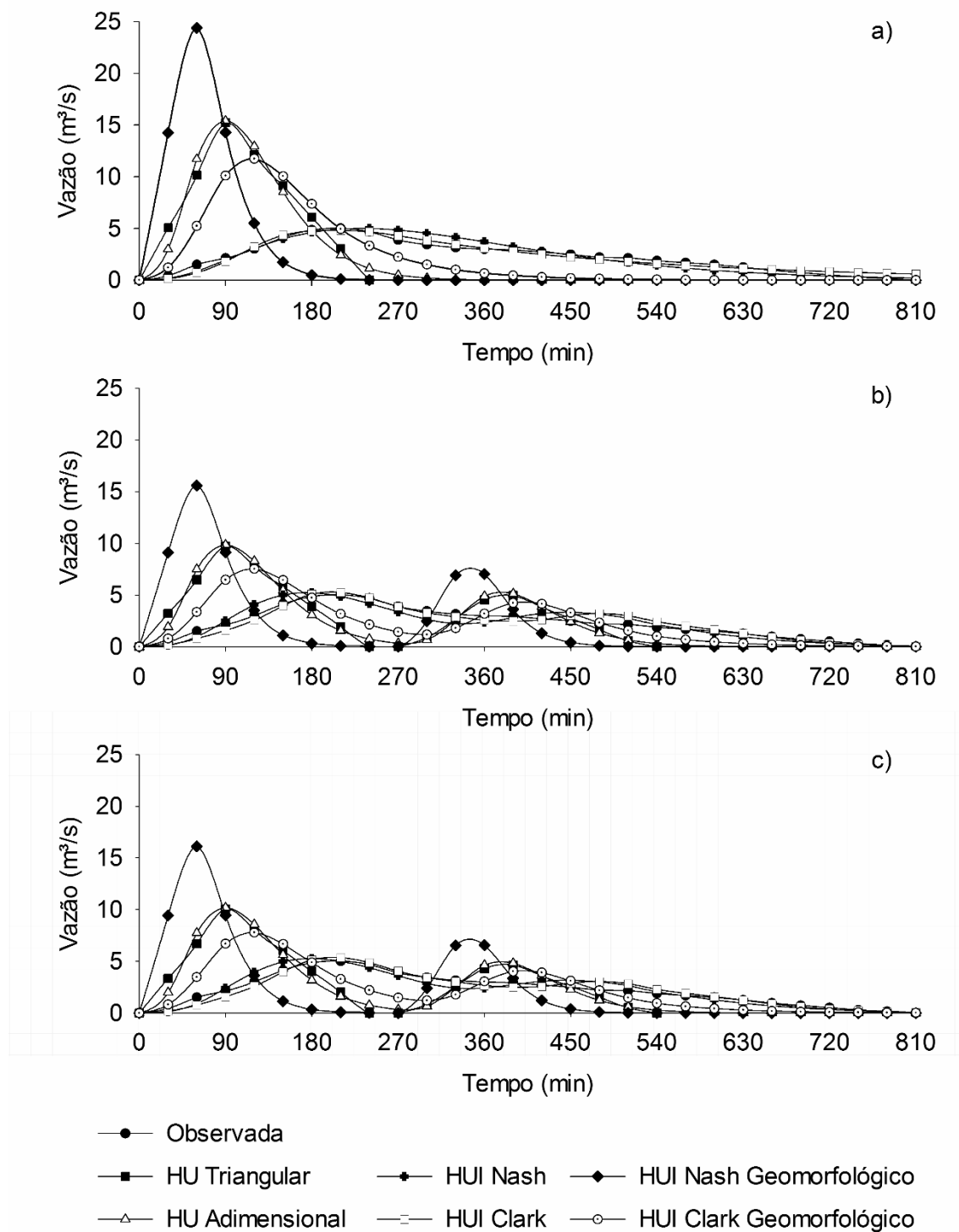


Figura 11B – Evento 11 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

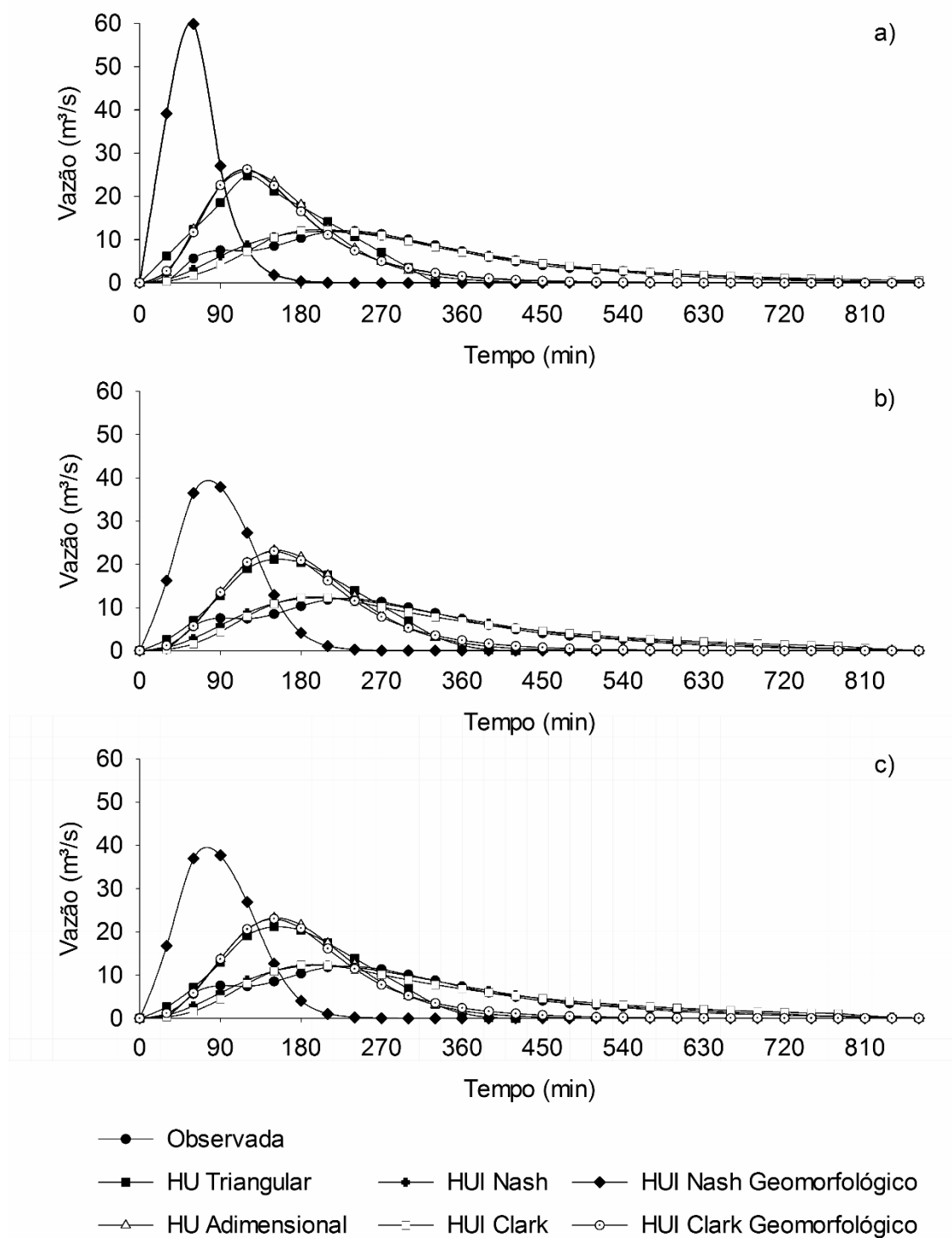


Figura 12B – Evento 12 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

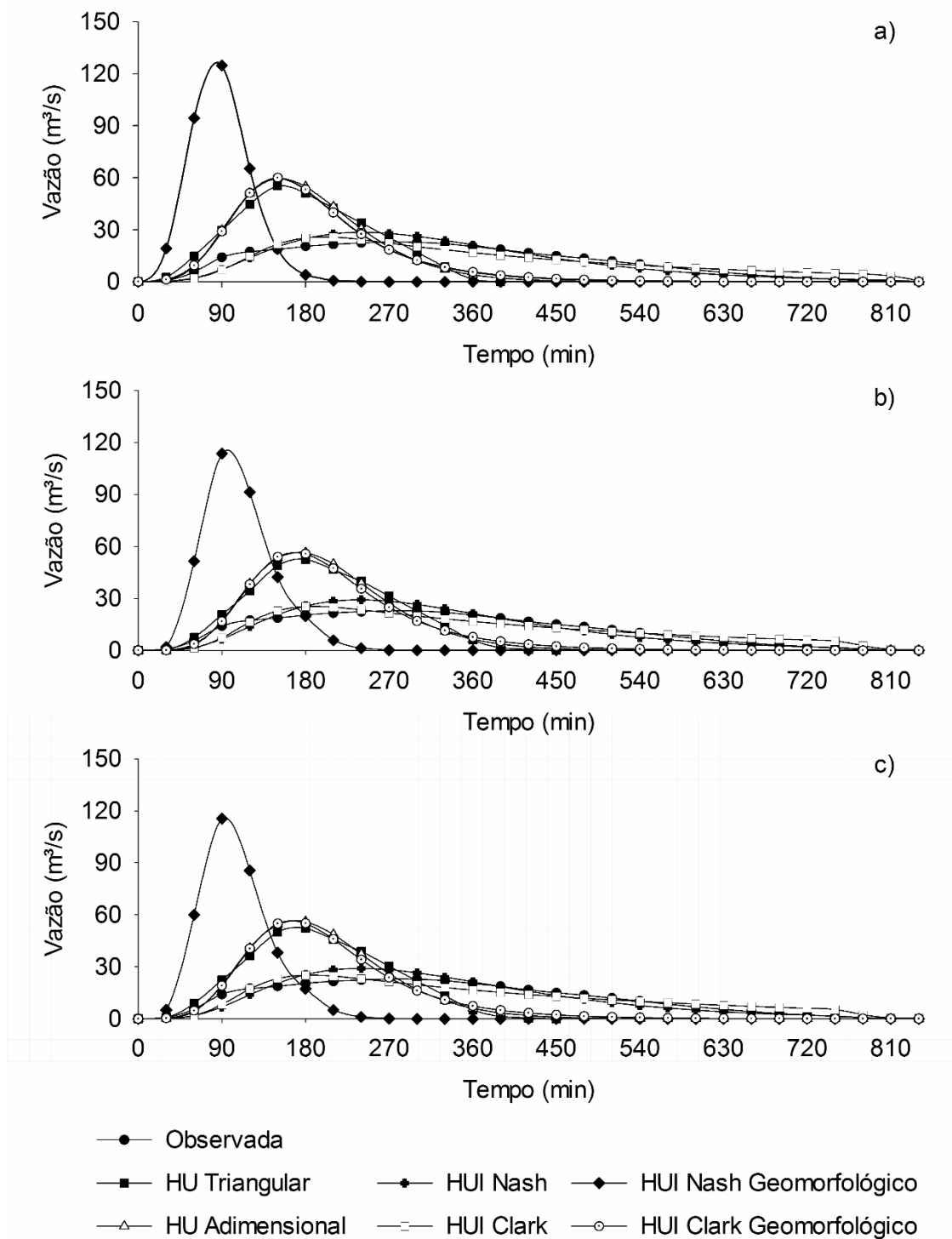


Figura 13B – Evento 13 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

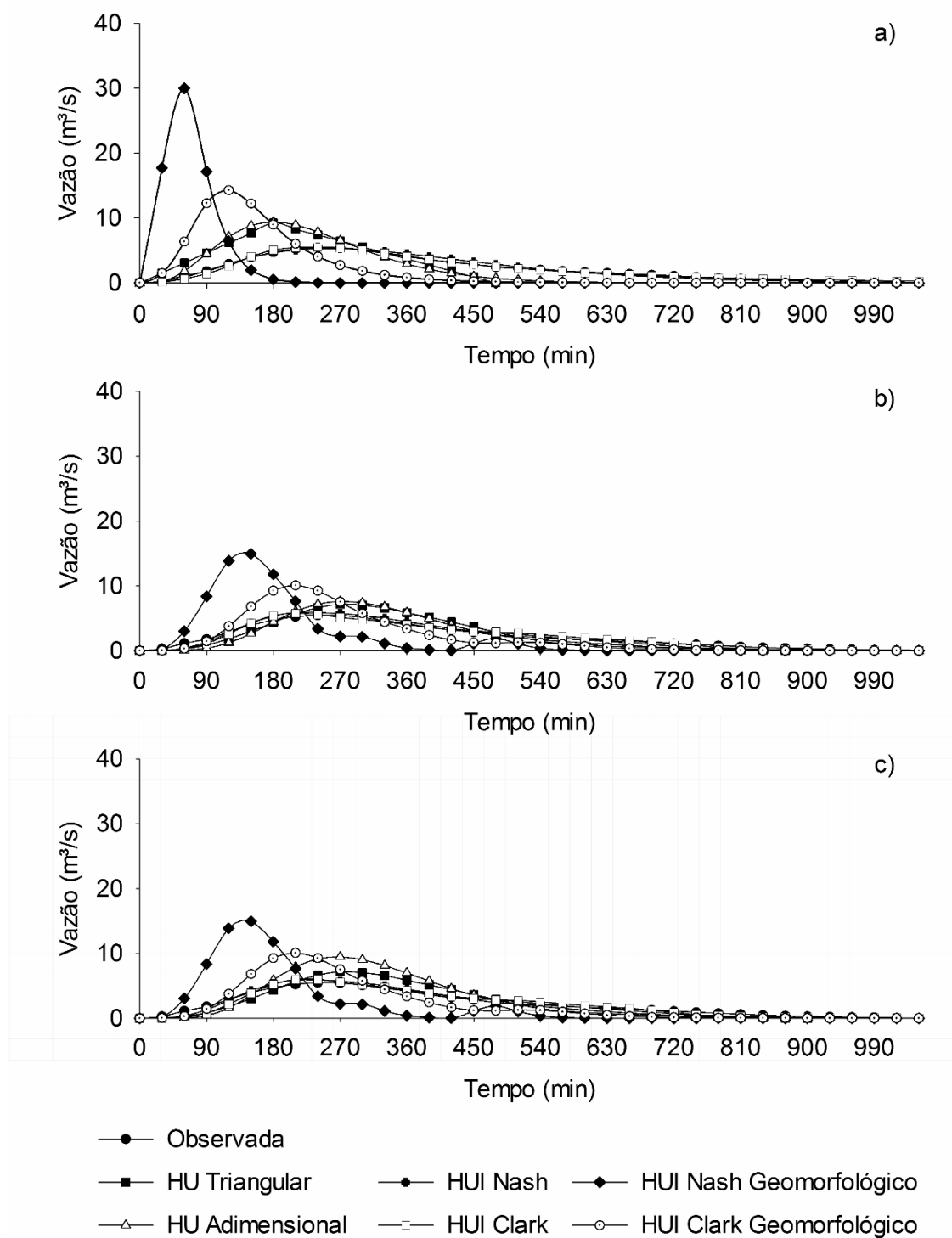


Figura 14B – Evento 14 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

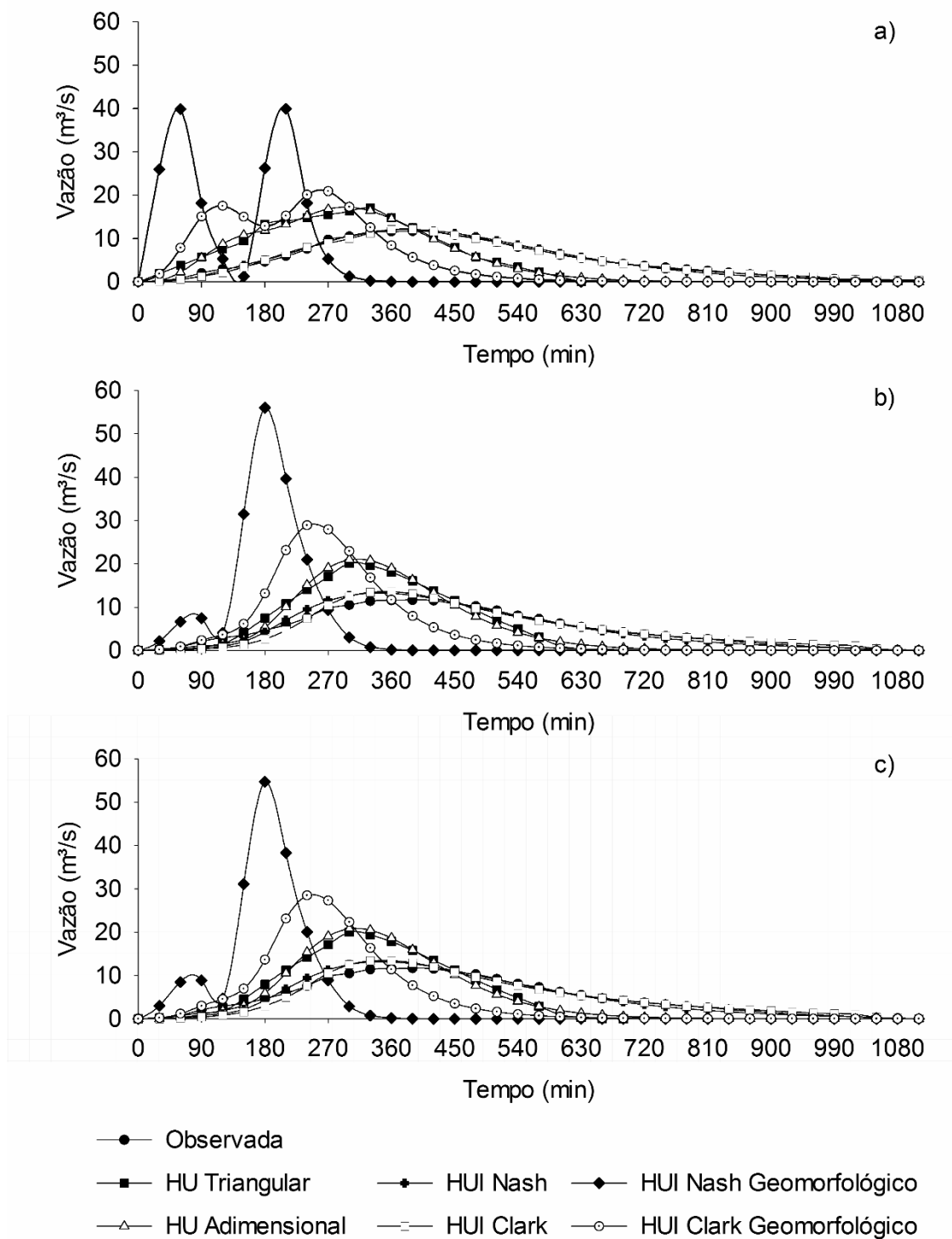


Figura 15B – Evento 15 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

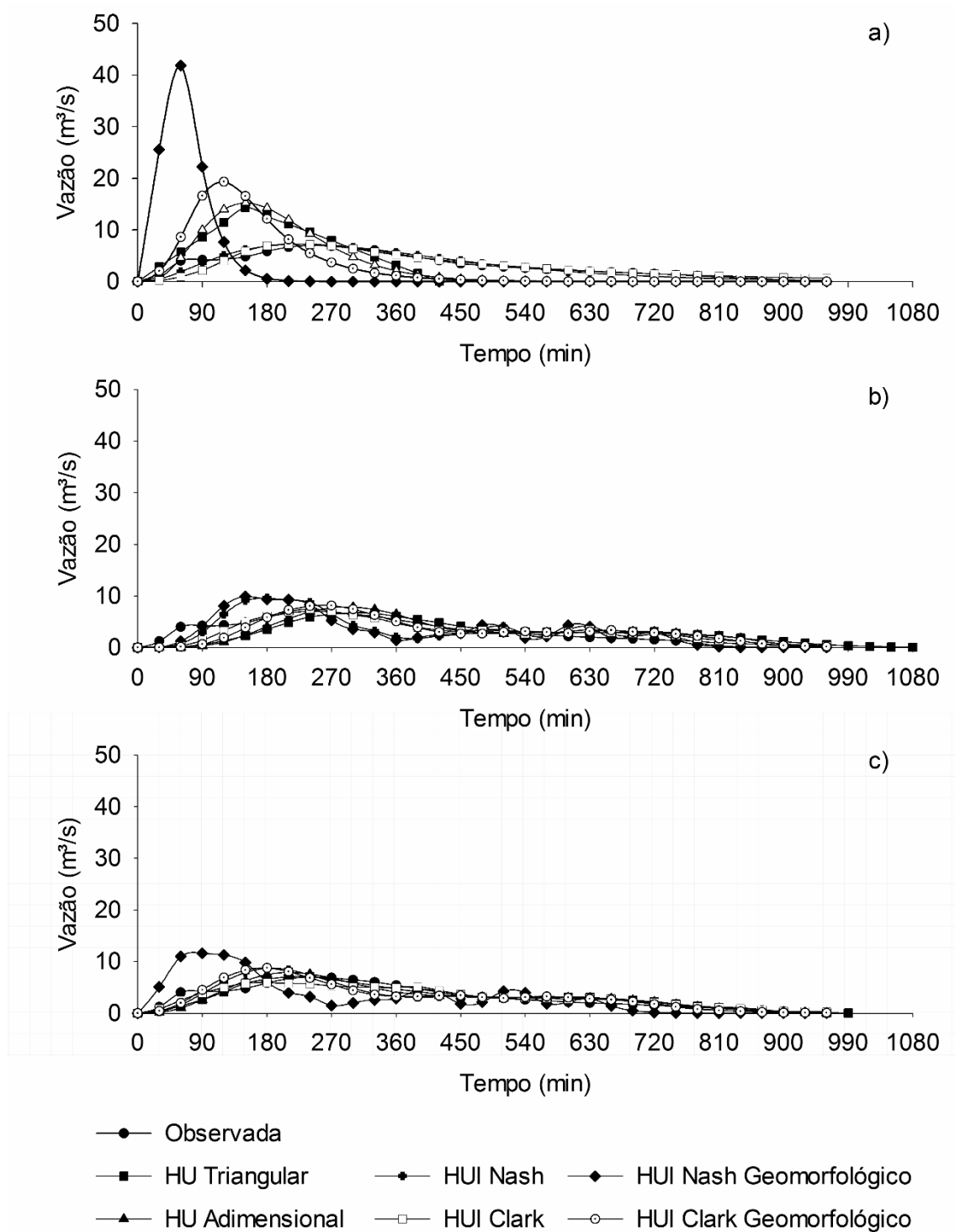


Figura 16B – Evento 16 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

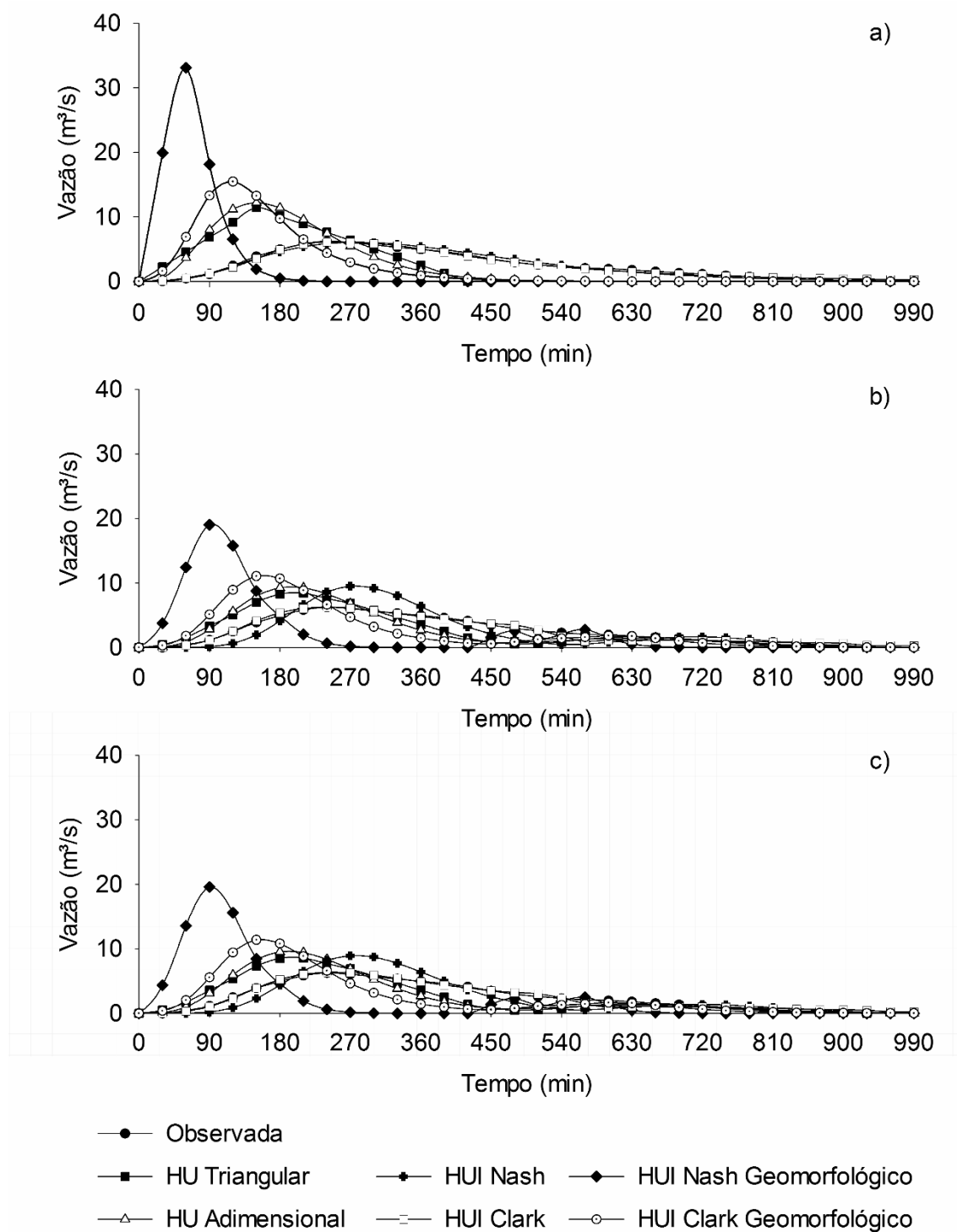


Figura 17B – Evento 17 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

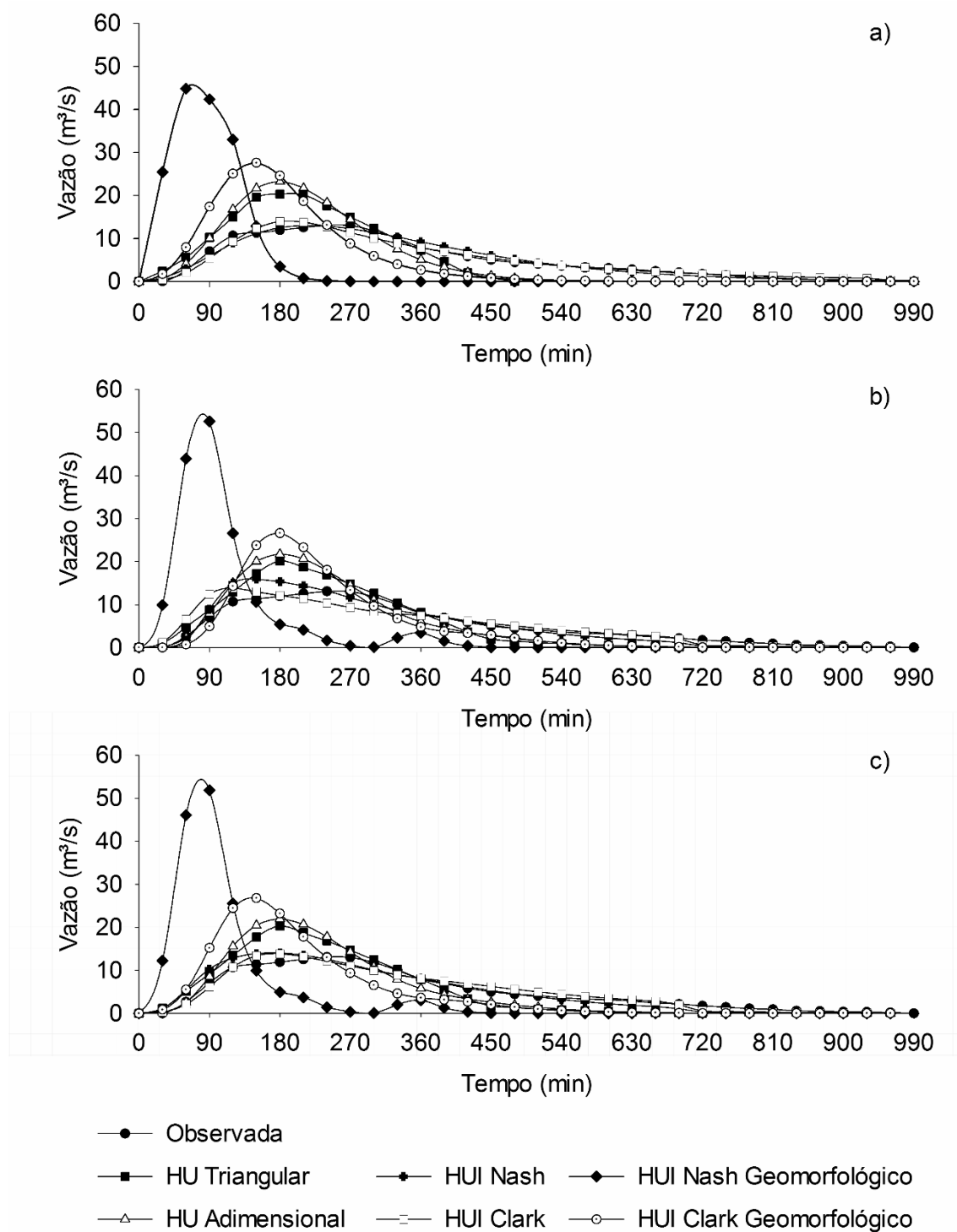


Figura 18B – Evento 18 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

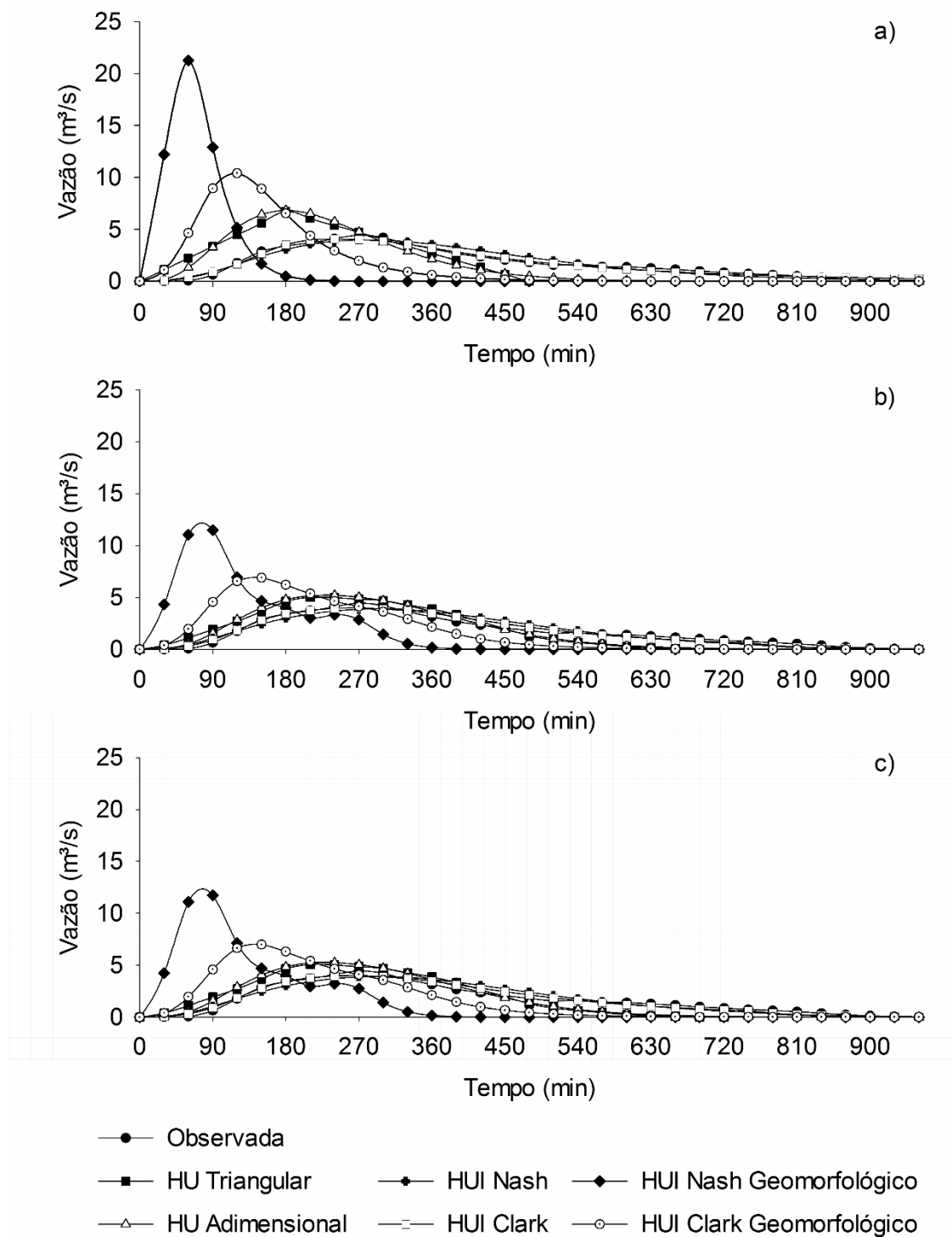


Figura 19B – Evento 19 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)

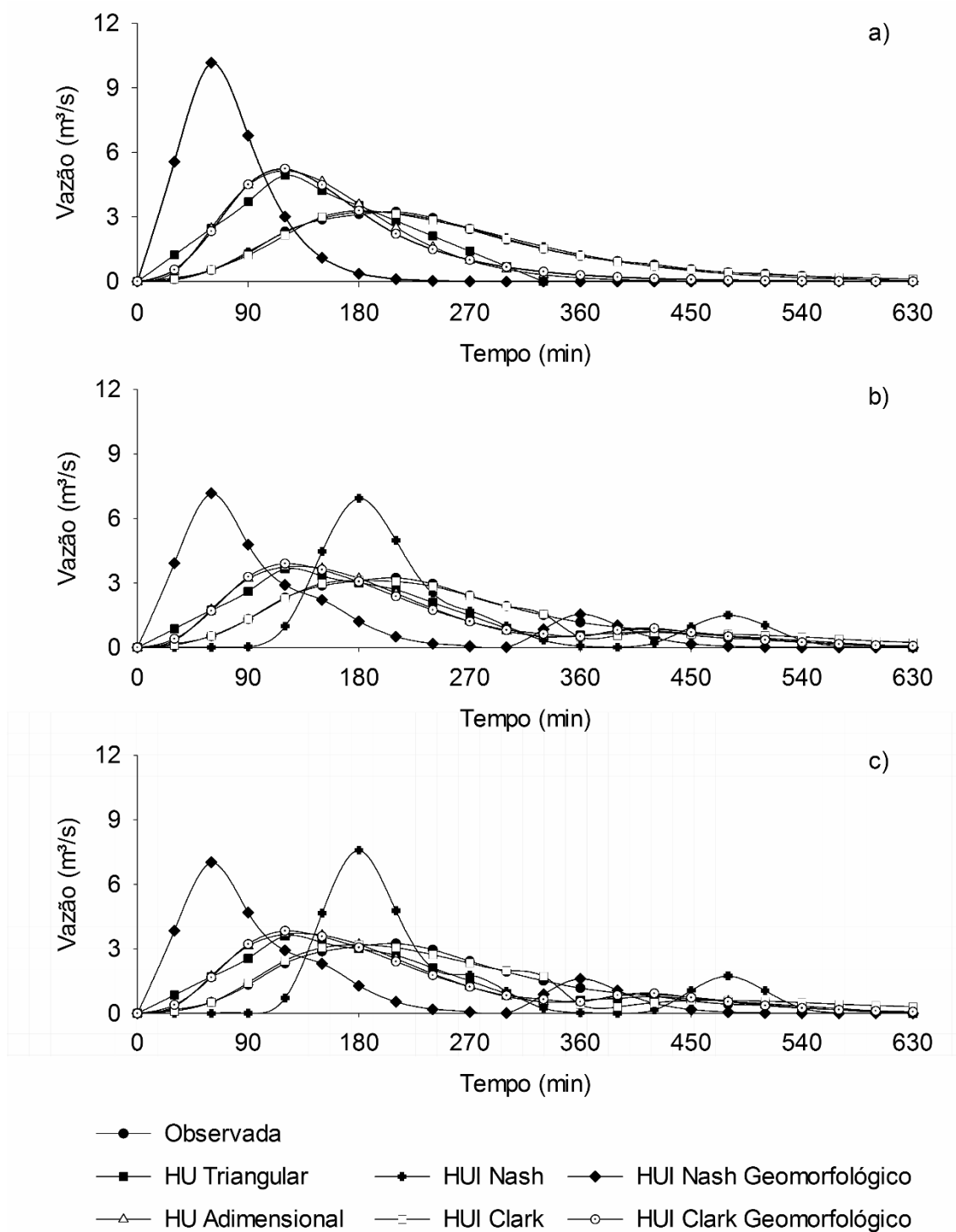


Figura 20B – Evento 20 com separação de P_e pelo Índice ϕ (a), CN (b) e CN Modificado (c)