

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



Dissertação

Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash

Maíra Martim de Moura

Pelotas, 2018.

MAÍRA MARTIM DE MOURA

Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash

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

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow
Co-orientador: Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra

Pelotas, 2018.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M929i Moura, Maíra Martim de

Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash / Maíra Martim de Moura ; Samuel Bekow, orientador ; Fabrício da Silva Terra, coorientador. — Pelotas, 2018.

292 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Hidrologia. 2. Desastres naturais. 3. Modelo digital de elevação. 4. Propostas geomorfológicas. 5. Sensoriamento remoto. I. Bekow, Samuel, orient. II. Terra, Fabrício da Silva, coorient. III. Título.

CDD : 627

Maíra Martim de Moura

Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash

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

Data da Defesa: 01/03/2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras.



Prof^a. Dr^a Diuliana Leandro
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.



Prof. Dr. Hugo Alexandre Soares Guedes
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.



Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães
Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Beskow pela competência e excelência com que atua, pelo conhecimento compartilhado, pela orientação, dedicação e motivação ao longo destes últimos anos.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Fabricio da Silva Terra pelo conhecimento e experiências compartilhadas, pela motivação e dedicação ao longo deste trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas pelas oportunidades e pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus pais, José e Rosane, por nunca me deixarem desistir, me fazendo acreditar que, sim, é possível. Aos meus irmãos Cinara e Henrique por me apoiarem ao longo dessa caminhada.

Ao meu namorado e amigo Francisco Mazzarolo Seger, pelo carinho, apoio, compreensão e ajuda durante esta etapa. Por me inspirar em busca do desconhecido, me fazer sentir orgulho do que faço, de quem sou, compartilhando comigo bons e maus momentos, conhecimentos adquiridos e inúmeras madrugadas em claro.

Aos colegas de laboratório pelo coleguismo e motivação, em especial, Zandra, Felício, Marcelle, Aryane, Alice e Tamara pela ajuda ao longo deste trabalho e de outros que foram e vem sendo desenvolvidos em conjunto.

Aos meus queridos amigos Alisson, Eduardo, Filipe, João, Jonas, Marcio, Priscila, Rodrigo e Victoria pela motivação, torcida e companheirismo, tornando todo e qualquer momento alegre.

Às melhores colegas de apartamento que alguém poderia ter, Carina, Cássia e Daiane, pela alegria, pela troca de experiências e pelos abraços acolhedores quando algo não seguia como esperado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas pela estrutura física e intelectual, e à Universidade Federal de Pelotas pela acolhida e oportunidades.

*"O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar com mais inteligência."*

Henry Ford

Resumo

MOURA, Maíra Martim de. **Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo sobre a estimativa de cheias a partir do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash**. 2018. 292f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

A água é um recurso natural indispensável à vida e primordial ao desenvolvimento econômico de uma região. Devido às mudanças climáticas, associadas às ações antrópicas e ao crescimento populacional, a ocorrência de problemas relacionados a cheias em bacias hidrográficas tem aumentado. O estudo de cheias em bacias hidrográficas permite a quantificação da magnitude das vazões de pico e do hidrograma de escoamento superficial direto oriundos de um ou mais eventos de chuva. No entanto, tais estimativas dependem de dados de séries históricas, o que pode ser problemático nos países em desenvolvimento devido a existência de um número insuficiente de seções com monitoramento fluviométrico, tornando a modelagem hidrológica de cheias uma ferramenta imprescindível. Diferentes métodos para estimativa de cheias vêm sendo apresentadas e utilizadas na literatura, com destaque para a do Hidrograma Unitário (HU), a do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) e a do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG). Um modelo de HUI amplamente utilizados é o de Nash (HUIN), para o qual diversas propostas geomorfológicas vêm sendo desenvolvidas, estabelecendo relações para seus parâmetros a partir da caracterização física da bacia hidrográfica e da rede de drenagem. Durante a caracterização de bacias hidrográficas em softwares de geoprocessamento, a principal informação é a do relevo, obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), que pode ser obtido a partir de cartas topográficas, ou de imagens de radar (ex. SRTM) e sensor (ex. ASTER). O principal objetivo deste estudo foi avaliar a aplicabilidade e confiabilidade de diferentes fontes e escalas de informação do relevo visando à modelagem de cheias através do modelo de HUIN fundamentado em parâmetros geomorfológicos, tomando como base cinco bacias hidrográficas experimentais de diferentes características fisiográficas e dotadas de monitoramento hidrológico. Os MDEs utilizados foram obtidos de cartas topográficas na escala 1:50.000, de imagens SRTM com 30m e 90m, de imagens do banco de dados TOPODATA, de imagens ASTER, e somente para a menor bacia, de dados de um levantamento planialtimétrico. Foram selecionadas quatro propostas geomorfológicas para o HUIN, sendo duas delas baseadas na teoria do HUIG, e as outras duas em estudos empíricos realizados em diferentes bacias hidrográficas. Com base nos resultados obtidos para as bacias analisadas, as principais conclusões deste estudo foram: a) os parâmetros mais impactados pela fonte e escala da informação do relevo são a declividade do curso d'água principal e as razões de Horton e de Schumm; b) as bacias planas são mais suscetíveis a erros altimétricos e estes aumentam conforme a área da bacia diminui; c) não é possível observar uma combinação de proposta-MDE que descreva melhor ou pior o conjunto de bacias analisadas, nem levando em consideração a declividade, nem o tamanho da área das bacias; d) as propostas geomorfológicas

que não dependem de informação da velocidade do escoamento apresentaram bons resultados em relação as baseadas na teoria do HUIG; e) a combinação de diferentes propostas permite estimar de forma satisfatória o comportamento do hidrograma de escoamento superficial direto e o tempo e a vazão de pico nas bacias estudadas.

Palavras-chave: Hidrologia; desastres naturais; modelo digital de elevação; propostas geomorfológicas; geoprocessamento; sensoriamento remoto

Abstract

MOURA, Máira Martim de. **Influence of different relief data sources and scales on flood estimations from Nash's Instantaneous Unit Hydrograph**. 2018. 292f. Dissertation (Master of Science in Water Resources) – Water Resources Graduate Program, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

Water is a natural resource indispensable to life and essential to regional economic development. Due to climate change, anthropic interferences, and rapid population growth, the occurrence of flood-related natural hazards in watersheds has increased. Watershed flood-related studies allow the estimation of peak streamflow and direct surface runoff hydrograph resulting from single or multiple rainfall events. However, such estimations are directly dependent on existing streamflow historical series, which might be troublesome in developing countries due to the lack of streamflow gauging stations. In this context, indirect flood estimation methods stand out. Among the different flood estimation methods presented in the literature, the Unit Hydrograph (UH), Instantaneous Unit Hydrograph (IUH), and Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) have caught researchers' attention. The Nash's IUH (NIUH) is one of the most widely used IUH models. Several geomorphological approaches have been developed for NIUH, thus relating its parameters to watershed and drainage network physical characteristics. During the characterization of watersheds in geoprocessing softwares, the main information is that of relief obtained from a Digital Elevation Model (MDE) which can be obtained from topographic maps or from radar images (e.g. SRTM) and sensor images (e.g. ASTER). The main objective of this study was to evaluate the applicability and reliability of different relief data sources and scales for determination of geomorphological parameters required to estimate floods from NIUH. This study took into account data sets from five experimental watersheds with different physiographical characteristics, which have hydrological monitoring. The DEMs analysed in this study were obtained from topographical maps in the 1:50,000 scale, SRTM images with 30 and 90-meter spatial resolution, TOPODATA database, ASTER images. For the smallest watershed, an *in situ* topographic survey was also carried out for DEM derivation. Four geomorphological approaches for the NIUH were selected; two of them were based on the GIUH theory, whereas, the others were adjusted from empirical studies conducted in different watersheds. Based on the results obtained for the analysed watersheds, the main conclusions were: a) the main watercourse's slope and Horton's and Schumm's ratios are the most sensitive parameters to relief data sources and scales; b) flat watersheds are the most susceptible to altimetry errors, which increase as the watershed area decreases; c) it is not possible to identify any combinations of geomorphological approach-DEM that better or worse describe all the analyzed watersheds when assessing watershed slope or drainage area independently; d) the geomorphological approaches which do

not depend on streamflow speed information presented satisfactory results when compared to those based on GIUH theory; and e) the combination of different approaches enables to satisfactorily estimate the behavior of direct surface runoff hydrographs and their peak streamflow and time in all the considered watersheds.

Key-words: Hydrology; natural disasters; digital elevation model; geomorphological approaches; geoprocessing; remote sensing

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico em escala global.	27
Figura 2 – Representação de diferentes planos de informações em um SIG.	28
Figura 3 - Princípio da proporcionalidade na teoria do HU.	32
Figura 4 - Princípio da superposição de hidrogramas.	32
Figura 5 - Representação das isócronas de uma bacia hidrográfica e do HTA resultante das mesmas.	35
Figura 6 - Representação esquemática do processo de amortecimento da vazão pelo HUIN.	36
Figura 7 – Representação das altitudes ortométrica e elipsoidal, e da relação entre elas.	39
Figura 8 - Localização das bacias hidrográficas utilizadas neste estudo.	47
Figura 9 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para as bacias hidrográficas localizadas no RS.	48
Figura 10 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para a BHRL.	49
Figura 11 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para a BHRJ.	49
Figura 12 - Pontos cotados obtidos no levantamento topográfico planialtimétrico realizado na BHSE.	50
Figura 13 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (a), mapa de direção de fluxo (b) e de fluxo acumulado (c) para a BHAC.	52
Figura 14 - Representação do método Sr para equacionamento da declividade do curso d'água principal.	55
Figura 15 - Delimitação automática da BHSE utilizando os diferentes MDEs empregados neste estudo.	57
Figura 16 - Erro Médio Absoluto (MAE) (a) e Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) (b) obtidos a partir dos diferentes MDEs, confrontando-os com os de referência, para as bacias de estudo.	60
Figura 17 – Rede de drenagem obtidas pelas diferentes fontes de informações do relevo para a BHAC (a) e detalhes dos cursos d'água obtidos (b e c).	66
Figura 18 – Localização das bacias hidrográficas compreendidas pela área de estudo.	76

Figura 19 - Localização da rede de monitoramento hidrológico e dos municípios compreendidos pela BHAP considerando a área de drenagem à montante da seção de controle denominada Ponte Cordeiro de Farias.	77
Figura 20 - Estrutura para monitoramento automático de nível d'água e réguas linimétricas (a) e, estação modelo Solar SL2000-PNVn, localizadas na seção de controle da BHAC (b).	78
Figura 21 - Réguas linimétricas instaladas (a) e estação hidrológica (b) instaladas junto à seção de controle da BHACN.	79
Figura 22 – Canal da seção de controle da sanga do Ellert (a), disposição das réguas ao longo do canal (b) e detalhe da régua linimétrica localizada junto à base do canal (c).	79
Figura 23 - Sensores de pressão instalados junto à estação pluviográfica (a) e sob a estrutura de concreto (b) da seção de controle da BHSE.	80
Figura 24 - Exemplos de estação pluviográfica, modelo RG3-M da marca Onset, localizadas no interior da BHAP.	81
Figura 25 - Localização da rede de monitoramento hidrológico e dos municípios compreendidos pelas bacias hidrográficas localizadas no estado de Minas Gerais.	81
Figura 26 - Estação meteorológica instalada no município de Bocaina de Minas, Minas Gerais (a) e seção de controle da BHRL, com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento das informações hidrológicas.	82
Figura 27 - Estação meteorológica instalada no município de Nazareno - Minas Gerais (a) e seção de controle da BHRJ com estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento das informações hidrológicas.	83
Figura 28 - Exemplos de molinetes hidrométricos utilizados para determinação de vazões em cursos d'água.	84
Figura 29 - Medições realizadas na seção de controle da BHAC destacando o curso d'água com diferentes níveis d'água.	84
Figura 30 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a BHAC.	85
Figura 31 - Medições realizadas na seção de controle da BHACN com diferentes níveis d'água.	86

Figura 32 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHACN.	86
Figura 33 - Medições realizadas na seção de controle da BHSE com diferentes níveis d'água.	87
Figura 34 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHSE.	87
Figura 35 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHRL.	88
Figura 36 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHRJ.	89
Figura 37 - Polígonos de Thiessen obtidos para a rede de monitoramento da BHAP e estações com influência nas BHAC, BHACN e BHSE.	90
Figura 38 - Ilustração da separação de escoamento para um evento da BHAC, utilizando o método das Inflexões A e C.	92
Figura 39 - Exemplo de hietograma de precipitações efetivas considerando a área de drenagem extraída do MDE gerado por diferentes fontes de informação do relevo, exaltando a diferença nos valores obtidos entre as Cartas e os demais MDEs, para um evento da BHAC.	107
Figura 40 - Eventos da BHAC enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.	129
Figura 41 - Eventos da BHACN enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.	133
Figura 42 - Eventos da BHRJ enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.	136
Figura 43 - Eventos da BHRL enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.	140

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Área de drenagem (A , em km^2) e perímetro (P , em km), obtidos a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas estudadas	56
Tabela 2 - Altitude mínima ($Y_{\text{mín}}$, em m), altitude máxima ($Y_{\text{máx}}$, em m) e declividade média da bacia (S_b , em %) obtidas a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas estudadas	59
Tabela 3 - Fontes com melhor (M) e pior (P) desempenho na estimativa das classes de declividade, referentes aos maiores e menores percentuais de acerto da classe de declividade, pixel a pixel, para cada uma das bacias hidrográficas analisadas ...	63
Tabela 4 - Comprimento total dos cursos d'água (ΣL , em km), comprimento do curso d'água principal (L , em km) e declividade do curso d'água principal (S_r , em %) obtidos a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas de estudo	65
Tabela 5 - Razão de bifurcação (R_B), razão de comprimento (R_L) e razão entre áreas (R_A) e comprimento do curso d'água de maior ordem (L_Ω , em km) para as bacias hidrográficas de estudo, considerando diferentes fontes de informação do relevo ...	69
Tabela 6 - Data e horário do início e do fim das vazões de ESD na seção de controle, vazão máxima de ESD ($Q_{\text{ESD,MÁX}}$), velocidade máxima de ESD ($V_{\text{ESD,MÁX}}$), precipitação total (P_{TOTAL}), intensidade média da precipitação ($i_{\text{MÉD}}$), e intensidade máxima da precipitação de 60 minutos ($i_{\text{MÁX}}$) dos eventos selecionados em cada bacia hidrográfica avaliada.....	104
Tabela 7 - Precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação acumulada dos cinco dias antecedentes (P_5), abstrações iniciais (I_a), precipitação efetiva (P_{EFETIVA}), coeficiente de ESD (C) e valor de CN, obtidos para os eventos selecionados em cada bacia hidrográfica analisada.	108
Tabela 8 - Parâmetros extraídos dos MDEs extraídos das diferentes fontes de informações do relevo e utilizados para a obtenção dos parâmetros do HUIN para cada bacia hidrográfica analisada pelas propostas P_1 e P_2 , a saber: área (A , em milhas quadradas), comprimento do curso d'água principal (L , em milhas), declividade média da bacia (S_b , em partes por 10.000) e declividade do curso d'água principal (S_r , em partes por 10.000)	114
Tabela 9 - Parâmetros extraídos dos MDEs extraídos das diferentes fontes de informações do relevo e utilizados para a obtenção dos parâmetros do HUIN para	

cada bacia hidrográfica analisada pelas propostas P_3 e P_4 , a saber: razão de bifurcação (R_B , adimensional), razão de comprimento (R_L , adimensional), razão entre áreas (R_A , adimensional) e comprimento do curso d'água de maior ordem (L_Ω , em km).....	115
Tabela 10 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHAC, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.	117
Tabela 11 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHACN, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.	118
Tabela 12 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHRJ, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.	120
Tabela 13 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHRL, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados	121
Tabela 14 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHSE, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados	122
Tabela 15 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHAC com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entre os MDEs e as propostas utilizadas	126
Tabela 16 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHACN com base em 8 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entres os MDEs e as propostas utilizadas	130
Tabela 17 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHRJ com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entres os MDEs e as propostas utilizadas	134
Tabela 18 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHRL com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entres os MDEs e as propostas utilizadas	138
Tabela 19 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHSE com base em 5 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entres os MDEs e as propostas utilizadas	141

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMC	Antecedent Moisture Content
ANA	Agência Nacional de Águas
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ASTER	Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer
BHAC	Bacia hidrográfica do arroio Cadeia
BHACN	Bacia hidrográfica do arroio Caneleira
BHAP	Bacia hidrográfica do arroio Pelotas
BHRJ	Bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara
BHRL	Bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha
BHSE	Bacia hidrográfica da sanga Ellert
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CN	Curva-Número
DLR	Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt
DoD	Department of Defense
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESD	Escoamento Superficial Direto
FDP	Função de densidade de probabilidade
GNSS	Global Navigation Satellite System
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 Geomorfológico
HUIN	Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InSAR	Interferometria por radar de abertura sintética
LASH	Lavras Simulation of Hydrology

LiDAR	Light Detection and Ranging
LISEM	Llmburg Soil Erosion Model
MAE	Erro Médio Absoluto
MDE	Modelo Digital De Elevação
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NRCS	Natural Resources Conservation Services
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USDA	United States Department of Agriculture

Lista de Símbolos

P_e	Precipitação efetiva
D	Duração da precipitação efetiva
P_u	Precipitação unitária
Δt	Intervalo de modelagem
A	Área da bacia hidrográfica
$q(t)$	Ordenada do HU no tempo t
$u(t)$	Ordenada do HUI no tempo t
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
k	Parâmetro do HUI de Nash
n	Parâmetro do HUI de Nash
Γ	Função gama
y_i	Valor do pixel do MDE de interesse
o_i	Valor do pixel do MDE adotado como referência
P	Perímetro da bacia hidrográfica
S_b	Declividade média da bacia hidrográfica
ΣL	Comprimento total dos cursos d'água
R_B	Razão de bifurcação
R_L	Razão de comprimento
R_A	Razão entre áreas
L_Ω	Comprimento do curso d'água de ordem mais alta
L	Comprimento do curso d'água principal
S_r	Declividade do curso d'água principal
Q	Vazão
H	Lâmina d'água
v	Velocidade dinâmica do escoamento
K_{A-C}	Constante de depleção do método da reta A-C

P	Precipitação total
S	Capacidade de armazenamento de água no solo
I_a	Perdas por abstração inicial
CN	Número da Curva
$m_{1(HUI)}$	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
t_p	Tempo de pico
q_p	Vazão de pico
C_{NS}	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
$Q_{i_{obs}}$	Vazão observada do HESD no tempo $t=i$
$Q_{i_{est}}$	Vazão simulada do HESD no tempo $t=i$
$\bar{Q}_{obs}$	Vazão média observada
ER_{Qp}	Erro relativo na estimativa de vazão de pico
$Q_{p_{obs}}$	Vazão de pico observada
$Q_{p_{est}}$	Vazão de pico simulada
ER_{tp}	Erro relativo na estimativa de tempo de pico
$t_{p_{obs}}$	Tempo de pico observada
$t_{p_{est}}$	Tempo de pico simulada

Sumário

1 Introdução	21
1.1 Hipóteses.....	24
1.2 Objetivo geral	25
1.2.1 Objetivos específicos.....	25
2 Revisão de Literatura	26
2.1 Ciclo hidrológico e bacias hidrográficas	26
2.2 SIG e os recursos hídricos.....	27
2.3 Modelagem chuva-vazão	30
2.4 Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)	
31	
2.5 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico	36
2.6 Fontes de informações do relevo	39

Capítulo 1 - Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo na modelagem geomorfológica de bacias hidrográficas

43

1 Introdução	44
2 Metodologia.....	47
2.1 Bacias hidrográficas e caracterização fisiográfica.....	47
2.2 MDEs utilizados e delimitação de bacias hidrográficas	50
2.3 Caracterização do relevo e medidas estatísticas de desempenho	52
2.4 Caracterização da hidrografia	53
3 Resultados e discussão	56
3.1 Caracterização morfométrica das bacias hidrográficas	56
3.2 Caracterização do relevo e medidas estatísticas de desempenho	58
3.3 Caracterização da hidrografia	64
4 Conclusões	71

Capítulo 2 - Avaliação de propostas geomorfológicas do modelo de Nash para estimativa de cheias: influência da fonte e da escala de informações do relevo

72

1 Introdução	73
---------------------------	-----------

2 Metodologia.....	76
2.1 Área de estudo e monitoramento hidrológico.....	76
2.2 Campanhas hidrológicas e curvas-chave estabelecidas.....	83
2.3 Seleção dos eventos	89
2.4 Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (Pe)	92
2.5 Modelagem hidrológica com o Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash	94
2.6 Análise do desempenho do HUIN modelado de acordo com diferentes propostas geomorfológicas e fontes de informações do relevo	101
3 Resultados e discussão	103
3.1 Eventos hidrológicos empregados	103
3.2 Precipitação efetiva e hietogramas	106
3.3 Parâmetros obtidos para as propostas geomorfológicas do HUIN	113
3.4 Desempenho dos modelos frente a estimativa de hidrogramas de ESD	126
4 Conclusões	144
Considerações Finais	146
REFERÊNCIAS	148
Apêndices.....	171
Apêndice A – Caracterização geomorfológica das bacias hidrográficas	172
Apêndice B – Eventos chuva-vazão analisados	207

1 Introdução

A água é um recurso natural indispensável à vida e essencial ao desenvolvimento econômico de uma região. Devido ao grande crescimento populacional aliado à variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica, diferentes esferas da sociedade têm sido alarmadas quanto à sua oferta em quantidade e qualidade. Além disso, de acordo com Mikhailova *et al.* (2012), as mudanças climáticas, associadas às ações antrópicas e ao crescimento populacional, têm provocado a ocorrência de eventos extremos de precipitação, aumentando a imprevisibilidade dos processos hidrológicos e culminado em inúmeros problemas relacionados a cheias em bacias hidrográficas. Frente a este cenário, o planejamento, desenvolvimento e gerenciamento de recursos hídricos vêm se tornando cada vez mais necessário, uma vez que problemas como esses têm causado sérios danos ambientais (GHUMMAN *et al.*, 2012).

Durante o planejamento dos recursos hídricos, um dos grandes interesses é o estudo de cheias em bacias hidrográficas, permitindo a quantificação da magnitude da vazão máxima associada a uma dada frequência (vazão de projeto) ou da sequência temporal de vazões (hidrograma) oriundas de um ou mais eventos de chuva (KUMAR *et al.* 2007; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015). A determinação das vazões de projeto ou hidrogramas pode ser realizada a curto prazo, servindo de subsídio à uma rede de monitoramento e alerta, ou a longo prazo, utilizando conhecimentos da hidrologia estatística para prever comportamentos futuros. Nesse contexto, a existência de séries históricas torna-se essencial para gestão de recursos hídricos. Entretanto, em países em desenvolvimento (e.g. Brasil) é comum a existência de um número insuficiente de seções de controle de cursos d'água com monitoramento fluviométrico (BESKOW *et al.*, 2013), tornando a modelagem hidrológica de cheias uma ferramenta ainda mais imprescindível (ADIB *et al.*, 2010; SAHOO *et al.*, 2006).

Diferentes metodologias para estimativa de vazões e hidrogramas de cheias vem sendo apresentadas e utilizadas na literatura, como o método Racional (JABUR; RIZZI, 2011; TUCCI, 2000), a regionalização hidrológica (CASSALHO *et al.*, 2017; ZAMAN *et al.*, 2012) e os modelos baseados na teoria do Hidrograma

Unitário (HU) (ADIB *et al.*, 2010; ELLOUZE-GARGOURI; BARGAOUI, 2012; SINGH *et al.*, 2014).

O HU, proposto por Sherman (1932), é uma teoria para modelagem do escoamento superficial amplamente utilizada (SINGH, 1976; GOTTSCHALK; WEINGARTNER, 1998; JENA; TIWARI, 2006; SUDHAKAR *et al.*, 2015), que considera a resposta de um pulso unitário de precipitação sobre uma área de drenagem identificada a partir de uma série temporal conhecida de precipitação e escoamento (SINGH, 2015). Esta teoria clássica tem motivado o desenvolvimento de vários modelos conceituais, como o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI), proposto por Clark (1945), que propaga uma unidade de precipitação efetiva derivada pelo método do histograma tempo-área (HTA), simulando um reservatório linear.

Um dos modelos de HUI amplamente utilizados é o de Nash (1957) (BHUNYA *et al.*, 2004; HOSSEINI *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2008). O HUIN simula a propagação do escoamento na bacia hidrográfica a partir de n reservatórios lineares com armazenamento idênticos, cujos parâmetros podem ser facilmente identificados pelo método de momentos (CHOI *et al.*, 2011). Além da necessidade de informações provenientes de redes de monitoramento hidrológico, esses modelos conceituais requerem constante atualização dos parâmetros, em virtude das mudanças climáticas e bióticas das bacias hidrográficas (BHASKAR *et al.*, 1997; KUMAR *et al.*, 2007).

Rodríguez-Iturbe; Valdés (1979), partindo do pressuposto de que as bacias hidrográficas geralmente seguem as leis geomorfológicas de Horton (1945), conceituaram o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG). Segundo os autores, o HUI de uma bacia hidrográfica pode ser interpretado como uma função de densidade de probabilidade (FDP) do tempo de viagem de uma gota de água que cai em qualquer lugar da bacia até o exutório. Desde então, diversos autores vêm fazendo aproximações geomorfológicas dos modelos conceituais, onde os parâmetros de ajuste são obtidos a partir da caracterização física da bacia hidrográfica e da rede de drenagem (BHAGWAT *et al.*, 2011; BHASKAR *et al.*, 1997; ROSSO, 1984; SAHOO *et al.*, 2006; SWAIN *et al.*, 2015).

Um dos modelos que apresenta diferentes propostas geomorfológicas para a obtenção de seus parâmetros é o HUIN. Seja com base na área e no comprimento do curso d'água principal da bacia (NASH, 1960; WU, 1963) ou nas razões de

Horton (1945) e de Schumm (1956) (ROSSO, 1984; BHASKAR *et al.*, 1997), alguns autores têm obtido aproximações matemáticas para os parâmetros n e k , com desempenho satisfatório, verificado, inclusive, em bacias localizadas em regiões diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas. Contudo, algumas destas propostas ainda são pouco conhecidas e aplicadas na literatura, visto que seus desempenhos variam de acordo com os parâmetros de entrada, que por sua vez, possuem grandezas limitadas às utilizadas no estudo de origem e dependem da base de dados disponível para a extração de seus valores.

De acordo com Hosseini *et al.* (2016), a ligação dos parâmetros geomorfológicos com as características hidrológicas da bacia hidrográfica pode fornecer uma maneira mais simples e precisa de entender seu comportamento hidrológico. Para isso, faz-se necessária a correta delimitação dos seus divisores de água, devendo este, ser o primeiro procedimento realizado em estudos ligados à sua modelagem hidrológica e ambiental (SEYLER *et al.*, 2009)

No processo de delimitação e caracterização de bacias hidrográficas em softwares de geoprocessamento, a principal informação é a do relevo, obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) (JARIHANI *et al.* 2015). Segundo Zhang *et al.* (2017), o MDE é uma representação matricial das elevações contínuas do terreno acima de um nível de base comum, que pode ser obtido de diferentes formas: por meio da interpolação de curvas de nível extraídas de cartas topográficas altimétricas, por interferometria de radar, como as geradas pelo radar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (FARR *et al.*, 2007) e por imagens estéreo ópticas, como as obtidas pelo sensor *Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) (ASTER GDEM VALIDATION TEAM, 2011).

De forma geral, a fonte mais comum para a geração de MDEs é aquela constituída por curvas de nível, pontos de altitude e, de forma complementar, pela rede hidrográfica, obtidas em cartas topográficas (THOMAS *et al.*, 2014). Segundo Chagas *et al.* (2010), o MDE derivado de curvas de nível na escala 1:50.000 e obtido através de técnicas de interpolação tem apresentado qualidade superior aos modelos derivados de sensores remotos, tais como SRTM e ASTER. Devido à confiabilidade e facilidade de aquisição de dados oriundos das imagens de sensores remotos, estes vêm sendo cada vez mais utilizados para a geração de MDEs (BECEK, 2014; SILVA *et al.* 2015). Entretanto, de acordo com Zhang *et al.* (2014), a resolução espacial obtida destes produtos, geralmente de 30m e 90m, na maioria

das vezes, não atende as escalas de informações necessárias para o desenvolvimento de estudos mais detalhados.

Sharma; Tiwari (2014) ressaltam que os métodos de coleta dos pontos de elevação e/ou os princípios empregados para a geração do MDE diferem entre as fontes, o que pode introduzir incertezas e, conseqüentemente, influenciar na extração da rede de drenagem (SAHOO *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2015), caracterização morfométrica de bacias (SEYLER *et al.*, 2009; THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2015; VIEIRA *et al.*, 2012) e modelagem hidro-geomorfológica (CHAVAN; SRINIVAS, 2015; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015).

Logo, uma vez que as propostas geomorfológicas para o HUIN utilizam diferentes variáveis explicativas para a obtenção dos parâmetros do modelo e estes variam conforme o MDE utilizado, a escolha da fonte e da escala de informação do relevo pode impactar nos valores dos parâmetros do HUIN e, conseqüentemente, na estimativa de hidrogramas de ESD e de vazões de pico, utilizados para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e em sistemas de previsão e alertas de enchentes.

1.1 Hipóteses

- A fonte e a escala de informações do relevo exercem influência na caracterização geomorfológica de bacias hidrográficas e, portanto, têm impacto sobre os hidrogramas de cheia estimados.
- O tamanho da bacia hidrográfica é um fator limitante para a utilização de algumas fontes de informações do relevo.
- O Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash apresenta-se como uma ferramenta promissora para a estimativa de hidrogramas.
- As diferentes formulações geomorfológicas do HUI de Nash resultam, para um mesmo evento de chuva, em hidrogramas distintos e não podem ser consideradas como universais.

1.2 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade e confiabilidade de diferentes fontes e escalas de informação do relevo obtidas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) visando à modelagem de cheias através do modelo de hidrograma unitário instantâneo de Nash fundamentado em parâmetros geomorfológicos, tomando como base cinco bacias hidrográficas experimentais de diferentes características fisiográficas e dotadas de monitoramento hidrológico.

1.2.1 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito dos MDEs oriundos das cartas topográficas na escala 1:50.000 e com resolução espacial de 25m, da missão SRTM com 30m (escala 1:60.000) e 90m (escala 1:180.000), do banco de dados TOPODATA com 30m (escala 1:60.000) e do sensor ASTER com 30m (escala 1:60.000) e, quando disponível, de levantamento planialtimétrico com 1m (escala 1:2.000), em relação a uma fonte adotada como verdadeira (cartas topográficas ou levantamento topográfico) na delimitação automática e na caracterização geomorfológica de bacias hidrográficas.
- Verificar quais os parâmetros geomorfológicos dentre a área, o perímetro, a declividade média, o comprimento total de cursos d'água, o comprimento e a declividade do curso d'água principal e as razões de Horton (1945) e de Schumm (1956), são mais impactados pela fonte e escala da informação do relevo.
- Quantificar o impacto das diferentes fontes de informação do relevo nos parâmetros geomorfológicos necessários para o modelo de HUI de Nash, bem como nos hidrogramas de escoamento superficial direto estimados.
- Avaliar diferentes formulações geomorfológicas existentes na literatura para a determinação dos parâmetros do HUI de Nash e indicar as mais recomendadas para estimar hidrogramas de cheias nas bacias estudadas.

2 Revisão de Literatura

2.1 Ciclo hidrológico e bacias hidrográficas

A água é o recurso natural mais precioso da Terra e é essencial para a manutenção das atividades humanas e para o progresso econômico e social de uma região (NAIR *et al.*, 2017). Baptista; Cardoso (2013) descrevem que a história das relações do homem e suas cidades com os rios segue uma trajetória complexa, fundamentada na dinâmica e sazonalidade dos corpos d'água, no decorrer de distintos períodos, épocas e lugares. A expansão urbana e a explosão populacional decorrente do desenvolvimento industrial vêm acarretando em inúmeras modificações do ambiente natural, contudo, o impacto dessas modificações é percebido apenas quando da ocorrência de eventos hidrológicos extremos e de suas consequências, tais como estiagens severas e inundações (ANDRADE *et al.*, 2012; KUMAR *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2013).

Segundo Prasad *et al.* (2015), estes cenários justificam uma abordagem científica multidimensional para avaliar os recursos hídricos e sua distribuição para propor estratégias de gerenciamento sustentáveis. Para isso, se faz necessário o estudo e o conhecimento do ciclo hidrológico, ou seja, como ocorre a circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, em seus diferentes estados e ambientes do globo terrestre (Figura 1). Tal ciclo possui importantes componentes que estão associados à dinâmica da água, dos quais se destacam o escoamento superficial direto, a precipitação, a evapotranspiração e a interceptação.

Devido às complexidades envolvidas no estudo dos componentes do ciclo hidrológico em escala global, se faz necessária a delimitação de uma região de estudo em escala regional/local. O modelo de gestão de recursos hídricos, instituído pela Lei 9.433 (BRASIL, 1997), estabelece a bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial. Thomas; Prasannakumar (2015) ressaltam que, embora vista de forma diferente por geólogos, pedólogos e hidrólogos em termos de forma *versus* processo, a bacia hidrográfica é considerada a unidade de paisagem fundamental responsável pela coleta e distribuição de água e sedimentos (ALTAF *et al.*, 2013; OZDEMIR; BIRD, 2009).

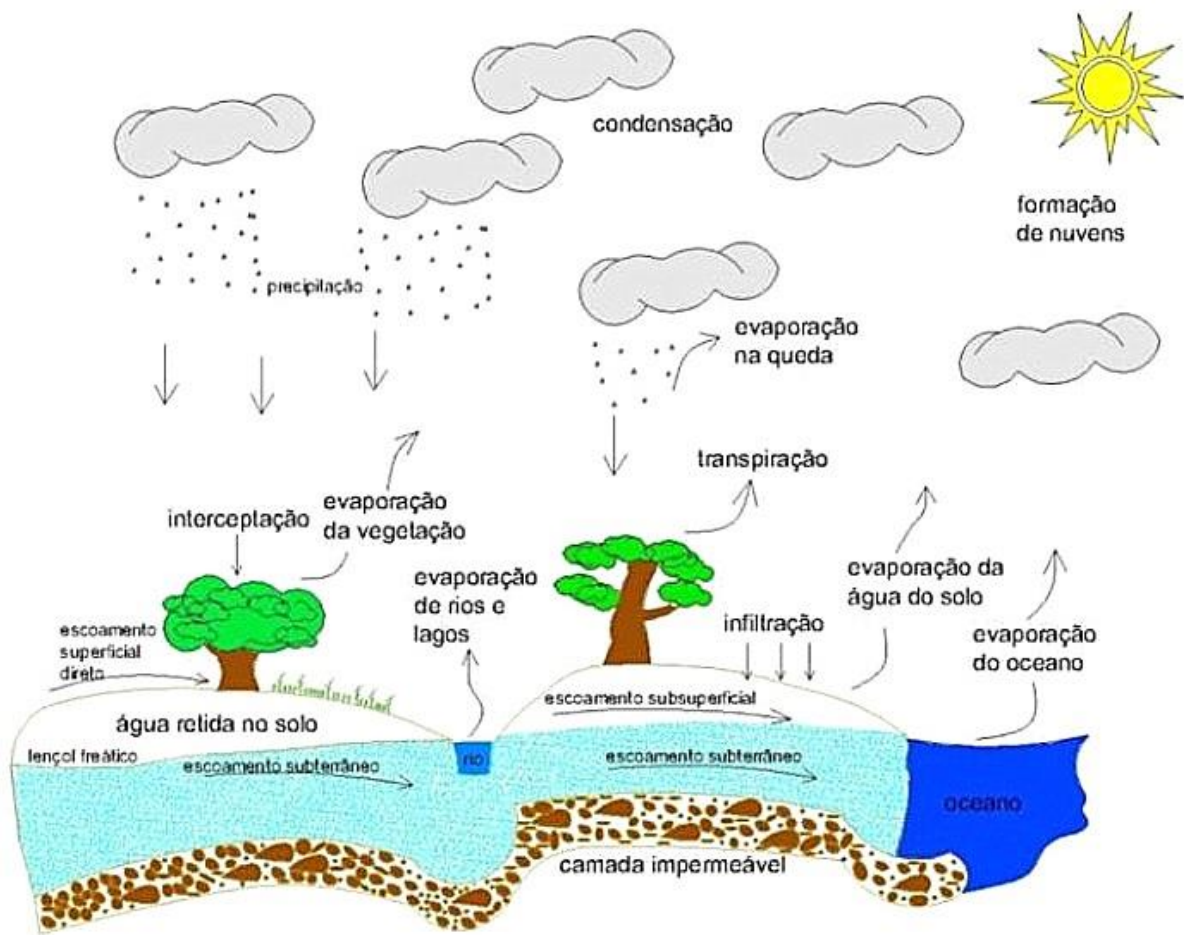


Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico em escala global.
Fonte: Beskow *et al.* (2015)

Segundo Choi; Engel (2003), a bacia hidrográfica é a área de captação natural da água de precipitação que converge o escoamento para apenas um e único ponto de saída, funcionando como uma unidade de planejamento e gestão que proporciona o entendimento do solo, da água e da cobertura vegetal (PETSCH *et al.*, 2012; SREEDEVI *et al.*, 2009). De acordo com Tonello *et al.* (2006), as características físicas e bióticas de uma bacia exercem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, principalmente, a infiltração, o escoamento e a evapotranspiração.

2.2 SIG e os recursos hídricos

O desenvolvimento dos softwares de geoprocessamento, permitindo armazenar, manipular e analisar fenômenos geográficos (ALTAF *et al.* 2013; KUMAR *et al.*, 2015), favoreceu a elaboração dos Sistemas de Informações

Geográficas (SIGs). Um SIG pode ser definido como um conjunto de funções automatizadas, que fornece aos profissionais, capacidades avançadas de acessar, manipular e visualizar diferentes planos de informação georreferenciados (OZERNOY *et al.*, 1981).

Segundo Christofletti (2001), o SIG permite descrever a complexidade dos processos ambientais em diversos níveis de relação, simplificação, generalização e abstração, permitindo a integração dos diferentes elementos formadores da paisagem que contribuem para a modelagem do relevo (SILVA *et al.*, 2015).

A grande vantagem dos SIGs está na possibilidade de integrar e cruzar diferentes informações geográficas em um mesmo ambiente a fim de mapear diferentes características, como as representadas na Figura 2, e associá-las a determinados bancos de dados, facilitando análises espaciais de fenômenos naturais em um curto espaço de tempo (GOMES *et al.*, 2015; NAIR *et al.*, 2017).

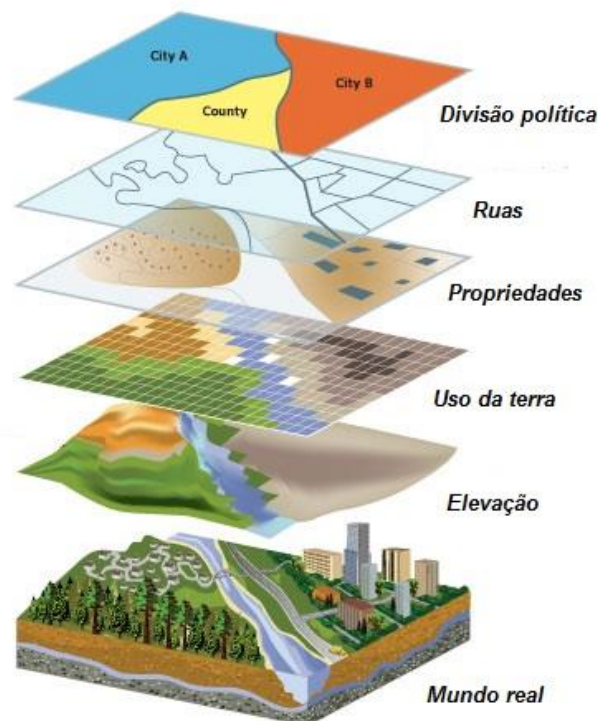


Figura 2 – Representação de diferentes planos de informações em um SIG.

Fonte: Adaptado de <http://shawneepsi.com/gis-designs/> (Acesso em 20 de jan de 2018).

Os SIGs têm sido utilizados para diversos fins em relação à modelagem hidrológica, seja na elaboração e representação do modelo digital de elevação, na caracterização do uso e ocupação do solo da bacia, ou na aplicação direta do acoplamento entre modelos hidrológicos. De acordo com Magesh *et al.* (2012), o acoplamento entre SIGs e modelos hidrológicos se constitui em uma ferramenta que

permite a integração entre os componentes espaciais, sociais, bióticos e físicos, permitindo simulações do comportamento hidrológico, a partir da manipulação das características físicas da bacia.

Nos últimos anos, a utilização de dados obtidos por sensores remotos tem possibilitado que os SIGs explorem com sucesso as informações relacionadas às variações espaciais e, conseqüentemente, às redes de drenagem, fornecendo informações sobre as condições hidrológicas e servindo de subsídio para o gerenciamento de bacias hidrográficas (DAS; MUKHERJEE, 2005; VITTALA *et al.*, 2004).

Nair *et al.* (2017) ressaltam a importância do desenvolvimento da tecnologia e de softwares de geoprocessamento para a elaboração e o aprimoramento dos SIGs., como por exemplo, o QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017) e o ArcGIS (ESRI, 2014). A automação dos métodos de extração permite determinar parâmetros hidrológicos e físicos do ambiente muito rapidamente, particularmente quando as bacias hidrográficas são maiores e, portanto, a extração manual torna-se mais trabalhosa (MENDAS, 2010).

De acordo com Veith *et al.* (2010), a grande vantagem dos SIGs, do ponto de vista hidrológico, é que os mesmos permitem o desenvolvimento e a aplicação de modelos hidrológicos com maior embasamento físico, nos quais a representação dos parâmetros dos modelos pode ser feita de forma discretizada. Segundo Tucci (2005), três modelos são adotados como estrutura de discretização na hidrologia: o concentrado, o distribuído por sub-bacias e o distribuído por módulos.

No modelo concentrado, geralmente usado em bacias de pequeno porte, considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada. O modelo distribuído por sub-bacias permite a divisão da bacia em sub-bacias com base nos canais naturais e nos caminhos de escoamento da bacia, enquanto que, no modelo distribuído por módulos, a discretização é baseada na divisão do espaço em células, formando uma grade regular que permite um maior nível de detalhamento dos processos na bacia hidrográfica.

Chen *et al.* (2007) ressaltam que os modelos hidrológicos distribuídos geralmente têm melhor desempenho do que a maioria dos modelos hidrológicos com estrutura concentrada, pois procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, da natureza do solo, da ocupação do solo e do relevo, bem como da distribuição espacial da precipitação (SILANS *et al.*, 2000).

2.3 Modelagem chuva-vazão

Segundo Alexandre *et al.* (2013), os modelos hidrológicos surgiram como resposta à necessidade de compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a sua quantidade e qualidade. Neste contexto, a modelagem chuva-vazão vem sendo de grande importância para estudos de contenção de cheias, monitoramento de qualidade de água, erosão e gerenciamento de bacias hidrográficas, servindo de subsídio para a análise dos possíveis impactos da urbanização e poluição (CRISS; WINSTON, 2008) e desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos (GHUMMAN *et al.*, 2014).

Neste contexto, vários modelos conceituais vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos, dos quais se destacam os que fazem a transformação chuva-vazão considerando todo o ciclo hidrológico e os que fazem a transformação apenas relacionando dados de chuva e vazão. Alguns modelos, como por exemplo o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e o LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*), são modelos chuva-vazão de longo termo, ou seja, fazem simulações para longos períodos (anos de dados). De outro lado, há modelos chuva-vazão que são para eventos isolados de chuva, tais como aqueles baseados na teoria do Hidrograma Unitário (HU) ou aqueles que consideram outros processos hidrológicos, como o LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*).

De acordo com Kumar (2015), devido ao envolvimento de grande variabilidade espacial e temporal de características geofísicas e climáticas, as bacias naturais apresentam um fenômeno extremamente complexo de transformação da precipitação em escoamento, que se torna ainda mais desafiador quando os dados são limitados ou escassamente disponíveis (AHMAD *et al.*, 2010; BEKELE; KNAPP, 2010; GHUMMAN *et al.*, 2012).

No Brasil, a rede de monitoramento hidrológico e o gerenciamento das informações hidrológicas são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). Assim como acontece nos demais países em desenvolvimento (KUMAR *et al.*, 2007; AHMAD *et al.*, 2009; GHUMMAN *et al.*, 2011), a realidade é de poucos postos hidrológicos ou com séries de curta duração, consolidando uma rede de monitoramento precária, que contempla apenas médias e grandes bacias (BESKOW *et al.*, 2013; SAHOO *et al.*, 2006). De acordo com Beskow *et al.* (2013), o

monitoramento hidrológico em pequenas bacias hidrográficas é de grande importância para a obtenção de informações que podem ser utilizadas para o dimensionamento de pontes e bueiros em estradas, em estudos hidrológicos para aproveitamento de água e, geralmente, fica sob responsabilidade de grupos de pesquisas.

Devido à carência de dados de vazão, costuma-se então efetuar a modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas que disponham de dados pluviométricos. Segundo Collischonn; Dornelles (2013), para que a modelagem chuva-vazão seja realizada, costuma-se admitir uma relação linear entre a parcela de chuva que gera escoamento superficial (chuva efetiva) e a vazão. Khaleghi *et al.* (2011) ressaltam que os principais problemas vinculados a essa aplicação incluem a carência ou baixa precisão dos dados pluviométricos, carência de informações sobre as bacias e a quantidade de tempo requerido para obter os resultados.

Contudo, com o desenvolvimento de SIGs e de técnicas do Sensoriamento Remoto, este tipo de investigação científica vem sendo altamente aceita, uma vez que a espacialização das variáveis de entrada dos modelos se tornou possível (GREEN *et al.*, 2006; STACKELBERG *et al.*, 2007). Atualmente, dentre os modelos propostos na literatura, os baseados na teoria do HU têm sido amplamente utilizados, tanto para a modelagem de vazões máximas e hidrogramas de cheias (AGIRRE *et al.*, 2005; NOURANI *et al.*, 2009; SUDHAKAR *et al.*, 2015), como no planejamento e na gestão de cheias em bacias hidrográficas (HOSSEINI *et al.*, 2016; SUDHAKAR *et al.*, 2015).

2.4 Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

O hidrograma unitário foi proposto por Sherman (1932), tendo como base os princípios da proporcionalidade e superposição, com a bacia hidrográfica atuando como um sistema linear e invariante no tempo, permitindo uma função de resposta constante (GENOVEZ, 2001).

O princípio da proporcionalidade (Figura 3) considera que para uma precipitação efetiva (P_e) com duração (D), o volume de ESD é proporcional à intensidade da precipitação. Logo, com o aumento da intensidade da P_e , há um aumento no volume de ESD, e com a diminuição da intensidade, há diminuição do

volume de ESD, ambos proporcionais ao aumento e à diminuição da intensidade da P_e , respectivamente.

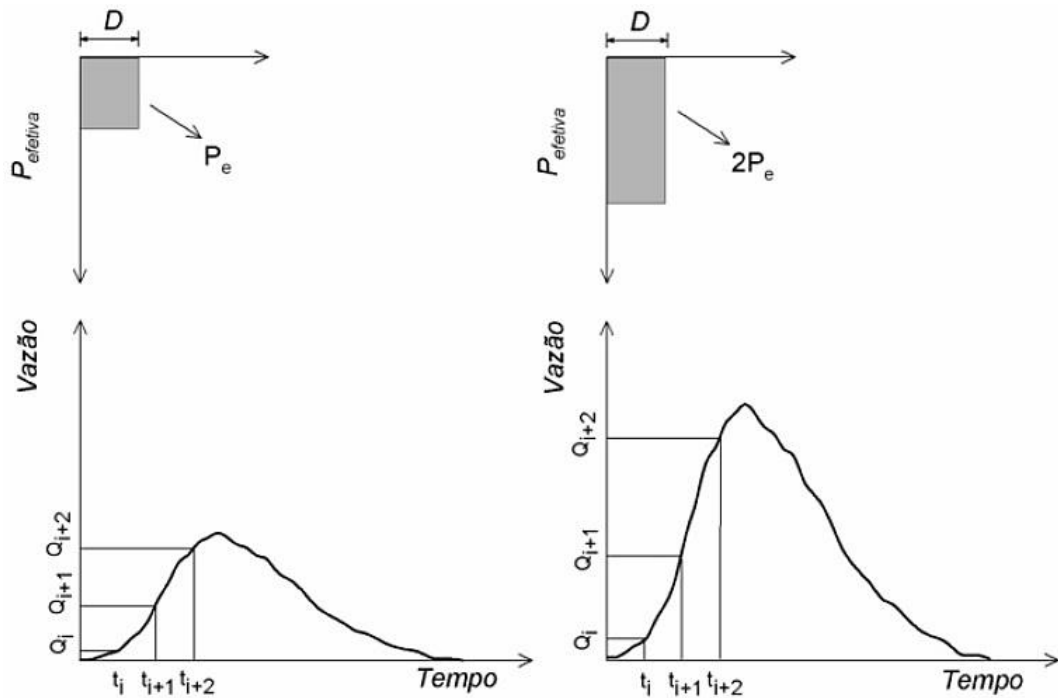


Figura 3 - Princípio da proporcionalidade na teoria do HU.
Fonte: Nunes (2015)

O princípio da superposição (Figura 4), por sua vez, estabelece que as vazões de um hidrograma de ESD produzidas por sucessivas P_e 's podem ser obtidas a partir da soma das vazões dos hidrogramas de ESD correspondentes às P_e 's individuais (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

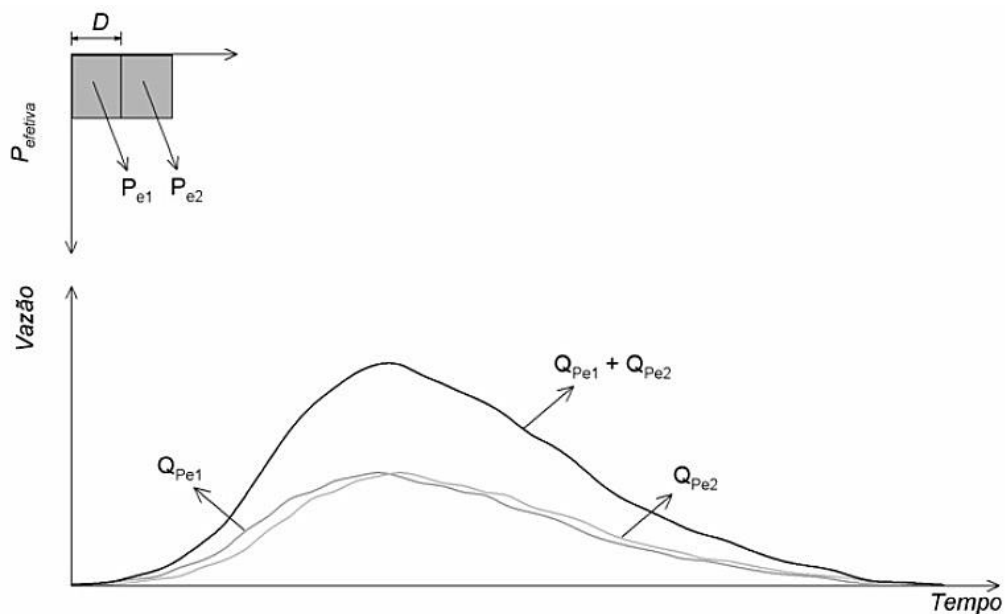


Figura 4 - Princípio da superposição de hidrogramas.
Fonte: Nunes (2015)

Esse processo de transformação das vazões produzidas por sucessivas Pe's em um único hidrograma de ESD é conhecido como convolução e pode ser descrito pela Equação 1:

$$Q_M = \sum_{N=1}^N (P_N \cdot q_{M-N+1}) \quad (1)$$

Em que M é a ordenada do hidrograma final e N é número de precipitações efetivas.

De acordo com Singh (2014), a abordagem do HU é amplamente utilizada com sucesso para a modelagem baseada em eventos de escoamento e pode ser desenvolvida tanto para bacias monitoradas ou não monitoradas (SULE; ALABI, 2013). Contudo, como a aplicação desta teoria exige o conhecimento das vazões que caracterizam o HU para uma bacia hidrográfica, atrelada a uma da Pu com duração D, normalmente sua aplicação restringe-se apenas a bacias monitoradas.

Objetivando uma boa compreensão hidrológica dos processos envolvidos, diversos modelos vindo sendo propostos a partir da teoria do HU. Segundo Rai *et al.* (2009), esses modelos podem ser amplamente classificados como modelos empíricos e conceituais. Os modelos empíricos apresentam algumas limitações, pois são específicos para o local de estudo, enquanto que os modelos conceituais são flexíveis e baseados na simplificação e/ou aproximação de conceitos físicos dos processos envolvidos.

Para sanar os problemas envolvendo a carência de dados e/ou a falta de monitoramento em bacias hidrográficas, os hidrólogos passaram a desenvolver modelos com equações puramente empíricas, tais como o hidrograma unitário sintético proposto por Snyder (1938), e os hidrogramas unitários Adimensional e Triangular desenvolvidos na década de 70 pelo *Soil Conservation Service* (SCS), atualmente denominado *Natural Resources Conservation Services* (NRCS) do *United States Department of Agriculture* (USDA).

Segundo Jena; Tiwari (2006), os hidrogramas sintéticos objetivam ampliar a aplicação teórica do HU para bacias hidrográficas não monitoradas, relacionando sua forma com as características morfométricas da bacia hidrográfica a partir de equações empíricas. Apesar da facilidade de aplicação destes modelos, os mesmos podem não representar satisfatoriamente as condições de locais para os quais não foram desenvolvidos. Frente a isso, inúmeros modelos conceituais vêm sendo

propostos para uma melhor representação do comportamento de resposta da bacia, com base na analogia física ou a partir de simulação matemática.

Em 1945, Clark introduziu o conceito do hidrograma unitário instantâneo (HUI), definindo que a resposta da bacia seria independente da duração, se referente a uma chuva unitária instantânea, conhecida em termos matemáticos como um pulso unitário instantâneo. Cleveland *et al.* (2006) ressaltam que a grande vantagem do HUI é que o mesmo não necessita de precipitações efetivas em intervalos de tempo específicos e, assim, elimina a suposição principal do HU, isto é, a uniformidade da precipitação efetiva durante o evento (ALEMNGUS; MATHUR, 2014).

Para a obtenção do HU, a partir do HUI, basta aplicar a equação de convolução, descrita a seguir, convertendo matematicamente o escoamento simulado para um HU com uma P_u conhecida, incidindo sobre a área da bacia em um Δt de interesse.

$$q(t) = \frac{P_u}{\Delta t} \cdot A \cdot \int_0^{t^*} u(t - \tau) d\tau, \quad \begin{cases} t^* = t, & t < \Delta t \\ t^* = \Delta t, & t \geq \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

Em que, P_u é a precipitação unitária, A é a área da bacia hidrográfica, $u(t)$ é a ordenada do HUI no tempo t , $q(t)$ é a ordenada do HU na saída da bacia hidrográfica no tempo t e, Δt é o intervalo de tempo de interesse.

Clark (1945) propôs um modelo de HUI (Equação 3) que incorpora os processos de atenuação e translação na transformação da precipitação efetiva em ESD, considerando três parâmetros básicos: o tempo de concentração da bacia (t_c), o coeficiente de armazenamento (R) e o Histograma Tempo-Área (HTA).

$$Q_{i+1} = 2 \cdot C_0 \cdot R_{E(i)} + C_1 \cdot Q_i \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{0,5 \cdot \Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad (4)$$

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

Em que, Q é a ordenada do HUIC, i refere-se ao tempo, R_E é a precipitação efetiva, e C_0 e C_1 são coeficientes de ponderação, obtidos pelas Equações 4 e 5, respectivamente, nas quais Δt é o intervalo de simulação, em horas.

O processo de atenuação consiste na redução das vazões geradas pela P_e em decorrência do armazenamento na bacia hidrográfica, dada pelo coeficiente R , que pode ser obtido a partir da derivação da curva de recessão do hidrograma no ponto de inflexão (RAGHUNATH, 2006). O processo de translação é a defasagem de tempo entre a ocorrência de P_e e sua contribuição com a vazão na seção de controle, condicionado 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. A Figura 5 ilustra o HTA de uma bacia, e como o mesmo é obtido a partir das isócronas, que são linhas sobre pontos da bacia que têm o mesmo tempo de viagem até a seção de controle.

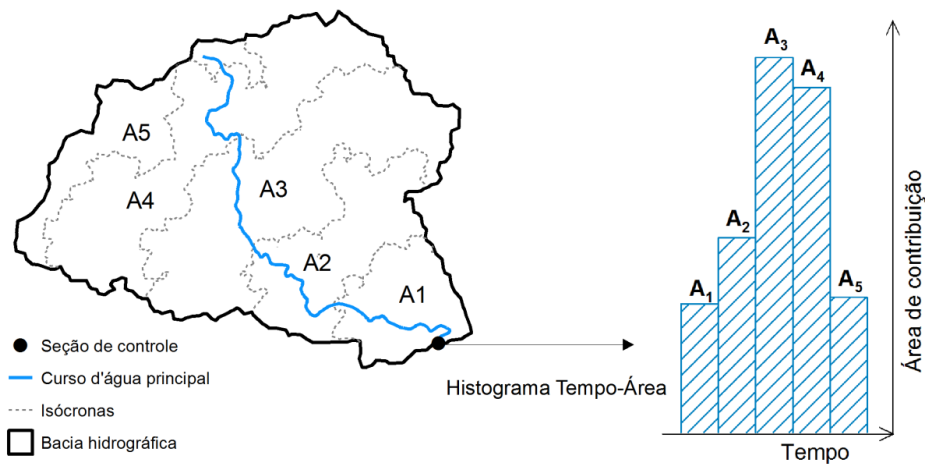


Figura 5 - Representação das isócronas de uma bacia hidrográfica e do HTA resultante das mesmas.
Fonte: Nunes (2015).

Nash (1957) propôs um modelo de HUI (Equação 6) que considera uma precipitação uniforme ao longo da bacia, cuja propagação até a seção de controle simula n reservatórios lineares em cascata (Figura 6) e o tempo médio de esvaziamento dos reservatórios é representado pelo parâmetro k . Este tem sido um dos modelos mais populares, pois fornece uma equação explícita para obtenção do HUI, em que os reservatórios têm um significado quase físico (NOURANI *et al.*, 2009).

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (6)$$

Em que, $u(t)$ denota as ordenadas do HUI do modelo de Nash, t é o tempo, n e k são os parâmetros do modelo Nash e Γ a função gama.

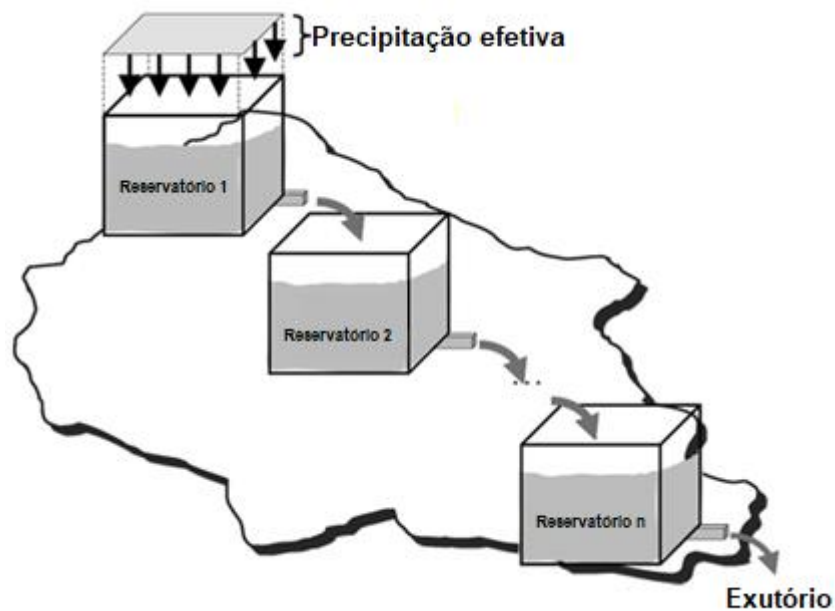


Figura 6 - Representação esquemática do processo de amortecimento da vazão pelo HUIN.
Fonte: Adaptado de Hosseini *et al.* (2016).

Esses modelos de HUIs, como o de Clark (1945) e o de Nash (1957), foram obtidos a partir de relações conceituais, portanto, não carregam informações de locais experimentais em suas formulações e podem ser aplicados a qualquer bacia hidrográfica. Contudo, seus parâmetros geralmente são obtidos a partir dos momentos estatísticos considerando dados de precipitação efetiva e do escoamento superficial observado, ou seja, requerem dados de monitoramento hidrológico para sua aplicação.

De acordo com Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), uma vez que a vazão de pico (Q_p) e o tempo de pico (t_p) de um HUI estão corretos, sua forma exata não é muito importante e uma aproximação triangular é bastante satisfatória. Partindo deste princípio, os autores introduziram o conceito de Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG), estabelecendo relação direta entre a geomorfologia da bacia hidrográfica e sua resposta hidrológica.

2.5 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico

O HUIG proposto por Rodriguez-Iturbe; Valdés (1979) pode ser interpretado como uma função de densidade de probabilidade (FDP) do tempo de viagem que uma gota d'água, precipitada em qualquer lugar da bacia, leva até a sua chegada ao

exutório, ou seja, como a resposta hidrológica da bacia hidrográfica (ADIB *et al.*, 2010; SINGH, 2015).

Segundo Himanshu *et al.* (2015), a resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica é função dos parâmetros climáticos, da topografia, dos atributos do solo e do uso da terra. Devido às mudanças climáticas e aos padrões de uso da terra, para qualquer modelo físico, os parâmetros precisam ser atualizados ao longo do tempo (RODRIGUEZ-ITURBE *et al.*, 1982; KUMAR *et al.*, 2007). Neste contexto, a relação dos parâmetros geomorfológicos com as características hidrológicas da bacia hidrográfica pode fornecer uma maneira mais simples e precisa de entender o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas não monitoradas (BHASKAR *et al.*, 1997; KUMAR, 2015), visto que, segundo Himanshu *et al.* (2015), os parâmetros geomorfológicos são de natureza invariante no tempo.

Diversos esforços vêm sendo realizados para relacionar as características geomorfológicas de bacias hidrográficas com os parâmetros dos HUIs conceituais de Clark (GHUMMAN *et al.*, 2014; KUMAR *et al.*, 2002) e de Nash (BHAGWAT *et al.*, 2011; CHOI *et al.*, 2011). Esses parâmetros geralmente são estimados empiricamente e, portanto, precisam de uma análise extensiva dos dados registrados (ROSSO, 1984; KUMAR, 2015), ou são regionalizados, utilizando dados de bacias hidrológicas calibradas (NASH, 1960; GHUMMAN *et al.*, 2011; SAHOO *et al.*, 2006).

Nash (1960), estudando bacias britânicas, obteve relações dos momentos do HUIN com algumas características do relevo, com maiores desempenhos utilizando a área, o comprimento do curso d'água principal e a declividade média da bacia. Avaliando bacias hidrográficas norte-americanas, Wu (1963) obteve relações para o t_p e o parâmetro k de Nash (1957), com melhores resultados utilizando a área, o comprimento e a declividade do curso d'água principal. Em ambos os trabalhos, várias características morfométricas foram estudadas e diferentes regressões foram obtidas.

Sorman (1995) aplicou as equações do HUIG de Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979) para estimar as vazões máximas resultantes de vários eventos de precipitação para as bacias hidrográficas da Arábia Saudita, conjuntamente com uma abordagem hidráulica para a estimativa das velocidades de onda cinemática e dinâmica.

Bhaskar *et al.* (1997) relacionaram o HUIG proposto por Rodriguez-Iturbe; Valdés (1979) com a teoria do HUIN a partir de conjuntos de dados de uma bacia hidrográfica localizada no leste da Índia. Neste estudo, n e k podem ser obtidos utilizando as razões R_B e R_L (HORTON, 1945) e R_A (SCHUMM, 1956), o comprimento do curso d'água de maior ordem e a velocidade do escoamento. Sahoo *et al.* (2006) e Bhagwat *et al.* (2011), ao reproduzirem a metodologia em outras bacias indianas, ressaltaram que a maior dificuldade da proposta é a obtenção do parâmetro velocidade, visto que o mesmo geralmente é obtido a partir de campanhas hidrológicas.

Frente a isso, os pesquisadores têm feito uso de algumas relações para obter a velocidade, seja com base em eventos monitorados de precipitação e vazão (ZELAZINSKI, 1986), em características fisiográficas da bacia hidrográfica (RODRIGUEZ-ITURBE *et al.*, 1982) ou em diferentes intensidades de precipitação (BHASKAR *et al.*, 1997; SAHOO *et al.*, 2006). A escolha das equações a serem empregadas varia conforme a disponibilidade de dados dos locais de aplicação e, principalmente, da existência ou não de monitoramento hidrológico.

Kumar *et al.* (2004) estudaram o HUI de Clark e Nash, em versões geomorfológicas, na bacia hidrográfica do rio Ajay, no leste da Índia. Segundo os autores, ambos os modelos estimaram de forma razoável os hidrogramas de ESD, sendo os parâmetros comprimento de curso d'água de maior ordem e velocidade mais sensíveis e R_L relativamente menos sensível na estimativa do pico do HUIG.

Adib *et al.* (2010) aplicaram os modelos HUIC e HUIN, em suas versões conceituais e geomorfológicas em uma bacia iraniana. Os autores observaram que as propostas geomorfológicas estimaram de forma satisfatória a vazão e o tempo de pico dos hidrograma simulados, com alguns resultados superiores aos obtidos pelas versões conceituais. Segundo os autores, os resultados obtidos ressaltam a vantagem da utilização de propostas geomorfológicas para derivar os parâmetros dos HUIs, utilizando apenas as informações obtidas a partir de mapas topográficos ou de sensoriamento remoto.

De acordo com Ellouze-Gargouri; Bargaoui (2012), o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto, MDEs e SIGs possibilitou não só a representação digital da bacia hidrográfica, como permitiu a parametrização das propostas HUIG (SAHOO *et al.*, 2006; KUMAR *et al.*, 2007).

2.6 Fontes de informações do relevo

O principal dado de entrada para a modelagem de HUIGs é o modelo digital de elevação (MDE). O MDE é uma representação em formato matricial (*raster*) da superfície do terreno desconsiderando os objetos nela existentes, tais como plantas e construções (ELKHRACHY, 2017), onde cada valor de altitude está em função de uma localização espacial (GAJALAKSHMI; ANANTHARAMA, 2015; ZHAO *et al.* 2016).

Os MDEs podem ser gerados a partir de diferentes fontes de informações do relevo, como dados de cartas topográficas digitalizadas, dados coletados a campo com receptores de GNSS (Global Navigation Satellite System) ou nivelamento com estação total, aerofotografias e imagens de sensores remotos (ATHMANIA; ACHOUR, 2014; ZHANG *et al.*, 2017). Cada fonte possui um tipo de altitude e uma forma de aquisição das informações de altitude diferenciada, além de utilizarem algoritmos distintos durante o processamento dos dados, o que pode implicar em diferenças entre os MDEs gerados.

Com relação ao tipo de altitude, de acordo com Seeber (2003), os MDEs podem apresentar altitudes ortométricas (H) ou elipsoidais (h), cujas diferenças estão ilustradas na Figura 7. As altitudes ortométricas possuem relação com a aproximação da Terra dada por um geóide, estão associadas à gravidade, e são obtidas, geralmente, por meio de cartas topográficas ou de levantamentos topográfico baseados em RNs. As altitudes elipsoidais possuem relação com a aproximação da Terra dada por um elipsoide, estão associadas a modelos matemáticos, e geralmente são obtidas a partir de satélites.

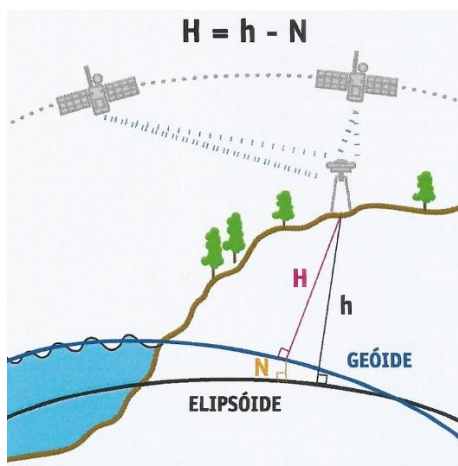


Figura 7 – Representação das altitudes ortométrica e elipsoidal, e da relação entre elas.
Fonte: Adaptado de <<https://goo.gl/obA6Zo>> Acesso em 20 de janeiro de 2018.

De acordo com IBGE (2017), as cartas topográficas são a representação no plano, em escala, dos aspectos naturais e artificiais de uma determinada área da superfície planetária com a finalidade de possibilitar a avaliação de pormenores, com grau de precisão compatível com a escala. As cartas são obtidas a partir de levantamentos aerofotogramétricos e geodésico original ou compiladas de outras cartas topográficas em escalas maiores.

Embora existam tecnologias, tais como a *Light Detection and Ranging* (LiDAR), o levantamento aéreo empregando drones e o levantamento planialtimétrico à campo, para obter e manipular dados mais precisos de elevação, esses são temporariamente limitados e, muitas vezes, restringem-se a pequenas extensões espaciais, como cidades ou municípios individuais, devido aos altos custos envolvidos (DEWITT *et al.*, 2015). Devido a isso, cada vez mais, MDEs obtidos a partir de sensores remotos vem substituindo as tradicionais representações do relevo, como as isolinhas (contornos). Segundo Becek (2014), o acesso a estes conjuntos de dados é de grande dificuldade, pois, geralmente, eles estão sob várias jurisdições e apresentam escalas inapropriadas e altos custos de aquisição, enquanto que os sensores remotos geram bases topográficas padronizadas, cobrindo áreas relativamente extensas em menor tempo e a menores custos.

Um dos MDEs mais utilizados atualmente em estudos relacionados aos recursos hídricos é resultante da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (FARR *et al.*, 2007), que foi realizada em conjunto pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NSA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), DoD (*Department of Defense*) e as agências espaciais alemã DLR (*Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt*) e italiana ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*) em fevereiro de 2000, para mapear o relevo da área continental da Terra, entre 60° de latitude norte e 54° de latitude sul, cobrindo aproximadamente 80% das áreas emersas do planeta. O MDE oriundo da missão SRTM está baseado na técnica de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) (ZEBKER; GOLDSTEIN, 1986), a partir da qual a altitude é determinada pela defasagem entre reflexões de um mesmo sinal de radar captado por dois receptores (RABUS *et al.*, 2003). Durante a missão foram utilizados dois pares de antenas operando nas bandas X e C, coletando dados com resolução espacial de 30m e 90m, respectivamente. O produto final possui precisão vertical

global de $\pm 16\text{m}$ e horizontal de $\pm 20\text{m}$ (RABUS *et al.*, 2003), e vertical de $6,2\text{m}$ e horizontal de $9,0\text{m}$ para a América do Sul (RODRIGUEZ *et al.*, 2006).

Os dados para o território brasileiro foram processados pela EMBRAPA (MIRANDA, 2005) e estão disponíveis segundo a articulação das folhas topográficas em escala 1:250.000, com resolução espacial de 90m . O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) disponibiliza no banco de dados TOPODATA, desde 2008, as imagens SRTM 90m interpoladas por krigagem para 30m (VALERIANO; ROSSETTI, 2012). No final de 2015, a NASA passou a fornecer os dados com resolução espacial de 30m de forma gratuita, onde o Brasil é um dos países com mapeamento digital de elevação do terreno completo.

Apesar de cobrir boa parte do planeta, os dados originais da missão SRTM com 30m de resolução espacial só passaram a ser disponibilizados de forma gratuita no final do ano de 2015 e, portanto, ao longo dos últimos anos, novas fontes de informações do relevo foram surgindo. Uma destas fontes é o sensor *Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro 1999, em uma missão multinacional que envolveu as agências aeroespaciais dos EUA e do Japão. Além do sensor ASTER, o satélite também possui os sensores MODIS, CERES, MISR e MOPITT, com dados coletados a partir de fevereiro de 2000, cobrindo a superfície terrestre entre as latitudes de 83°N e 83°S . O ASTER é um sensor passivo imageador multiespectral que consta com um par de telescópios, fazendo aquisições de imagens no espectro visível e infravermelho próximo, a partir de diferentes visadas (ABRAMS *et al.*, 2015). Os MDEs resultantes desse sensor, com resolução espacial de 30m , possuem precisão vertical de $17,01\text{m}$ (ASTER GDEM VALIDATION TEAM, 2011) e são obtidos através da comparação dessas duas imagens, ou seja, a determinação da altitude depende da identificação do deslocamento de um ponto em uma imagem em relação à outra imagem (paralaxe).

Apesar de serem disponibilizados de forma gratuita, os MDEs ASTER e SRTM, assim como outros dados espaciais, são propensos a erros que vem sendo amplamente discutidos e analisados ao longo dos últimos anos (ATHMANIA; ACHOUR, 2014; BHANG *et al.*, 2007; HVIDEGAARD *et al.*, 2012; MILIARESIS; PARASCHOU, 2005; SHAFIQUE; MEIJDE, 2014). Segundo Wechsler (2003), os erros em um MDE podem ser definidos como a diferença dos valores de elevação gerados a partir do MDE com os obtidos a partir de fontes de maior precisão, como

por exemplo, de mapas topográficos (ELKHRACHY, 2017; GAJALAKSHMI; ANANTHARAMA, 2015) e de Sistemas de Posicionamento Global (GPS) (HIRT *et al.*, 2010; ZHAO *et al.*, 2011). De acordo com Elkhachy (2017), três principais grupos de erros podem resultar em incertezas nos MDEs: os parâmetros do sistema durante a aquisição de dados (FISHER; TATE, 2006; RODRÍGUEZ *et al.*, 2006), as etapas do processamento dos dados brutos (CHU *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2013) e as influências da vegetação e da cobertura do solo sobre os dados obtidos (BHANG *et al.*, 2007; LUDWIG; SCHNEIDER, 2006).

Inúmeros trabalhos vêm fazendo uso destes MDEs para os mais variados fins, como a extração de parâmetros geomorfológicos de bacias hidrográficas (GETIRANA *et al.*, 2009; KUMAR *et al.*, 2015; MANTELLI *et al.*, 2011), simulação hidrodinâmica (FALCÃO *et al.*, 2013; JARIHANI *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2013) e mapeamento digital de solos (CHAGAS *et al.*, 2010; PINHEIRO *et al.*, 2012). A escolha dos MDEs utilizados tem sido feita com base em dois principais fatores: o relevo (ELKHRACHY, 2017; LIU *et al.*, 2011; SATGÉ *et al.*, 2015) e a cobertura vegetal (BOURGINE; BAGHDADI, 2005; FALORNI *et al.*, 2015) do local de estudo.

Li *et al.* (2013) concluíram que o MDE SRTM 90 é superior ao do ASTER em termos de precisão vertical em regiões planas. Contudo, Yue *et al.* (2015) mostraram que em regiões montanhosas, o MDE ASTER tem melhor desempenho do que o do SRTM 90. Por outro lado, Bourguine; Baghdadi (2005) não indicam a utilização de dados SRTM para regiões com florestas, pois o dado altimétrico fornecido corresponde ao do topo da cobertura da vegetação. No entanto, é importante ressaltar que a precisão do MDE varia espacialmente e conjuntamente com vários fatores que, quando analisados separadamente, podem resultar em conclusões tendenciosas.

Apesar de alguns trabalhos relatarem diferenças nos valores obtidos a partir de diferentes MDEs para alguns parâmetros do relevo, como a área e o perímetro (BRUBACHER *et al.*, 2012; MISSPAN *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015), a rede de drenagem (CHARRIER; LI, 2012; LAS HERAS *et al.*, 2012; MANTELLI *et al.*, 2011) e as razões de Horton (1945) e Schumm (1596) (CHAVAN; SRINIVAS, 2015; THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2015; THOMAS *et al.*, 2014), ainda há uma enorme carência de estudos que verifiquem o quanto essas diferenças impactam na modelagem hidrológica, principalmente quando utilizadas propostas geomorfológicas.

**Capítulo 1 - Influência de diferentes fontes e escalas de informação do relevo
na modelagem geomorfológica de bacias hidrográficas**

1 Introdução

A bacia hidrográfica é a unidade geográfica delimitada por um divisor topográfico de águas que converge todo escoamento gerado para uma única saída (exutório) (ALTAF *et al.*, 2013). A delimitação de bacias hidrográficas vem se tornando uma ferramenta essencial para o planejamento e gerenciamento do uso e ocupação dos espaços rurais e urbanos, além da conservação dos recursos naturais (MAGESH; CHANDRASEKAR, 2012; SILVA *et al.*, 2015).

A medição e análise matemática da forma e dimensão do relevo recebe o nome de morfometria (PAKHMUDE *et al.*, 2003). Segundo Altaf *et al.* (2013), a caracterização morfométrica na escala da bacia hidrográfica revela informações sobre a formação e o desenvolvimento dos processos que controlam o seu comportamento hidrológico (DAR *et al.*, 2013; RAIS; JAVED, 2014; ROMSHOO *et al.*, 2008), desde a precipitação até o escoamento através da rede de drenagem (ANGILLIERI, 2008; HIMANSHU *et al.*, 2015).

De acordo com Eze; Joel (2010), a natureza dinâmica do escoamento é muito sensível às características morfométricas da bacia hidrográfica e controlada diretamente pela sua estrutura geomorfológica, que fornece o estado das características topográficas das superfícies e córregos e sua relação com a hidrologia (HIMANSHU *et al.*, 2013; JAIN; SINHA, 2003; SUPRAJA *et al.*, 2016). Neste contexto, a caracterização morfométrica das bacias hidrográficas é dependente da delimitação correta dos divisores de água da bacia hidrográfica, devendo ser o primeiro procedimento realizado para a representação da área de estudo (SEYLER *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2015).

Para fins de modelagem hidrológica, a delimitação de bacias hidrográficas vem sendo realizada de forma automática em softwares de geoprocessamento, reduzindo significativamente o tempo de processamento e melhorando a precisão da delimitação das áreas de captação (CHARRIER; LI, 2012). Neste processo, são utilizados algoritmos que identificam os divisores de águas a partir de uma representação matricial da topografia do terreno, denominada Modelo Digital de Elevação (MDE) (ELKHRACHY, 2017; SHARMA; TIWARI, 2014). Atualmente os MDEs são obtidos por meio de imagens de sensores remotos (e.g. SRTM, ASTER) ou da interpolação de dados topográficos pontuais e curvas de nível extraídas de

cartas topográficas ou levantamentos planialtimétricos (MURPHY *et al.*, 2008; NEUMANN *et al.*, 2012; YUE *et al.*, 2015).

A qualidade da modelagem dos processos hidrológicos e ambientais depende de um MDE capaz de replicar a realidade da rede de drenagem da bacia hidrográfica (CALLOW *et al.*, 2007; THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2015; ZHANG; HUANG, 2009). Diversas teorias e modelos hidrológicos fazem uso de dados geomorfológicos para a modelagem de cheias, como o hidrograma unitário adimensional e o triangular, desenvolvidos pelo SCS a partir de um conjunto de bacias americanas, as propostas geomorfológicas de Nash (1960) e Wu (1963) para os parâmetros do HUI de Nash, e a teoria do HUI Geomorfológico, proposta por Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979), que relacionam as razões de Horton (1945) e Schumm (1956) com o tempo e a vazão de pico do HUI.

Indiferentemente da técnica utilizada para obtenção e/ou processamento do dado de altitude, os MDEs disponíveis apresentam erros que podem influenciar nos dados e, conseqüentemente, nas características geomorfológicas obtidas a partir destes (BECKER *et al.*, 2017; CHARRIER; LI, 2012; LI; WONG, 2010; KINSEY-HENDERSON; WILKINSON, 2013). Diversos autores têm investigado as fontes de erros em MDEs (ATHMANIA; ACHOUR, 2014; BHANG *et al.*, 2007; HIRT *et al.*, 2010; SATGÉ *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2011). Contudo, até o momento, pouco se sabe sobre o impacto desses erros em características geomorfológicas comumente utilizadas em modelos hidrológicos, tais como a declividade e o comprimento do curso d'água principal, além das razões de Horton (1945) e Schumm (1956) que, segundo Mukherjee *et al.* (2013), são altamente dependentes da precisão do MDE utilizado.

Alguns autores têm comparado área, perímetro e comprimento total de cursos d'água obtidos por diferentes fontes de informações do relevo, contudo, devido à falta de dados observados ou de melhor resolução, estes dados são apenas comparados entre si e não inferem sobre precisão do alvo pretendido. Chavan; Srinivas (2015) observaram, em um conjunto de bacias indianas, que os valores obtidos para a rede de drenagem a partir do MDE SRTM 90m são mais confiáveis que os obtidos pelo MDE ASTER, mas que, ambas as fontes de informações do relevo podem ser utilizadas para a caracterização geomorfológica de bacias hidrográficas. Thomas; Prasannakumar (2015) também observaram melhores caracterizações do relevo obtidas pelo MDE SRTM 90m em relação ao ASTER. De

acordo com Silva *et al.* (2015), o uso dos MDEs SRTM e ASTER para a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas tem se mostrado uma solução interessante, principalmente em relação a sistemática falta de cartas topográficas em escalas médias e grandes para várias regiões do Brasil.

Diante do exposto, e tendo como hipótese a influência da fonte e da escala de informações do relevo na caracterização geomorfológica de bacias hidrográficas, o objetivo do trabalho foi investigar o efeito da forma de obtenção e da escala das informações do relevo na delimitação automática e na caracterização geomorfológica de bacias hidrográficas. Foram analisados atributos, tais como a área, a declividade média da bacia, o comprimento e a declividade do curso d'água principal, e as razões de Horton (1945) e Schumm (1956), dependentes da delimitação automática da bacia e da caracterização geomorfológica, que geralmente são utilizados na derivação de hidrogramas de cheias a partir da técnica do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico. Cinco bacias hidrográficas experimentais com diferentes características fisiográficas e dotadas de monitoramento hidrológico foram tomadas como base.

2 Metodologia

2.1 Bacias hidrográficas e caracterização fisiográfica

As cinco bacias hidrográficas avaliadas foram as do (a): arroio Cadeia (BHAC), arroio Caneleira (BHACN), ribeirão Jaguara (BHRJ), ribeirão Lavrinha (BHRL) e sanga Ellert (BHSE), cujas áreas de drenagem são de, aproximadamente, 121,3, 60,7, 31,8, 6,7 e 0,7 km², respectivamente. As bacias hidrográficas deste estudo estão localizadas no Brasil, sendo que, as BHAC, BHACN e BHSE, encontram-se no estado do Rio Grande do Sul (RS), sob responsabilidade do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq, da Universidade Federal de Pelotas (<http://wp.ufpel.edu.br/hidrologiaemodelagemhidrologica/>), e as BHRJ e BHRL no estado de Minas Gerais (MG), sob responsabilidade do Grupo de Pesquisa Engenharia de Água e Solo, do departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (Figura 8).

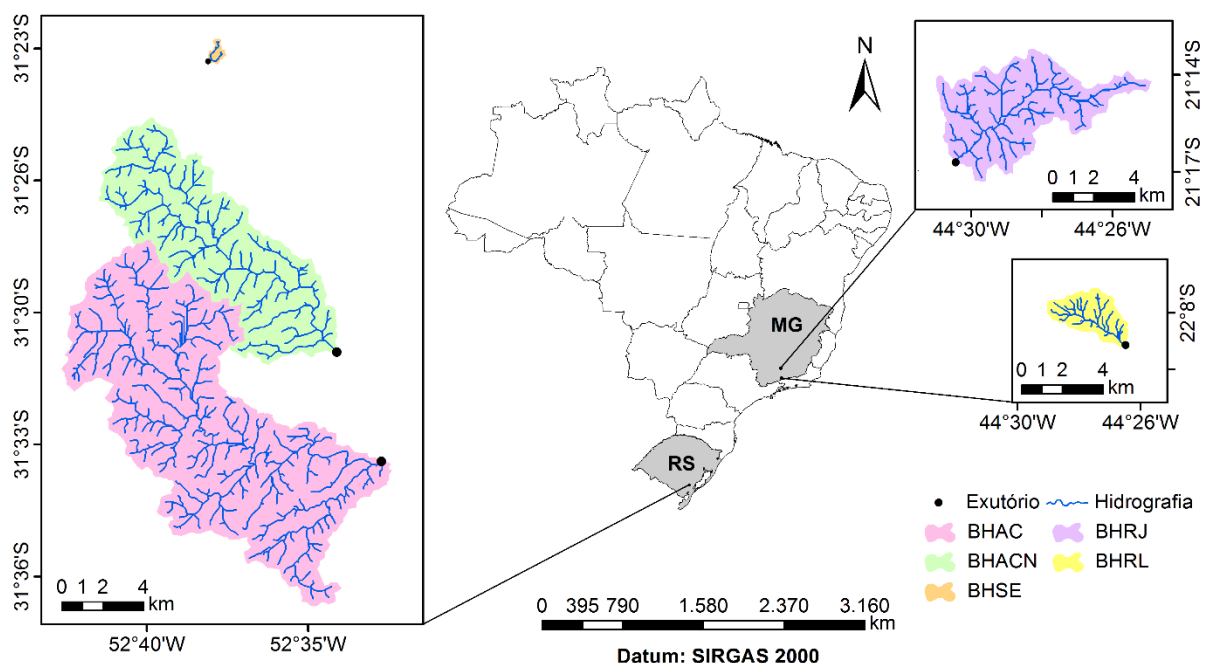


Figura 8 - Localização das bacias hidrográficas utilizadas neste estudo.

Adotando a classificação de Köppen, para o estado do Rio Grande do Sul, Alvares *et al.* (2014) definiram o clima da região das BHAC, BHACN e BHSE como Cfa, indicando a ocorrência de clima subtropical chuvoso, com temperatura média

do mês mais quente superior a 22°C. Para Minas Gerais, os autores verificaram que o clima da região das BHRJ e BHRL é do tipo CWb, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves, com estiagem de inverno.

As classes de solos predominantes para as bacias do RS usadas neste trabalho (Figura 9a) são Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Bruno-Acinzentado, para as BHAC e BHACN, e Luvisolo, para a BHSE (CUNHA; SILVEIRA, 1996; CUNHA *et al.*, 1996; CUNHA *et al.*, 1997). Para mapeamento do uso e cobertura do solo foram empregadas imagens do satélite RapidEye com resolução espacial de 5 m, classificadas de forma supervisionada através do método da Máxima Verossimilhança (RICHARDS; JIA, 2006). As classes identificadas foram: mata, área não cultivada, solo exposto, área cultivada e água (Figura 9b).

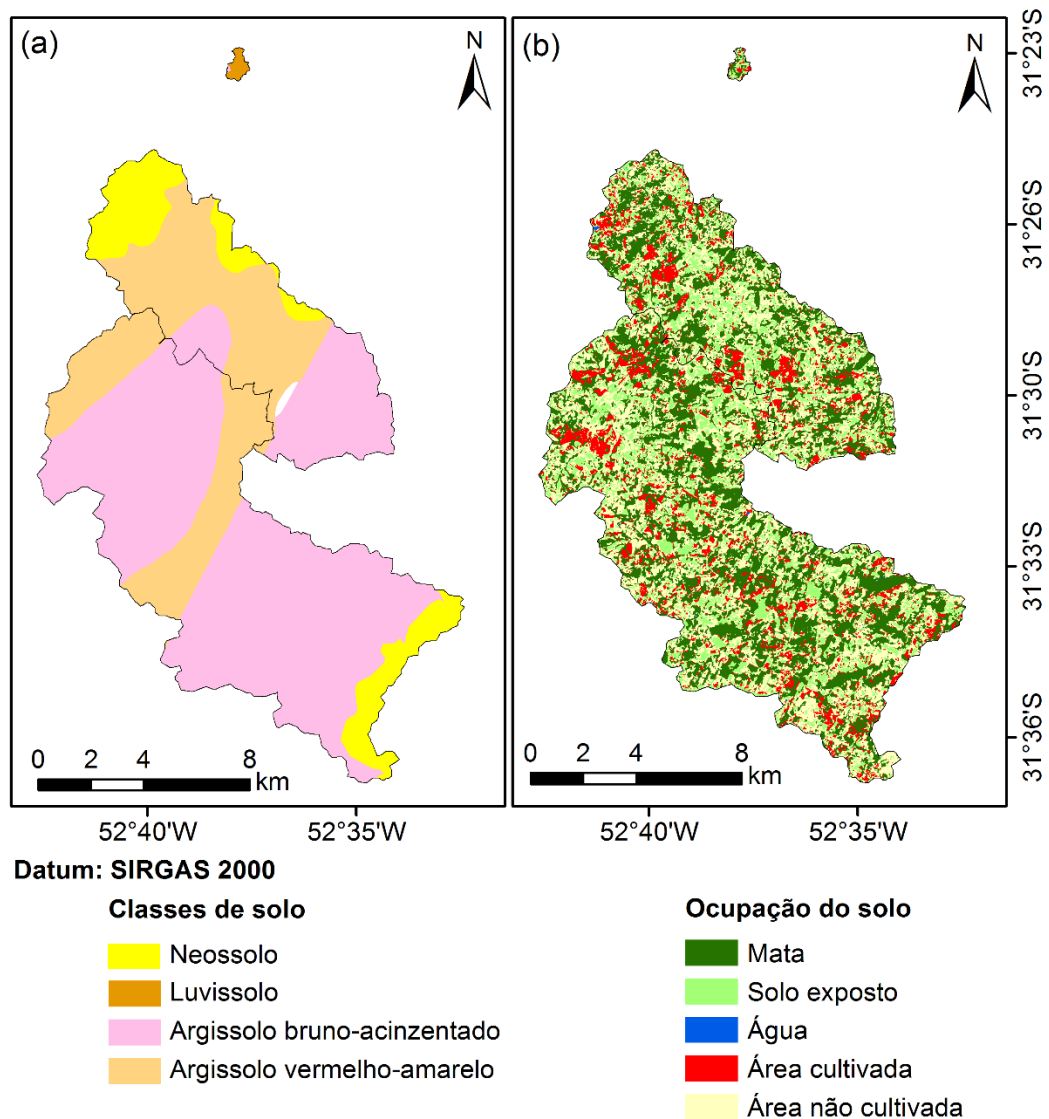


Figura 9 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para as bacias hidrográficas localizadas no RS.

A BHRL está inserida no bioma mata atlântica, na Serra da Mantiqueira, e os solos predominantes são Neossolo Flúvico e Cambissolo Háplico (Figura 10a), e o uso e ocupação do solo é basicamente mata atlântica madura e em fase de regeneração, e pastagem (Figura 10b) (MENEZES *et al.*, 2009).

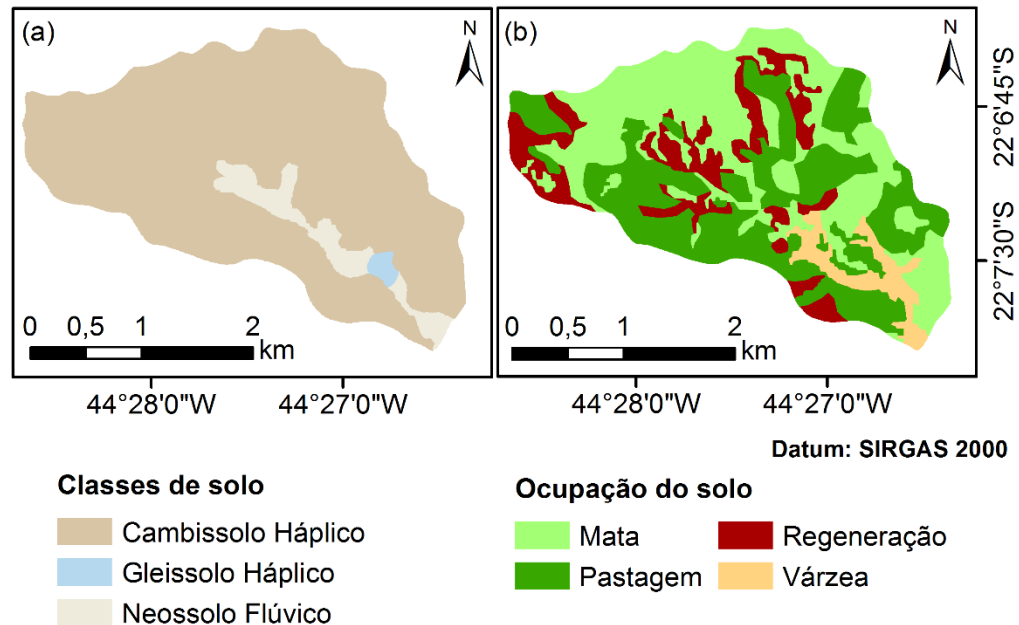


Figura 10 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para a BHRL.

A BHRJ, de acordo com Andrade *et al.* (2013), apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos típicas da região do Alto Rio Grande, predominando Latossolos e Cambissolos (Figura 11a) e, basicamente, culturas e pastagem (Figura 11b).

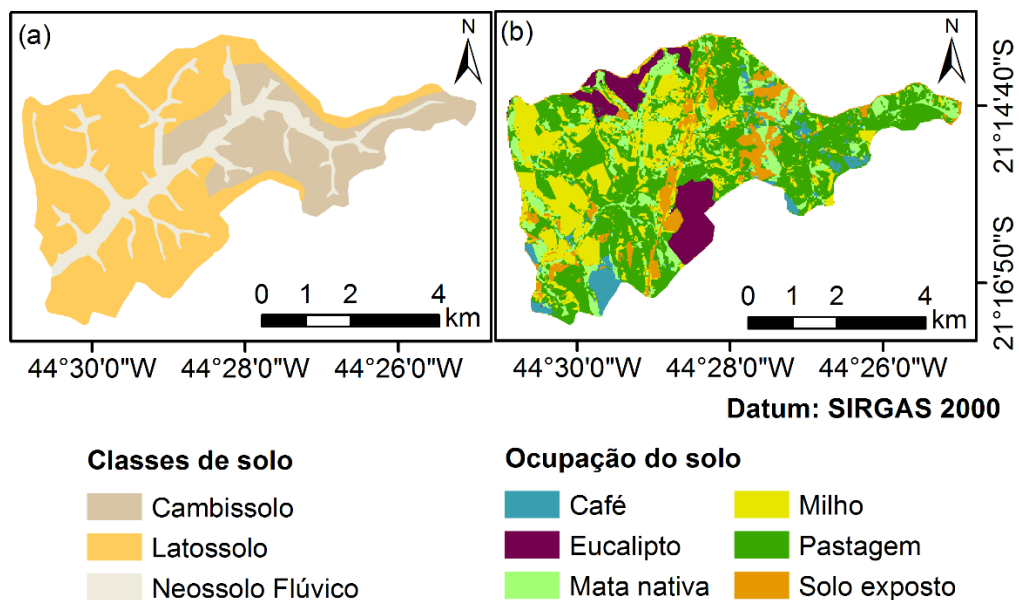


Figura 11 - Classes de solo (a) e de uso e ocupação do solo (b) para a BHRJ.

2.2 MDEs utilizados e delimitação de bacias hidrográficas

Foram utilizadas como fontes para a obtenção dos MDEs as seguintes informações: imagem SRTM com resoluções espaciais de 30 m e 90 m, imagem SRTM de 90 m interpoladas para 30 m por krigagem, disponibilizadas no banco de dados TOPODATA, imagem ASTER com resolução espacial de 30 m, cartas topográficas na escala 1:50.000. Somente para a BHSE, foram utilizados de forma adicional 1001 pontos cotados resultantes de um levantamento topográfico planialtimétrico (Figura 12), realizado com auxílio de uma estação total (marca Sokkia, modelo SET630RK) e transporte de altitude de RN.

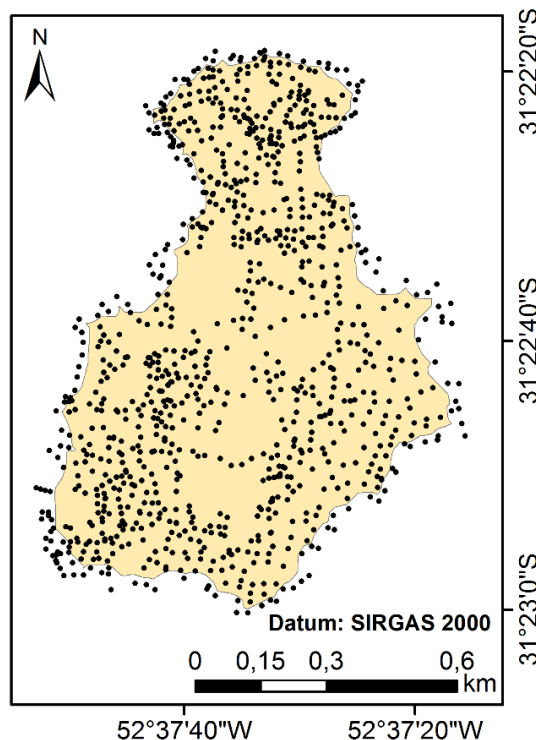


Figura 12 - Pontos cotados obtidos no levantamento topográfico planialtimétrico realizado na BHSE.

O algoritmo utilizado para a obtenção do MDE a partir das cartas topográficas vetorizadas e do levantamento topográfico foi o desenvolvido por Hutchinson (1988, 1989) e implementado na ferramenta *Topo to Raster* do software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014). É um método de interpolação projetado especificamente para a criação de MDEs hidrológicamente consistentes, utilizando técnica iterativa de interpolação de diferenças finitas. Os MDEs provenientes das cartas topográficas e do levantamento topográfico foram interpolados em células com 25m e 1m de resoluções espaciais, respectivamente, respeitando as especificações para o padrão de exatidão

cartográfica (PEC) propostas pelo Decreto Nº 89.817 (BRASIL, 1984), que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional.

Para avaliação da qualidade dos MDEs empregados, foi necessário escolher uma fonte a ser considerada como referência. Seguindo recomendações de Chagas *et al.* (2010), o MDE com resolução espacial de 25m derivado da base cartográfica (1:50.000) foi considerado como a verdadeira feição do relevo. Especificamente para a BHSE, utilizou-se como referência o MDE com resolução espacial de 1m derivado de levantamento topográfico. Não foram realizadas correções das altitudes elipsoidais em relação às ortométricas, tendo em vista a baixa qualidades das informações necessárias para as regiões de estudo. Todos os dados foram georreferenciados utilizando o sistema de projeção cartográfica UTM e datum SIRGAS 2000 (BRASIL, 2005).

A delimitação das bacias foi realizada de forma automática no software ArcGIS 10.1, subdividida em quatro principais etapas: preenchimento de depressões espúrias (*fill sinks*), determinação da direção de fluxo (*flow direction*), determinação do fluxo acumulado (*flow accumulation*) e delimitação automática de bacias (*watershed*). Mesmo após diferentes processamentos, os MDEs ainda podem apresentar algumas falhas, conhecidas como depressões ou sumidouros espúrios, que devem ser preenchidas para que as demais análises do relevo sejam executadas (JENSON; DOMINGUE, 1988; PLANCHON; DARBOUX, 2001). O preenchimento destas falhas é realizado a partir da inferência de valores que tornem o relevo contínuo, utilizando como referência a altitude do ponto mais baixo que cerca o pixel espúrio. Tarboton *et al.* (1991), utilizando um MDE com 30m de resolução espacial verificou que 0,9 a 4,7% das células do MDE eram sumidouros, ressaltando ainda, que, analisando outras fontes de MDEs, essas porcentagens podem ser maiores ou menores, dependendo do processamento das mesmas.

Após a obtenção do MDE hidrologicamente consistente, as direções de fluxo foram extraídas conforme algoritmo de Jenson; Domingue (1988), o qual considera uma única direção de fluxo para cada pixel do MDE, optando pela direção com maior declividade em relação aos pixels vizinhos. De posse das direções de fluxo, obteve-se o fluxo acumulado, dado pela somatória de células drenadas até a célula de análise (MOORE *et al.*, 1991).

Na Figura 13 estão ilustradas as informações extraídas das etapas da delimitação automática de bacias hidrográficas obtidas para a BHAC.

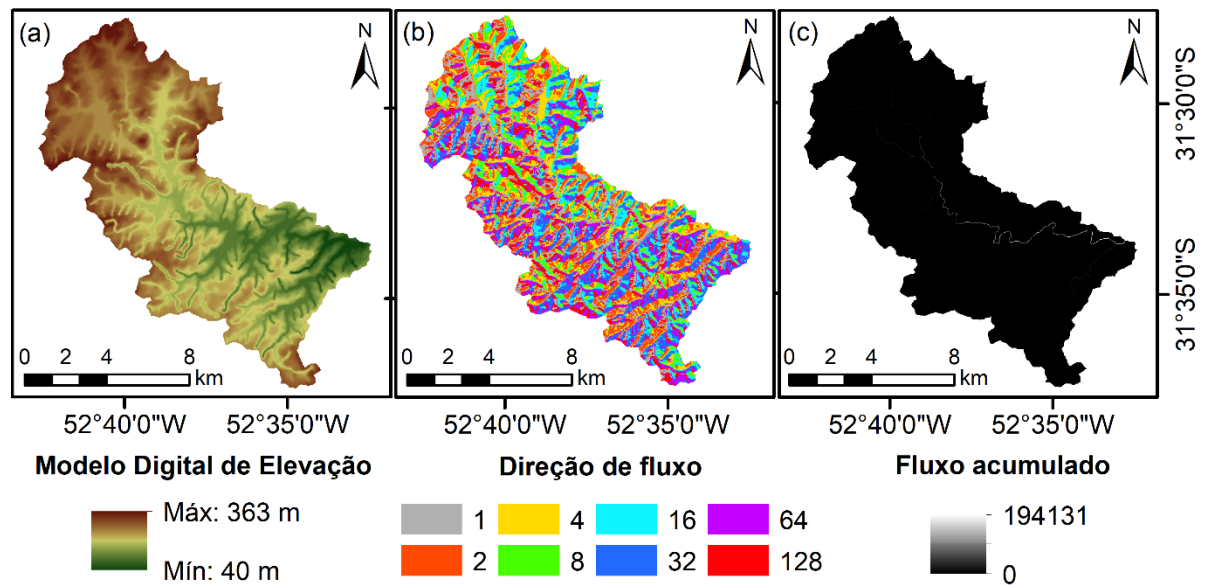


Figura 13 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (a), mapa de direção de fluxo (b) e de fluxo acumulado (c) para a BHAC.

As bacias foram delimitadas tomando como exutórios as seções de controle providas de monitoramento linimétrico. Após a inserção do exutório no mapa de fluxo acumulado, obteve-se o número de células drenadas até o mesmo, utilizando para isso, o mapa de direções de fluxo e, assim, pode-se realizar a delimitação da bacia e contabilizar sua área de drenagem.

2.3 Caracterização do relevo e medidas estatísticas de desempenho

As características morfométricas derivadas do MDE foram: área de drenagem (A), perímetro (P), altitudes máxima ($Y_{\text{máx}}$) e mínima ($Y_{\text{mín}}$), e declividade média da bacia (S_b). Para comparação das altitudes e declividades, os MDEs das diferentes fontes foram reamostrados para a resolução espacial de 30 m, com exceção do MDE derivado do SRTM 90m que não foi utilizado nestas análises por apresentar tamanho de pixel superior aos demais.

A área de drenagem das bacias foi obtida pela soma das áreas de todos os pixels contemplados na sua delimitação, e, posteriormente, seus perímetros foram obtidos por meio da ferramenta *Calculate Geometry* implementada no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014). Sobrepondo as bacias delimitadas sobre os respectivos MDEs de origem, obteve-se o MDE da bacia hidrográfica, a partir do qual, foi possível extrair as altitudes máximas e mínimas, e realizar a análise estatística.

As análises estatísticas empregadas para avaliação dos MDEs foram realizadas de acordo com o sugerido por Thompson *et al.* (2001), onde cada conjunto amostral de pontos da imagem do MDE de interesse foi confrontada com a respectiva fonte de dados de referência. Os índices estatísticos considerados foram o erro médio absoluto (MAE) (SHARMA; TIWARI, 2014) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE) (MILIARESIS; PARASCHOU, 2005; SHAFIQUE; VAN DER MEIJDE, 2014) descritos, pelas Equações 7 e 8, respectivamente. Para ambas as estatísticas, quanto mais próximo de zero for o valor obtido, melhor será o desempenho do MDE de interesse em relação ao adotado como referência.

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i - o_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2} \quad (8)$$

Em que, n é o número de pixels do conjunto amostral comparados, y_i é o valor do pixel do MDE de interesse e o_i é o valor do pixel do MDE adotado como referência.

O mapa de declividades foi obtido utilizando o algoritmo descrito em Burrough; McDonell (1998) e, posteriormente, as classes de declividades foram agrupadas conforme classificação da EMBRAPA (1979), comumente utilizadas em estudo de bacias hidrográficas no Brasil (Vieira *et al.*, 2012). De acordo com as declividades, o terreno pode ser classificado em: plano (0–3%), suave-ondulado (3–8%), ondulado (8–20%), forte-ondulado (20–45%), montanhoso (45–75%) e forte-montanhoso (>75%). Verificou-se, então, qual a porcentagem de pixels que acertavam a classe de declividade quando comparados os mapas gerados a partir dos diferentes MDEs utilizados, considerando como referência as mesmas fontes utilizadas para os dados de relevo.

2.4 Caracterização da hidrografia

A hidrografia das bacias foi gerada a partir da drenagem numérica, ou seja, da determinação do limiar (valor limite) de área de drenagem necessária para a formação de curso d'água, seguindo metodologia utilizada por Ozdemir; Bird (2009). Para a obtenção dos limiares das bacias foram tomadas como referência a

hidrografia do levantamento topográfico, para a BHSE e, as existentes nas cartas topográficas, para as demais. Para cada bacia, de acordo com a fonte tomada como referência, o limiar computado em termos de área foi convertido para número de pixels de acordo com a resolução espacial de cada uma das demais fontes de relevo. Estes valores foram estabelecidos como limitantes para a extração da rede de drenagem numérica, utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014) e, assim, obteve-se o comprimento total dos cursos d'água (ΣL) para cada fonte de relevo em cada uma das bacias hidrográficas avaliadas.

As hidrografias obtidas foram então organizadas de forma hierárquica de acordo com a metodologia proposta por Strahler (1952). Posteriormente, utilizaram-se as leis propostas por Horton (1945) – razão de bifurcação (R_B) (Equação 9) e razão de comprimento (R_L) (Equação 10); e por Schumm (1956) – razão entre áreas (R_A) (Equação 11). Após a obtenção dos valores de R_B , R_L e R_A entre as ordens dos cursos d'água, foram obtidas as médias entre os valores calculados e, computado o comprimento do curso d'água de ordem mais alta (L_Ω), para cada uma das bacias utilizadas.

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (9)$$

$$R_L = \frac{L_i}{L_{i-1}} \quad (10)$$

$$R_A = \frac{A_i}{A_{i-1}} \quad (11)$$

Em que i é a ordem do curso d'água segundo a classificação proposta por Strahler (1952), A é a área de drenagem média de cursos d'água com a ordem indicada, N é o número de cursos d'água da ordem indicada, L é o comprimento médio de cursos d'água com a ordem indicada.

O curso d'água principal foi identificado nas cartas topográficas e extraído das hidrografias geradas a partir das diferentes fontes do relevo, com exceção da BHSE, que teve seu curso d'água principal identificado nos dados do levantamento topográfico. Foram determinados então, seu comprimento total, em km, e a sua declividade média, em %. O método utilizado para a estimativa da declividade média foi o conhecido como declividade equivalente (S_r) (Equação 12), proposto por Taylor;

Schwarz (1952). A Figura 14 representa o método, cuja principal vantagem é a de considerar o tempo de percurso da água ao longo da extensão do perfil longitudinal.

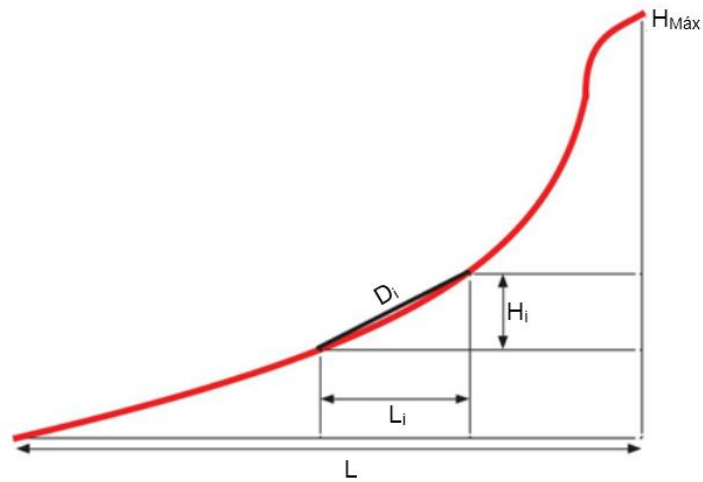


Figura 14 - Representação do método S_r para equacionamento da declividade do curso d'água principal.

Fonte: Adaptado de Gericke; Plessis (2012).

$$S_r = \left(\frac{L}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{D_i}}} \right)^2 \quad (12)$$

Em que, L é o comprimento total do talvegue (horizontal), em m; L_i é o comprimento horizontal de cada trecho i , em m, D_i é a declividade de cada trecho, ou seja, a razão entre o desnível H_i , em m, e o comprimento L_i , também em m.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização morfométrica das bacias hidrográficas

Na Tabela 1 são apresentados os valores obtidos para área de drenagem e perímetro para todas as bacias estudadas, considerando os diferentes MDEs utilizados. As bacias hidrográficas delimitadas e os cursos d'água, obtidos pelas diferentes fontes, encontram-se no Apêndice A, nas Figuras A1- A5.

Tabela 1 - Área de drenagem (A, em km²) e perímetro (P, em km), obtidos a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas estudadas

Bacia		Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER	Lev. Topográfico
BHAC	A	121,3	135,8	135,9	135,6	135,7	-
	P	71,9	71,2	65,6	68,9	72,8	-
BHACN	A	60,7	67,9	68,0	67,8	67,7	-
	P	47,5	46,9	43,4	46,8	48,4	-
BHRJ	A	31,8	32,3	32,1	32,3	32,3	-
	P	35,1	34,7	32,5	34,0	35,1	-
BHRL	A	6,7	6,8	6,9	6,8	6,9	-
	P	11,7	11,7	11,1	11,5	12,0	-
BHSE	A	0,81	0,86	0,88	0,87	0,93	0,66
	P	4,00	4,07	4,03	3,90	4,03	4,15

De forma geral, os valores de área obtidos a partir dos diferentes MDEs foram superestimados em relação à fonte referência, mas aproximaram-se entre si, como também observado por Silva *et al.* (2015) ao avaliarem uma bacia hidrográfica do Mato Grosso utilizando MDEs SRTM 90, TOPODATA e ASTER. Para a BHAC e a BHACN, as superestimativas das áreas foram de, aproximadamente, 12%, enquanto que, para as BHRJ e BHRL, foram substancialmente menores, em torno de 2%.

Para as BHAC e BHACN, o MDE ASTER possibilitou as melhores estimativas de área das bacias, como também observado por Chagas *et al.* (2010), em estudo realizado na bacia hidrográfica do rio São Domingos, pertencente ao complexo hidrográfico do Rio Paraíba do Sul. Nestas bacias, as maiores diferenças foram obtidas a partir do MDE SRTM 90 (~12%). Esses resultados podem ser devido ao fato de estas bacias serem muito planas, o que dificulta a delimitação dos divisores de água de forma automática (BRUBACHER *et al.*, 2012). Apesar de apresentarem uma diferença percentual elevada com relação às áreas obtidas pelo MDE Cartas,

as diferenças entre as áreas obtidas pelos demais MDEs foram menores, em torno de, 0,3% e 0,5% para as BHACN e BHACN, respectivamente.

A BHRJ e a BHRL apresentaram as menores diferenças percentuais das áreas obtidas com relação as do MDE Cartas. Para estas bacias, o MDE ASTER foi o que desencadeou nas maiores diferenças e, o MDE TOPODATA, nas menores. As diferenças máximas entre os MDEs, se considerar o de referência, foi de 0,7% e 1,0%, respectivamente para as BHRJ e BHRL.

Durante o processo de delimitação da BHSE, algumas dificuldades foram encontradas devido ao tamanho da área de drenagem da bacia que é muito pequena frente às resoluções espaciais utilizadas. A Figura 15 apresenta a delimitação da BHSE utilizando os MDEs de estudo, a partir da qual é possível perceber as simplificações das feições da bacia, realizadas devido aos tamanhos dos pixels dos MDEs, significativamente maiores (25m, 30m e 90m) comparativamente àquela originada a partir do levantamento topográfico (1 m). Neste caso, as áreas obtidas por todos MDEs foram superestimadas em relação àquelas tomadas como referência, com diferenças variando de 22,8% (Cartas) a 41,9% (ASTER). Os perímetros obtidos foram subestimados em relação ao do levantamento topográfico, mas com diferenças percentuais menores que as observadas na estimativa das áreas, com variações entre 2,00% (SRTM 30) e 6,01% (TOPODATA).

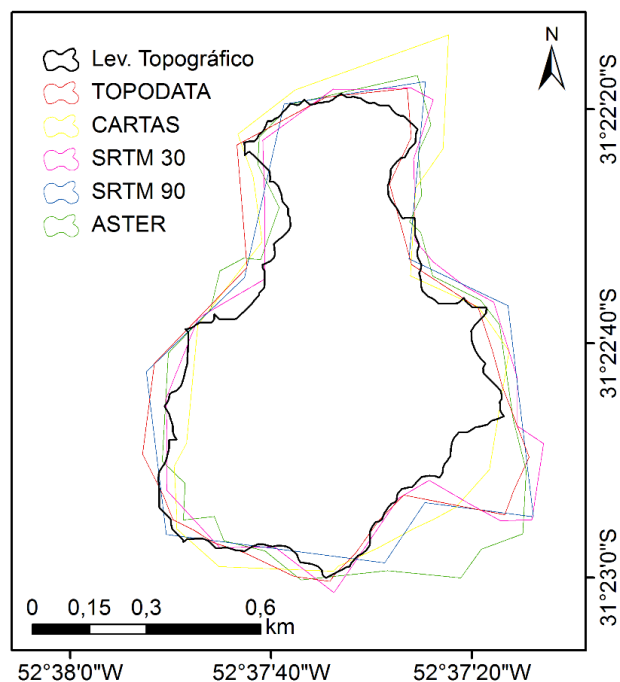


Figura 15 - Delimitação automática da BHSE utilizando os diferentes MDEs empregados neste estudo.

Para as demais bacias, em geral, as fontes resultaram em perímetros subestimados em relação à referência. Para estes casos, somente o MDE ASTER resultou em superestimativa de todos valores dos perímetros, com diferenças percentuais entre 0,2% (BHRJ) e 2,6% (BHRL). Com exceção da BHRJ, o MDE SRTM 30 foi o que apresentou as menores diferenças percentuais na estimativa do perímetro, enquanto que, as maiores diferenças percentuais foram obtidas a partir do SRTM 90, com percentuais maiores nas bacias mais planas.

Os resultados obtidos a partir do MDE SRTM 90 já eram esperados, uma vez que o tamanho do pixel não possibilita a extração de algumas feições do contorno das bacias utilizadas, que possuem área de drenagem pequenas e um número de pixels não muito elevado já é suficiente para cobrir as áreas delimitadas.

3.2 Caracterização do relevo e medidas estatísticas de desempenho

No Apêndice A, nas Figuras A6-A20, estão apresentados os MDEs e mapas de direção de fluxo e fluxo acumulado e, nas Figuras A21-A25, os mapas de declividades, classificado de acordo com EMBRAPA (1979), para cada uma das bacias de estudo, conforme as diferentes fontes de informações do relevo utilizadas.

As altitudes mínimas e máximas, bem como a declividade média obtidas para cada bacia hidrográfica por meio dos MDEs utilizados estão apresentadas na Tabela 2, enquanto o Erro Médio Absoluto (MAE) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) na Figura 16.

Tabela 2 - Altitude mínima ($Y_{\min}$, em m), altitude máxima ($Y_{\max}$, em m) e declividade média da bacia (S_b , em %) obtidas a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas estudadas

Bacia							Lev. Topográfico
Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER			
BHAC	Y _{mín}	40,0	61,0	64,0	62,0	64,0	-
	Y _{máx}	363,0	364,0	355,0	363,0	364,0	-
	S _b	18,1	11,9	11,6	10,8	12,6	-
BHACN	Y _{mín}	100,0	99,0	99,0	100,0	102,0	-
	Y _{máx}	425,0	436,0	434,0	434,0	441,0	-
	S _b	9,8	11,0	10,6	9,8	11,6	-
BHRJ	Y _{mín}	948,0	954,0	956,0	954,0	949,0	-
	Y _{máx}	1080,0	1086,0	1079,0	1084,0	1082,0	-
	S _b	7,7	11,3	11,6	10,8	13,5	-
BHRL	Y _{mín}	1160,0	1148,0	1151,0	1153,0	1144,0	-
	Y _{máx}	1739,0	1724,0	1723,0	1722,0	1718,0	-
	S _b	35,0	37,2	37,0	34,5	36,9	-
BHSE	Y _{mín}	280,0	309,0	311,0	310,0	308,0	311,0
	Y _{máx}	381,0	401,0	397,0	402,0	401,0	419,0
	S _b	13,1	10,2	10,6	9,9	9,1	11,2

As altitudes máximas e mínimas variaram bastante entre os MDEs e entre as bacias hidrográficas. Analisando a Tabela 2, não se pode observar nenhum comportamento padrão dos MDEs quanto à obtenção dos valores extremos de altitude, nem com base na área da bacia, nem em sua declividade média.

As menores diferenças nas altitudes mínimas foram observadas para a BHACN, e nas altitudes máximas, para a BHAC. As maiores diferenças nas altitudes mínimas foram obtidas para a BHAC e nas máximas, para a BHSE. Para a BHRL, tanto as altitudes mínimas quanto as máximas subestimaram os valores de referência, com valores médios em torno de 11m e 17m, respectivamente. Apesar das diferenças obtidas para a BHRL serem elevadas, faz-se necessário ressaltar que as altitudes desta bacia são muito elevadas frente as das demais bacias utilizadas (entre 1160 e 1739m), e que um erro desta magnitude talvez não prejudique tanto a modelagem da bacia, quanto prejudicaria em uma bacia com altitudes menores, como as da BHAC (entre 40 a 363m) e da BHSE (entre 280 a 381m).

Para a BHSE, com exceção do MDE Cartas, os MDEs estimaram bem as altitudes mínimas, com variação máxima de 3m, contrariamente do que ocorreu com as altitudes máximas, que foram subestimadas, com diferenças variando de 17m (TOPODATA) a 22m (SRTM 90). O MDE Cartas, nesta bacia, culminou em erros de 31m e 38m as altitudes mínima e máxima, respectivamente e, os valores de MAE e RMSE (Figura 14) obtidos a partir do mesmo também foram discrepantes em relação às demais fontes, o que se deve, possivelmente, ao fato de que, para esta bacia, as altitudes das cartas topográficas subestimaram praticamente todos os valores de altitudes em, aproximadamente, 20m, como verificado por Brubacher *et al.* (2012). Resultados semelhantes aos da BHSE também foram verificados por Araújo *et al.* (2014), no município de Paranaíta-MT, em um imóvel rural com 0,64 km². Os autores obtiveram RMSE iguais a 9,69m e 10,83m para os MDEs ASTER e TOPODATA, respectivamente, confrontando-os com um MDE obtido a partir de um levantamento planialtimétrico.

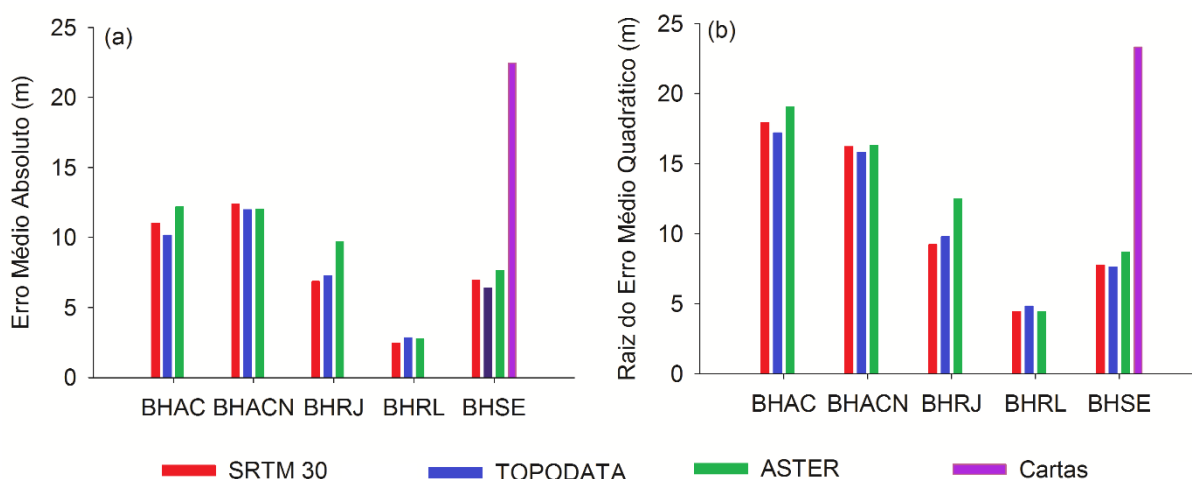


Figura 16 - Erro Médio Absoluto (MAE) (a) e Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) (b) obtidos a partir dos diferentes MDEs, confrontando-os com os de referência, para as bacias de estudo.

É possível observar, na Figura 16, que os maiores valores de MAE e RMSE foram obtidos para as bacias mais planas, ou seja, a BHAC, BHACN e a BHRJ. Esse comportamento dos erros corrobora com a constatação de Brubacher *et al.* (2012), que afirmam que, apesar de as maiores diferenças altimétricas ocorrerem em áreas escarpadas da bacia, são percentualmente inferiores às observadas nas áreas planas. Outro fator que pode estar corroborando para os valores elevados de MAE e RMSE é o fato de as cartas e o levantamento topográfico apresentarem altitudes ortométricas, enquanto que as demais fontes, altitudes elipsoidais.

Nas BHAC, BHACN e BHRJ, os maiores erros foram do MDE ASTER e, na BHRJ, de relevo mais acidentado que as demais, foram do MDE TOPODATA. De acordo com Jarihani *et al.* (2015), embora os produtos ASTER tenham a mesma resolução espacial dos produtos SRTM 30, eles sofrem de erros de elevação superiores, em virtude tanto da declividade do relevo como da vegetação, o que limita a sua aplicação em estudos hidrológicos.

A precisão vertical do MDE SRTM é de 16m (FARR *et al.*, 2007), enquanto que, para o MDE ASTER (ASTER GDEM VALIDATION TEAM, 2011) é de 17,01m, adotando índice de confiança de 95% para ambos valores. De forma geral, pode-se observar que os erros obtidos neste estudo se encontram próximos ou abaixo do especificado para os MDEs fornecidos. Os maiores valores de MAE e RMSE foram obtidos a partir dos dados ASTER, principalmente nas bacias planas, consequência da suavização do relevo feita pela fonte, como descrito por Sharma *et al.* (2014). Resultados semelhantes foram observados por Luana *et al.* (2015), ao comparar dados ASTER com dados SRTM 30 e pontos cotados com escala 1:50.000, em uma bacia localizada na província de Shandong, na China.

Os valores de RMSE obtidos para os MDEs SRTM corroboram com os da literatura. De acordo com Toutin (2002), que analisou MDEs obtidos a partir de Radar de Abertura Sintética (e.g. SRTM) com diferentes resoluções espaciais, um erro vertical entre 12m e 20m é consenso na precisão desses MDEs, ou seja, os erros obtidos neste estudo encontram-se dentro dos limites aceitos na literatura. Miliareisis; Paraschou (2005), trabalhando em regiões planas no sul da Grécia, obtiveram um RMSE igual a 25,5m, confrontando dados SRTM 90 com curvas de nível na escala 1:250.000. Na Alemanha, Ludwig; Schneider (2006) validaram dados SRTM da banda X a partir de fotografias aéreas na escala 1:25.000. Os pesquisadores utilizaram duas bacias com áreas de drenagem 145km² e 199km², e obtiveram RMSE de 22,96m e 9,85m, respectivamente, para a bacia acidentada e plana. Neumann *et al.* (2012), comparando MDEs originados a partir de cartas topográficas com os do banco de dados TOPODATA em uma bacia do cerrado brasileiro, com área de 141,20km², observaram que as diferenças entre as altitudes médias foram menores que 0,25% e que, de forma geral, o MDE TOPODATA subestima as altitudes das regiões de pico do relevo.

Com base nas análises da declividade média (Tabela 2), as bacias foram classificadas como onduladas (8-20%), com exceção da BHRL que foi enquadrada

na classe de declividade média forte-ondulada (20-45%). Apenas a BHRJ apresentou classificação de declividade diferenciada entre as fontes, pois, segundo as informações extraídas das cartas, a declividade média da bacia seria suave-ondulada e para as demais fontes de informações do relevo, seria ondulada.

Com base na análise da Tabela 2 pode-se observar que, para as BHAC, todas as declividades médias obtidas foram subestimadas, enquanto que, para as BHACN e BHRJ todas foram superestimadas. Para a BHRL, somente o MDE TOPODATA gerou subestimativas da declividade e, para a BHSE, apenas o MDE Cartas resultou em superestimativa. A BHRL foi a que apresentou as menores variações na estimativa da declividade média, com média de 4,1% entre as fontes. As maiores variações entre os valores das declividades médias em relação às de referência foram obtidas para as BHRJ (53,8%) e BHAC (35,2%).

As diferenças de altitudes observadas anteriormente acarretam em diferentes valores de declividades, contudo, se faz necessário a identificação de quais áreas do relevo ou em quais classes de declividades essas diferenças são mais ou menos acentuadas, desta forma interferindo no sentido de escoamento das bacias hidrográficas, além de interferir na delimitação da rede de drenagem e da bacia hidrográfica. A Tabela 3 apresenta as fontes com melhor e pior desempenho na estimativa das classes de declividades, com relação às fontes tomadas como referência, para cada uma das bacias hidrográficas utilizadas.

Tabela 3 - Fontes com melhor (M) e pior (P) desempenho na estimativa das classes de declividade, referentes aos maiores e menores percentuais de acerto da classe de declividade, pixel a pixel, para cada uma das bacias hidrográficas analisadas

Fonte		Plano	Suave-ondulado	Ondulado	Forte-ondulado	Montanhoso	Forte-montanhoso
BHAC	M	TOPODATA 26,30%	TOPODATA 44,40%	TOPODATA 66,70%	ASTER 45,40%	ASTER 29,90%	-
	P	ASTER 19,00%	ASTER 31,10%	ASTER 55,70%	TOPODATA 39,80%	SRTM 30 24,80%	-
BHACN	M	TOPODATA 26,50%	TOPODATA 45,10%	TOPODATA 62,20%	SRTM 30 40,80%	ASTER 18,30%	-
	P	ASTER 20,40%	ASTER 32,20%	ASTER 55,10%	TOPODATA 34,60%	TOPODATA 6,70%	-
BHRJ	M	SRTM 30 41,00%	TOPODATA 31,20%	TOPODATA 75,80%	ASTER 33,80%	-	-
	P	ASTER 39,10%	ASTER 19,80%	ASTER 48,30%	TOPODATA 14,90%	-	-
BHRL	M	TOPODATA 40,80%	SRTM 30 23,50%	TOPODATA 40,20%	SRTM 30 61,20%	SRTM 30 67,20%	SRTM 30 40,50%
	P	ASTER 19,20%	TOPODATA 12,70%	ASTER 36,70%	ASTER 54,60%	ASTER 58,30%	TOPODATA 7,10%
BHSE	M	Cartas 40,00%	TOPODATA 38,80%	SRTM 30 70,10%	ASTER 31,70%	-	-
	P	TOPODATA 0,00%	Cartas 31,40%	Cartas 53,40%	TOPODATA 18,30%	-	-

Com base na análise do melhor e pior desempenho, entre as classes de declividades (EMBRAPA, 1979), foram consideradas as porcentagens de acerto dos mapas de declividades, quando confrontados com a referência. O desempenho das fontes de relevo na classe “Plano”, por exemplo, demonstra que de todos os pixels enquadrados no MDE Cartas com declividade plana, o MDE TOPODATA classificou 26,3% deles na mesma classe, enquanto o MDE ASTER, apenas 19,0%.

As fontes com as melhores estimativas das menores declividades (plano a ondulado) foram o TOPODATA e o SRTM 30. Estes resultados corroboram com os estudos realizados por Falorni *et al.* (2005) e Kääb (2005), que apontam a dependência da acurácia dos dados do SRTM em relação à topografia local, constatando maior incidência de erros em dados referentes a terrenos com relevo íngreme ou montanhoso.

Nas classes de relevo mais acidentado (forte-ondulado a forte-montanhoso), com exceção da BHRL, os dados ASTER obtiveram os melhores desempenhos, como também observado por Szabó *et al.* (2015) e Morais *et al.* (2017), enquanto que, os maiores erros foram oriundos dos dados da missão SRTM (SRTM 30 e

TOPODATA). Li *et al.* (2013), após estudos realizados em diferentes regiões da China, não recomendam a utilização da base de dados SRTM em regiões mais íngremes, pois a técnica utilizada para obtenção do dado de altitude (InSAR) é frequentemente afetada por erros de inclinação, o que não ocorre com o método da estereoscopia, utilizada pelo sensor ASTER.

Ludwig; Schneider (2006) observaram que os erros no MDE SRTM aumentam com o aumento da declividade, tanto em bacias planas, quanto em bacias mais acidentadas. Os autores atribuíram estes resultados ao fato de que os produtos SRTM são modelos de superfície que incluem edifícios, árvores e outros objetos como parte do valor da elevação.

Na BHRL, a menor porcentagem de acerto do MDE ASTER nas classes de declividade mais altas não era esperada, pois seus erros na estimativa das altitudes costumam ser menores em relevo mais acentuado. Contudo, é importante ressaltar que o RMSE obtido pelos diferentes MDEs, para esta bacia, ficaram muito próximos e, na classe montanhosa, os MDEs TOPODATA e ASTER tiveram praticamente a mesma porcentagem de acerto. Mispan *et al.* (2015) ressaltam que o MDE ASTER é instável em algumas áreas, característica que pode estar relacionada às características do sensor óptico que são influenciadas pela condição atmosférica.

3.3 Caracterização da hidrografia

No Apêndice A, nas Figuras A1-5 é possível observar as redes de drenagem obtidas, e nas Figuras A26- A35, os cursos d'água classificados conforme Strahler (1952) e as áreas de drenagem para cada uma das ordens dos cursos d'água, para cada uma das bacias de estudo, conforme diferentes fontes de informações do relevo utilizadas.

O limiar de hidrografia utilizado, em área de drenagem, foi igual a 0,1km² para a BHAC e a BHACN, 0,08km² para a BHRJ e a BHRL e, 0,03km² para a BHSE. O comprimento total de cursos d'água, o comprimento e a declividade do curso d'água principal, obtidos a partir dos diferentes MDEs para as bacias de estudo podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comprimento total dos cursos d'água (ΣL , em km), comprimento do curso d'água principal (L, em km) e declividade do curso d'água principal (S_r , em %) obtidos a partir dos diferentes MDEs para as bacias hidrográficas de estudo

Bacia		Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER	Lev. Topográfico
BHAC	ΣL	228,8	248,2	216,2	226,9	252,5	-
	L	25,2	23,9	23,8	23,3	23,8	-
	S_r	0,66	0,61	0,55	0,56	0,54	-
BHACN	ΣL	115,8	145,7	124,9	132,4	150,1	-
	L	20,0	21,2	21,0	20,5	20,8	-
	S_r	0,90	0,97	0,91	0,99	0,98	-
BHRJ	ΣL	66,4	65,8	56,3	57,2	76,7	-
	L	12,3	11,9	12,4	11,9	11,7	-
	S_r	0,28	0,31	0,38	0,32	0,45	-
BHRL	ΣL	19,0	17,2	15,7	14,8	16,8	-
	L	4,5	4,3	4,5	4,1	4,8	-
	S_r	3,32	3,12	3,05	2,12	4,16	-
BHSE	ΣL	2,38	2,85	2,51	2,42	3,59	2,32
	L	1,25	1,27	1,19	1,16	1,29	1,30
	S_r	4,18	4,96	4,93	4,76	3,95	3,86

Os comprimentos totais dos cursos d'água foram subestimados na BHRL e, superestimados, na BHACN e na BHSE. Nas demais bacias, variaram conforme o MDE. Resultados semelhantes aos das superestimativas foram observados por Brubacher *et al.* (2012), os quais relataram que os maiores erros associados ao cálculo de extensão dos rios ocorreram nas bacias mais planas em virtude da determinação/identificação de canais/trechos inexistentes.

As maiores aproximações dos valores de hidrografia foram obtidas utilizando as cartas na escala 1:50.000 para a BHSE, dados TOPODATA para as BHAC e BHACN, e dados SRTM 30, para as BHRJ e BHRL. De acordo com Mantelli *et al.* (2011), algumas falhas dos dados SRTM 90 foram corrigidas durante o processo de interpolação dos dados TOPODATA, o que pode justificar os bons resultados obtidos. Os autores encontraram resultados semelhantes comparando hidrografia geradas a partir dos MDEs TOPODATA, ASTER e SRTM 90 com cartas topográficas na escala 1:50.000 para a região de relevo acidentado do Alto do Ribeira, no Estado de São Paulo.

Os comprimentos de cursos d'água obtidos a partir dos MDEs SRTM 90 e TOPODATA, de forma geral, foram os menores. Devido ao fato de ambos

possuírem, originalmente, resolução espacial de 90m, o tamanho do pixel dificulta a captação do desenho da rede de drenagem. Comportamento semelhante foi observado por Thomas *et al.* (2014) em duas bacias no sul da Índia quando da análise de quatro fontes de MDEs: TOPO (20m), ASTER (30m), SRTM (90m) e GMTED (250m).

A Figura 17 ilustra os cursos d'água obtidos para a BHAC, e algumas aproximações para visualização dos delineamentos conforme as diferentes fontes de informações do relevo utilizadas. É possível observar que os produtos derivados da missão SRTM apresentam delineamentos mais aproximados e que o MDE ASTER resulta em cursos d'água maiores e mais ramificados.

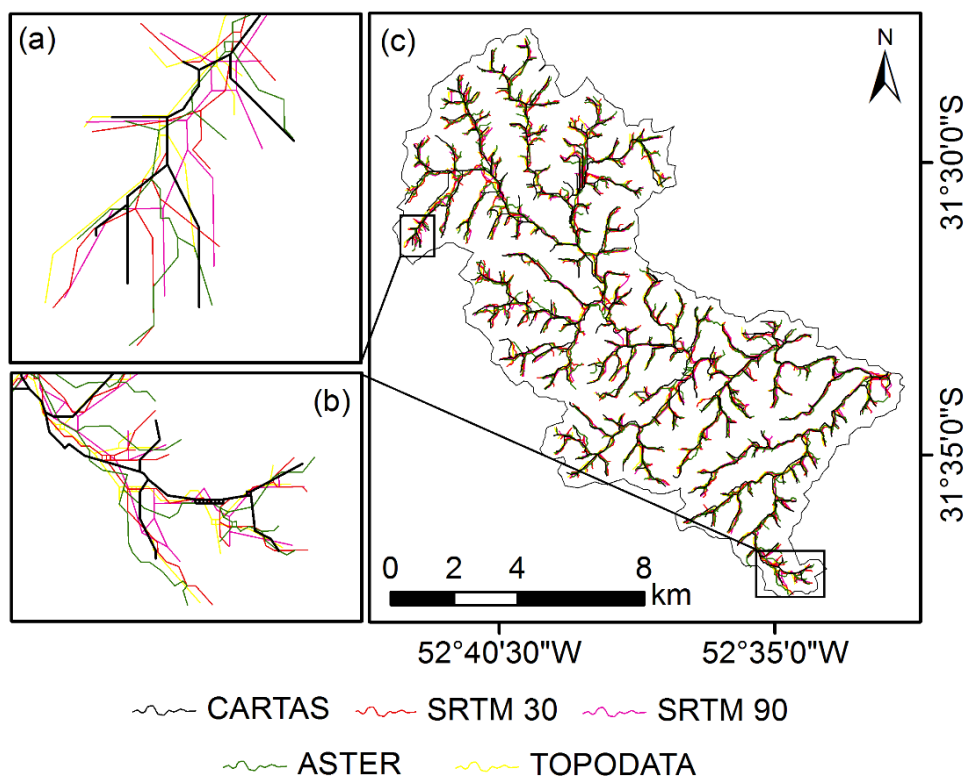


Figura 17 – Rede de drenagem obtidas pelas diferentes fontes de informações do relevo para a BHAC (a) e detalhes dos cursos d'água obtidos (b e c).

As superestimativas observadas para os comprimentos das redes de drenagem obtidas a partir de imagens ASTER nas bacias de estudo, com exceção da BHRL, corroboram com os estudos realizados por Mantelli *et al.* (2011) e Sharma *et al.* (2014), que observaram que o MDE ASTER parece ser suscetível à suavização das variações topográficas, gerando muitos vetores de drenagem inexistentes. Li *et al.* (2013) ressaltam que durante o processamento dos dados

ASTER não foi feita nenhuma tentativa de identificar, delinear e editar corpos de água, resultando em uma representação de corpos de água pouco satisfatória.

As diferenças máximas entre os comprimentos dos cursos principais aumentam conforme o tamanho da bacia, ou seja, foram maiores para a BHAC (~1,95km) e menores para a BHSE (~0,13km). As fontes resultaram em cursos d'água com comprimentos diferenciados entre as bacias, não sendo possível observar algum comportamento semelhante entre elas, como por exemplo, sempre resultar no menor ou maior comprimento.

O MDE TOPODATA foi o que possibilitou a estimativa dos menores cursos d'água principais para as bacias BHAC, BHRL e BHSE, enquanto que, para as BHACN e BHRJ, foram os MDEs Cartas e ASTER, respectivamente. Com relação aos maiores comprimentos do curso principal, pode-se observar que, para cada uma das bacias hidrográficas de estudo, uma fonte diferente foi a que obteve o valor, com exceção do MDE TOPODATA, que não resultou no maior comprimento para nenhuma delas.

Os cursos d'água principais com maiores declividades foram os das BHRL e BHSE, com valores médios iguais a 3,2% e 4,6%, e diferenças relativas (em relação aos dados das fontes de referência) máximas iguais 36,1% e 28,6%, respectivamente. Para a BHRL, somente o MDE ASTER não resultou em valores de S_r subestimados em relação ao obtido pelo MDE Cartas, com diferença relativa em torno de 26,0%, enquanto que as subestimativas variaram de, aproximadamente, 6,0% (SRTM 30) a 36,0% (TOPODATA). Para BHSE, os valores de S_r obtidos foram confrontados com o valor resultante do levantamento topográfico. Houve superestimativa do valor de referência por todas as fontes, com diferenças relativas variando de 2,4% (ASTER) e 29% (SRTM 30).

Para as demais bacias, os valores de S_r foram menores, com valores médios iguais a 0,3%, 0,6% e 0,9%, respectivamente para a BHRJ, BHAC e BHACN. Nessas bacias, os valores obtidos para S_r foram confrontados com os obtidos a partir do MDE Cartas. Para a BHAC, os valores obtidos subestimaram o valor de S_r , com diferenças relativas de 8,0% (SRTM 30) a 18,0% (ASTER), enquanto que na BHACN e BHRJ, os valores superestimaram os de referência. Na BHACN, as diferenças relativas entre os valores obtidos foram de, aproximadamente, 1,0% (SRTM 30) a 10,0% (TOPODATA), e para a BHRJ, de 12,0% (SRTM 30) a 60,5% (ASTER).

Analisando conjuntamente os valores obtidos para L e S_r , pode-se perceber que a BHRL e BHSE são as que contribuem mais rapidamente com o ESD em seus exutórios, pois apresentam menores comprimentos e maiores declividades dos cursos d'água principais. As respostas mais demoradas são as da BHRJ e da BHAC, com declividades menores e maiores comprimentos dos cursos d'água principais. A estimativa do tempo de resposta das bacias a um evento de precipitação é de grande importância para a gestão de cheias, principalmente para a constituição de sistemas de previsão e alertas a enchentes. Nas bacias de estudo, ambos parâmetros, L e S_r , apresentaram valores diferenciados a partir dos MDEs utilizados, podendo resultar em subestimativas ou superestimativas da resposta das bacias aos eventos de precipitação. Cabe ressaltar, que estes parâmetros são indicativos da resposta do ESD nas bacias, e devem ser analisados em conjunto com outros parâmetros, como o tipo de solo, o uso e a ocupação do solo e o regime de precipitações de cada local.

De acordo com a classificação de Strahler (1952), a BHRL e a BHSE apresentaram ordem 3, a BHRJ apresentou ordem 4 e a BHAC apresentou ordem 5, independentemente da fonte de relevo empregada. Somente para a BHACN os MDEs originaram ordens diferentes entre si, de modo que o SRTM 90 gerou cursos d'água até a ordem 4, enquanto que as demais, ordem 5. Os valores obtidos para as razões de Horton (1945) e de Schumm (1956) a partir de cada um dos MDEs utilizados, bem como os valores do comprimento do curso de maior ordem, estão dispostos na Tabela 5.

Os valores de L_Ω seguiram o mesmo comportamento observado para L , com maiores valores observados na BHAC (~17km) e, menores na BHSE (~0,11 km). As correspondências dos comprimentos médios dos cursos de maior ordem em relação aos dos cursos principais foram de 70,8%, 58,8%, 47,9%, 71,9% e 14,9%, respectivamente, para a BHAC, BHACN, BHRJ, BHRL e BHSE. Valores de comprimento do curso de maior ordem, como os obtidos para as bacias hidrográficas deste estudo, principalmente para bacias similares à BHSE, são extremamente escassos na literatura, não sendo encontrados, após vasta revisão bibliográfica, trabalhos semelhantes.

Tabela 5 - Razão de bifurcação (R_B), razão de comprimento (R_L) e razão entre áreas (R_A) e comprimento do curso d'água de maior ordem (L_Q , em km) para as bacias hidrográficas de estudo, considerando diferentes fontes de informação do relevo

Bacia		Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER	Lev. Topográfico
BHAC	R_B	3,96	4,12	4,08	3,95	4,31	-
	R_L	3,16	2,71	3,18	2,69	3,09	-
	R_A	2,86	2,47	2,67	2,36	2,79	-
	L_Q	17,58	16,76	16,67	16,86	17,03	-
BHACN	R_B	3,50	4,17	5,72	3,88	4,08	-
	R_L	2,68	2,48	4,05	2,52	2,49	-
	R_A	2,76	2,33	3,42	2,20	2,09	-
	L_Q	10,75	11,55	15,80	11,34	11,43	-
BHRJ	R_B	4,33	4,48	4,37	4,06	5,08	-
	R_L	2,24	3,72	2,36	2,25	3,60	-
	R_A	1,98	3,85	2,00	2,05	3,38	-
	L_Q	4,05	8,27	3,80	4,69	8,07	-
BHRL	R_B	5,20	5,67	4,90	5,38	5,00	-
	R_L	3,45	4,31	3,11	3,41	3,83	-
	R_A	4,32	4,84	3,56	3,50	4,18	-
	L_Q	3,01	3,30	3,00	3,09	3,55	-
BHSE	R_B	3,50	4,25	3,83	3,00	4,14	2,25
	R_L	1,96	6,47	1,22	0,98	2,12	5,88
	R_A	1,03	3,77	0,91	0,64	2,73	3,14
	L_Q	0,11	0,11	0,08	0,11	0,58	0,12

Os valores obtidos para as razões de Horton (1945) e Schumm (1956) variaram muito entre os MDEs e entre as bacias. Rodriguez-Iturbe; Valdés (1979) observaram que, geralmente, as razões R_B , R_L e R_A encontram-se entre os intervalos 3-5, 1,5-3,5 e 3-6, respectivamente. De forma geral, obteve-se para as bacias hidrográficas deste estudo valores de R_B e R_L enquadrados nos limites verificados pelos autores. Contudo, é importante ressaltar que há uma enorme carência de estudos em bacias hidrográficas com declividade média inferior a 20% (plana a ondulada), como as investigadas neste estudo, com exceção da BHRL.

Thomas *et al.* (2014), estudando duas bacias indianas com 271,75 e 288,53 km², utilizaram quatro diferentes MDEs (TOPO 20 m, ASTER 30 m, SRTM 90 m e

GMTED 250 m), reamostrados em 90m, visando a obtenção de vários atributos do relevo, dentre eles, as razões de Horton. Ambas as bacias apresentaram rede de drenagem de ordem 4 e, os valores de R_B e R_L obtidos a partir dos MDEs SRTM 90m e ASTER aproximaram-se dos obtidos para as BHAC, BHACN e BHRJ, quando utilizadas as mesmas fontes.

Neste estudo, os valores de R_A encontram-se entre os limites definidos por Rodriguez-Iturbe; Valdés (1979) apenas para a BHRL e, corroboram com os resultados de estudos realizados por Rawat *et al.* (2016) e Zakizadeh; Malekinezhad (2015), na Índia e no Irã, respectivamente. Em ambos estudos, com base na declividade média, as bacias analisadas enquadravam-se como forte-ondulada (20-45%) e, apresentavam quarta e quinta ordens de drenagem, utilizando dados SRTM 90 e cartas topográficas com escala 1:50.000, respectivamente.

Com exceção da BHRL, para as demais bacias, os baixos valores de R_A e os altos valores de R_B estão possivelmente relacionados à maior formação de cursos d'água de ordem 1 em áreas planas, em concordância com o observado por Brubacher *et al.* (2012) e Souza; Almeida (2014). De acordo com Chopra *et al.* (2005), os altos valores obtidos para R_B indicam que o escoamento e outras forças externas contribuem para a formação da rede de drenagem nas bacias estudadas, caso contrário, seriam altamente controladas pelas estruturas geológicas. Além disso, os valores de R_B indicam maior ramificação da rede de drenagem das bacias, e estas, podem apresentar tendência para picos de cheias.

Supraja *et al.* (2016) obtiveram valor de R_L próximo àqueles relatados para as bacias planas do presente estudo analisando uma bacia suave-ondulada de ordem 5. Alemngus; Mathur (2014) obtiveram R_B semelhante aos do presente estudo em uma bacia da Eritreia, com área e declividade média próximas à da BHAC. Contudo, os valores de R_A e R_L encontrados por Alemngus; Mathur (2014) foram muito diferenciados, o que se deve, provavelmente, à diferença nas ordens de drenagem, iguais a 5 para a BHAC e 3 para a bacia do referido estudo.

Adib *et al.* (2010), estudando a bacia iraniana do rio Kasilian de ordem 4 e área de drenagem igual a 67,5 km², obtiveram valores de R_B e R_L iguais a 3,79 e 2,43, respectivamente. As características da bacia hidrográfica são semelhantes às da BHACN, e os valores obtidos para as razões de Horton a partir de cartas topográficas digitalizadas na escala 1:25.000 corroboram com as obtidas para a BHACN com os dados oriundos das cartas topográficas na 1:50.000.

4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

- A hipótese de que diferentes fontes de informações do relevo e resoluções espaciais resultam em valores diferentes para os parâmetros geomorfológicos obtidos a partir do MDE, em bacias com características fisiográficas distintas, foi confirmada.
- De todos os parâmetros analisados, os parâmetros mais impactados pela fonte e escala da informação do relevo são a declividade do curso d'água principal e as razões de Horton (1945) e de Schumm (1956).
- As bacias planas analisadas são mais suscetíveis a diferenças nos valores altimétricos, e estas aumentam conforme a área de drenagem diminui.
- Para a BHRL, de declividade mais acentuada que as demais, observam-se as menores diferenças entre os valores obtidos pelos MDEs na sua caracterização geomorfológica.
- O MDE ASTER não apresenta bons resultados nas bacias planas analisadas, principalmente na derivação da rede de drenagem, para a qual tende a gerar mais cursos d'água.
- As diferenças nos valores de altitudes dos MDEs da missão SRTM (30m, 90m e TOPODATA) aumentam nas bacias analisadas conforme o relevo vai se tornando mais declivoso.
- O MDE Cartas resulta em valores para os parâmetros geomorfológicos diferenciados dos obtidos pelos demais MDEs, que se aproximam entre si.
- Para a BHSE, o tamanho da área é um limitante para sua delimitação e caracterização geomorfológica e o tamanho dos pixels utilizados (25, 30 e 90 m) não permite o delineamento das feições reais do relevo da bacia.
- Apesar de apresentarem resoluções espaciais não adequadas para a caracterização de pequenas bacias hidrográficas, os MDEs utilizados, podem ser considerados satisfatórios, com exceção para a BHSE.
- Faz-se necessário avaliar o impacto das diferenças obtidas na caracterização geomorfológica utilizando diferentes MDEs na modelagem hidrológica de cheias, especialmente considerando aproximações geomorfológicas do HUI de Nash dependentes das relações de Horton (1945) e Schumm (1956).

Capítulo 2 - Avaliação de propostas geomorfológicas do modelo de Nash para estimativa de cheias: influência da fonte e da escala de informações do relevo

1 Introdução

A modelagem hidrológica desempenha um papel fundamental no planejamento, desenvolvimento e gerenciamento de recursos hídricos (AHMAD *et al.*, 2010; HOSSEINI *et al.*, 2016). Neste contexto, a estimativa adequada de vazões em bacias hidrográficas vem sendo alvo de diversos estudos, visto sua importância para projetos e obras de engenharia (GHUMMAN *et al.*, 2014; MUÑOZ *et al.*, 2012), gestão dos recursos hídricos (BHAGWAT *et al.*, 2011; CHUNG; Li, 2009; KUMAR *et al.*, 2007) e mitigação e prevenção de eventos de risco hidrológico, tais como as cheias (CLEVELAND *et al.*, 2006; KAHLEIGHI *et al.*, 2011; SAHOO *et al.*, 2006).

Com vistas a aplicações da modelagem hidrológica especificamente para análises de cheias (seja para o dimensionamento hidrológico ou para a gestão de cheias), a necessidade de estimativas confiáveis das vazões originadas a partir de um ou mais eventos de precipitação tem acarretado no desenvolvimento de várias abordagens conceituais, com destaque para a teoria do Hidrograma Unitário (HU), proposta em 1932 por Le Roy K. Sherman. A teoria do HU baseia-se num comportamento linear e invariante no tempo, permitindo avaliar a resposta da bacia hidrográfica a um evento de precipitação com duração D . Devido a necessidade de dados de monitoramento para a utilização da teoria do HU, diversas alternativas empíricas para sua utilização foram propostas, com destaque para o hidrograma unitário adimensional (HUA) e triangular (HUT), propostos pelo SCS, e o hidrograma unitário de Snyder (1938). Clark (1945) aprimorou a teoria do HU quando propôs que a resposta da bacia seria independente da duração, fazendo referência à uma precipitação efetiva unitária instantânea, definindo o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI). De acordo com Cleveland *et al.* (2006), a grande vantagem do HUI é que o mesmo não necessita de precipitações efetivas em intervalos de tempo específicos, eliminando a suposição do HU da uniformidade da precipitação efetiva durante o evento (ALEMNGUS; MATHUR, 2014).

Um modelo de HUI amplamente utilizado é o de Nash (1957) (BHUNYA *et al.*, 2004; CHOI *et al.*, 2011; HOSSEINI *et al.*, 2016; JIN, 1992; LI *et al.*, 2008). Esse modelo propõe que o amortecimento das vazões no exutório da bacia hidrográfica se dá a partir de reservatórios lineares em cascata e, possui dois parâmetros: o número de reservatórios (n) e o coeficiente de armazenamento (k). Nash (1957)

propôs que estes parâmetros fossem obtidos utilizando o método dos momentos, aplicados às séries históricas de precipitação e vazão do local de estudo. Contudo, devido à escassez e/ou inexistência de dados históricos na maior parte das bacias hidrográficas, principalmente em países em desenvolvimento (BESKOW *et al.*, 2013; GHUMMAN *et al.*, 2011), a aplicação do HUIN se restringe apenas às bacias dotadas de monitoramento hidrológico (AHMAD *et al.*, 2010; SARKAR *et al.*, 2009).

Visando romper a barreira imposta pela necessidade de séries históricas para a aplicação do HUIN, Nash (1960) e Wu (1963) propuseram relações empíricas dos parâmetros n e k com parâmetros morfométricos, tais como área, declividade da bacia e comprimento e declividade do curso d'água principal. Apesar de serem amplamente difundidas na literatura (CROLEY II, 1980; FANG *et al.*, 2008; ROSSO, 1984; SINGH; SINGH, 1985; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015), ambas as propostas têm sido até hoje pouco avaliadas e mesmo utilizadas, o que fomentou o desenvolvimento de novos estudos neste contexto.

Um primeiro passo no entendimento do comportamento hidrológico das bacias a partir de características geomorfológicas foi dado por Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979), que introduziram o conceito do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG). O HUIG relaciona o comportamento do tempo e da vazão de pico do HUI com parâmetros geomorfológicos, como as razões de Horton (1945) e Schumm (1956), além da velocidade dinâmica do escoamento.

Com base nas relações obtidas para o tempo e a vazão de pico do HUIG e do HUIN, Rosso (1984), utilizando método de regressão múltipla, obteve equações explícitas para os parâmetros do HUIN, utilizando para isso, dados de cinco bacias localizadas ao sul da Itália. Bhaskar *et al.* (1997), partindo das mesmas relações que Rosso (1984), obtiveram relações puramente conceituais e aplicaram-nas, para validação, em uma bacia indiana, assim como também foi feito por Sahoo *et al.* (2006) e Bhagwat *et al.* (2011). Ahmad *et al.* (2010) ressaltam que ambas propostas, de Rosso (1984) e de Bhaskar *et al.* (1997), exigem estimativa da velocidade, fazendo com que a velocidade seja considerada como um parâmetro a ser estimado em bacias sem monitoramento hidrológico.

Diferentes propostas geomorfológicas para obtenção de hidrogramas de ESD vêm sendo estudadas e comparadas em diversas partes do mundo (GHUMMAN *et al.*, 2012; KAHLEGHI *et al.*, 2011; ROSSO, 1984; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015). A principal justificativa apresentada para suas utilizações é o grande potencial

das mesmas em derivar hidrogramas usando apenas as informações do relevo, obtidas a partir de modelos digitais de elevação (ADIB *et al.*, 2010; KUMAR *et al.*, 2004). Bhaskar *et al.* (1997) ressaltam que as formulações geomorfológicas não podem ser consideradas universais, uma vez que as equações usadas para estimar n e k estão sujeitas a erros de regressão e os expoentes das variáveis geomorfológicas não são universais, mas sim dependentes dos locais para os quais foram obtidos.

Apesar do conhecimento de que diferentes MDEs acarretam em valores distintos para uma mesma variável morfométrica (CHAVAN; SRINIVAS, 2015; SILVA *et al.*, 2015; THOMAS *et al.*, 2014; THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2015), pouco se sabe até o momento o quanto essas diferenças podem impactar nos hidrogramas de ESD estimados a partir de diferentes propostas geomorfológicas para determinar os parâmetros do HUIN. Tendo em vista que as propostas geomorfológicas utilizam diferentes parâmetros para obtenção dos valores de n e k , como por exemplo, a área e o comprimento do curso d'água principal para as propostas de Nash (1960) de Wu (1963), e as razões de Horton (1945) e de Schumm (1956) para as propostas de Rosso (1984) e de Bhaskar *et al.* (1997), quanto maior a variação dos valores dos parâmetros obtidos variando a fonte de relevo, maior a diferença entre os hidrogramas simulados. Para a obtenção destes parâmetros, costuma-se fazer uso de MDEs, geralmente obtidos a partir da interpolação de curvas de nível de cartas topográficas digitalizadas ou de imagens do radar SRTM e do sensor ASTER.

Diante do exposto, o objetivo principal deste estudo foi identificar a influência de diferentes fontes de informações do relevo sobre a modelagem de hidrogramas de ESD utilizando diferentes propostas geomorfológicas do HUIN, com base em cinco bacias hidrográficas dotadas de monitoramento hidrológico situadas em diferentes regiões do Brasil.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo e monitoramento hidrológico

A área de estudo compreende as cinco bacias hidrográficas do arroio Cadeia (BHAC), do arroio Caneleira (BHACN) e da sanga Ellert (BHSE), localizadas no Rio Grande do Sul, e bacias hidrográficas do ribeirão Jaguará (BHRJ) e do ribeirão Lavrinha (BHRL), localizadas em Minas Gerais (Figura 18).

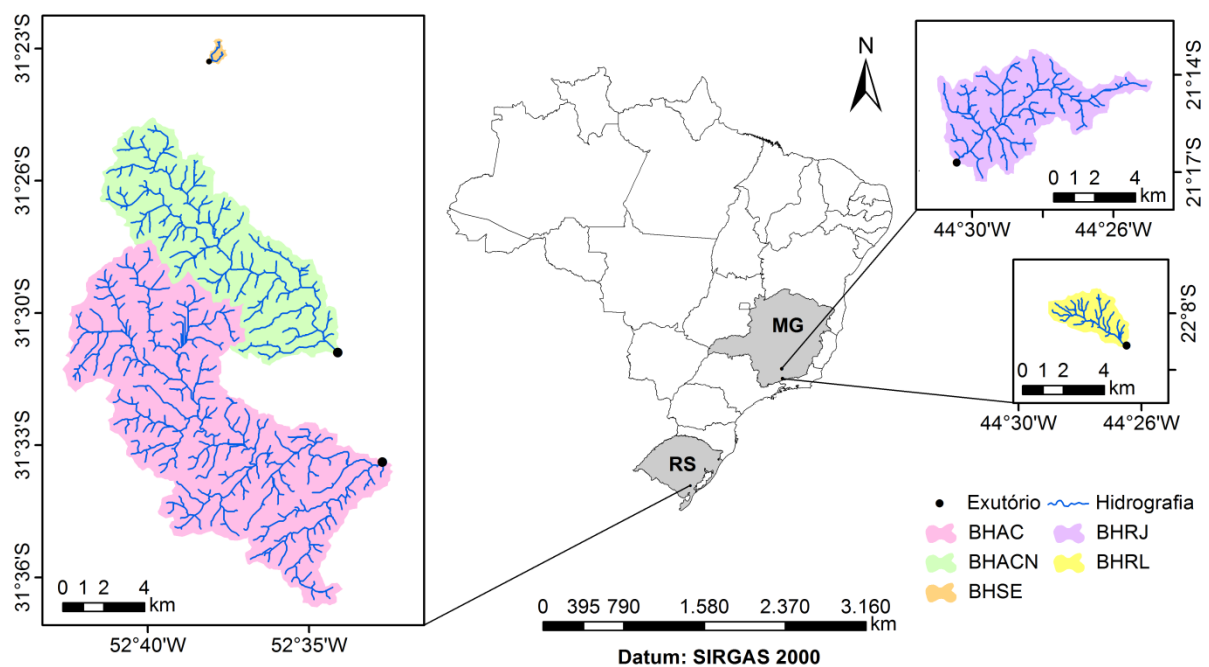


Figura 18 – Localização das bacias hidrográficas compreendidas pela área de estudo.

Para o propósito deste trabalho, visando à modelagem de cheias nas bacias hidrográficas situadas no Rio Grande do Sul, foram empregadas algumas estações de monitoramento de responsabilidade do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq, da Universidade Federal de Pelotas.

A rede de monitoramento contempla a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) à montante da seção de controle Ponte Cordeiro de Farias (88850000), de responsabilidade da ANA, com aproximadamente 370km² e abrange os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Canguçu (Figura 19). O arroio Pelotas, declarado patrimônio cultural do Estado do Rio Grande do Sul pela Lei nº 11.895/2003, é um importante manancial hídrico para Pelotas e região, fornecendo cerca de

$36.000\text{m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$ para abastecimento da população (SANEP, 2018), sendo um importante afluente do canal São Gonçalo, importante via navegável (~76km de extensão) que liga a Laguna dos Patos à Lagoa Mirim e abastece o município de Rio Grande.

A rede de monitoramento da BHAP é composta por: i) uma estação de monitoramento fluviométrico e pluviográfico (EH-H01), localizada junto à seção de controle da BHAC; ii) estação de monitoramento fluviométrico e pluviográfico (EH-H02), localizada junto à seção de controle da BHACN; iii) estação de monitoramento fluviométrico (EH-L01), localizados junto à seção de controle da BHSE; e iv) dez estações pluviográficas (EH-P01, EH-P02, EH-P03, EH-P04, EH-P05, EH-P06, EH-P07, EH-P08, EH-P09, EH-P10), distribuídas ao longo da BHAP.

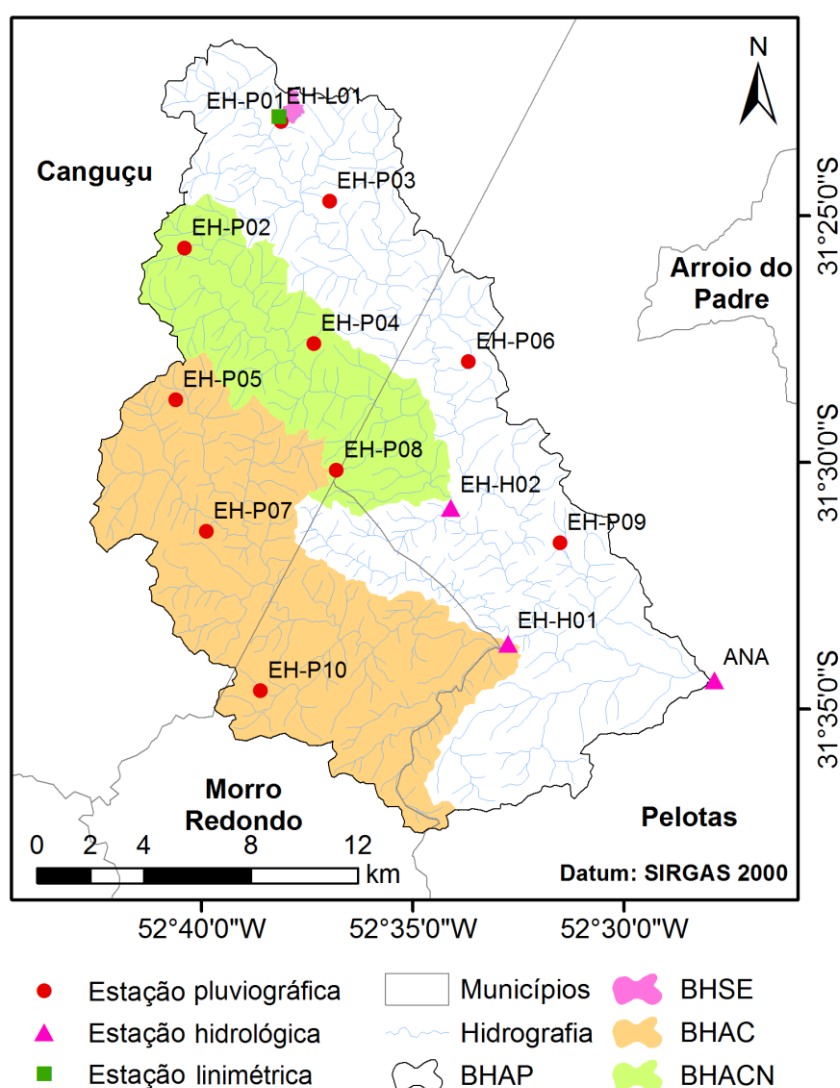


Figura 19 - Localização da rede de monitoramento hidrológico e dos municípios compreendidos pela BHAP considerando a área de drenagem à montante da seção de controle denominada Ponte Cordeiro de Farias.

A seção de controle da BHAC (Figura 20a), localizada na divisa entre Morro Redondo e Pelotas, compreende uma estação modelo Solar SL2000-PNVn (Figura 20b), disponibilizando informações de precipitação obtidas por um pluviômetro automático que utiliza o princípio de cubas basculantes e de nível d'água obtidas por um sensor de pressão. A estação dispõe de sistema *datalogger* para armazenamento de informações em intervalos de 10 minutos, com aquisição realizada por meio de computadores portáteis.



Figura 20 - Estrutura para monitoramento automático de nível d'água e réguas linimétricas (a) e, estação modelo Solar SL2000-PNVn, localizadas na seção de controle da BHAC (b).

A seção de controle da BHACN, localizada no interior de Pelotas, compreende um conjunto de réguas linimétricas (Figura 21a) e uma estação hidrológica da marca Onset, modelo U30-GSM (Figura 21b), que adquire dados de precipitação a partir de um pluviômetro de báscula e de nível d'água. As informações são obtidas em intervalos de 5 minutos e, armazenadas e disponibilizadas por um processo/equipamento análogo ao da BHAC.



Figura 21 - Réguas linimétricas instaladas (a) e estação hidrológica (b) instaladas junto à seção de controle da BHACN.

Na BHSE, devido ao baixo fluxo d'água, principalmente em períodos de estiagem, foi necessária a construção de um canal de alvenaria de seção conhecida (Figura 22a), a fim de permitir o monitoramento eficaz da variação do nível d'água no local. Junto ao canal, foi instalado um conjunto de réguas linimétricas (Figura 22b-c) que permitem verificar a consistência dos dados de nível d'água monitorados a partir da comparação dos mesmos com os registrados na régua linimétrica.



Figura 22 – Canal da seção de controle da sanga do Ellert (a), disposição das réguas ao longo do canal (b) e detalhe da régua linimétrica localizada junto à base do canal (c).

A variação do nível d'água é obtida por meio de um sistema constituído por dois sensores de pressão, conhecido como linígrafo automático, cujo princípio de funcionamento baseia-se na diferença de pressão entre eles. Para isso, foram utilizados dois sensores modelo RG₃-M, da marca Onset, registrando dados em intervalos de 5 minutos. Um dos sensores foi instalado junto à estação pluviográfica próxima da seção de controle (Figura 23a), monitorando a pressão atmosférica, e outro, inserido 1,6cm acima da base da estrutura (Figura 23b), monitorando a pressão exercida pela coluna de água somada à pressão atmosférica.



Figura 23 - Sensores de pressão instalados junto à estação pluviográfica (a) e sob a estrutura de concreto (b) da seção de controle da BHSE.

Os dados de precipitação para a BHSE são obtidos pela EH-P01, que é uma das 10 estações pluviográficas modelo HOBO Pluviômetro Digital – RG₃-M, distribuídas no interior da BHAP (Figura 24). Essas estações são do tipo pluviômetro automático de cubas basculantes, cujo *datalogger* permite registrar automaticamente até 3.200 milímetros de precipitação. Para o presente estudo, as estações pluviográficas foram programadas para adquirir e armazenar dados a cada 5 minutos.



Figura 24 - Exemplos de estação pluviográfica, modelo RG3-M da marca Onset, localizadas no interior da BHAP.

Para a modelagem hidrológica das bacias hidrográficas localizadas no Estado de Minas Gerais, foram empregados dados fornecidos pelo grupo de pesquisa “Engenharia de Água e Solo”, do departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, cuja rede de monitoramento está ilustrada na Figura 25.

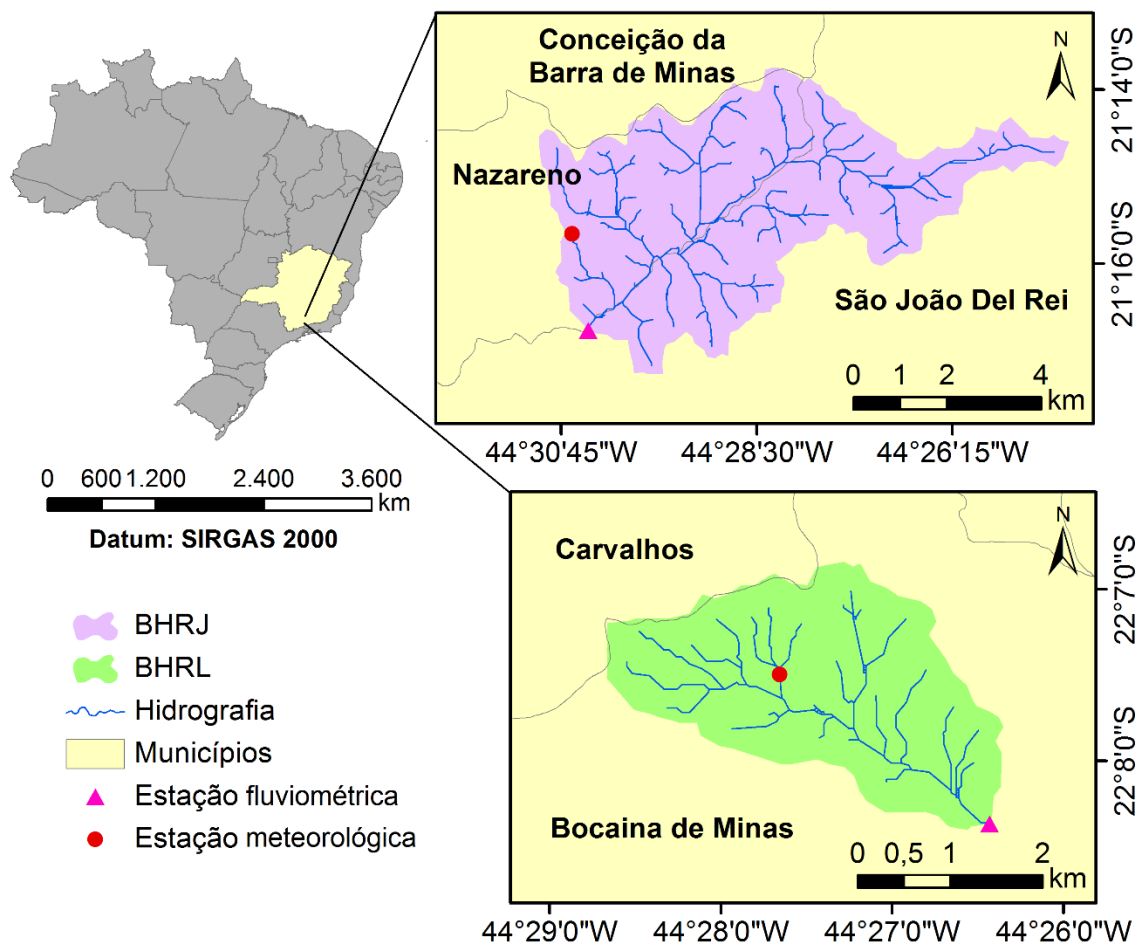


Figura 25 - Localização da rede de monitoramento hidrológico e dos municípios compreendidos pelas bacias hidrográficas localizadas no estado de Minas Gerais.

A BHRL está localizada no município Bocaina de Minas, em Minas Gerais, e está sob monitoramento hidrológico e climático desde o ano de 2006. Foram fornecidas, para este trabalho, uma série histórica de dados pluviográficos, adquiridos por uma estação meteorológica automática em intervalos de 30 minutos e, uma série histórica de níveis d'água, obtidos por meio de um linígrafo automático instalado na seção de controle, programado para registrar as leituras num intervalo de 30 minutos. A Figura 26 apresenta a estação meteorológica automática utilizada e a estrutura para monitoramento dos níveis d'água implantada na seção de controle da BHRL.



Figura 26 - Estação meteorológica instalada no município de Bocaina de Minas, Minas Gerais (a) e seção de controle da BHRL, com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento das informações hidrológicas.

A BHRJ tem sua área de drenagem nos municípios de Nazareno e São João Del Rei, em Minas Gerais e, para seu estudo hidrológico foram disponibilizadas uma série histórica de dados pluviográficos adquiridos por uma estação meteorológica automática, em intervalos de 15 ou 30 minutos, variando de acordo com a época do ano e, uma série de níveis d'água, obtidos a partir de um linígrafo automático instalado na seção de controle da BHRJ, registrando os dados a cada 30 minutos. A Figura 27 permite verificar detalhes sobre a estação meteorológica automática utilizada e a estrutura para monitoramento dos níveis d'água implantada na seção de controle da BHRJ.

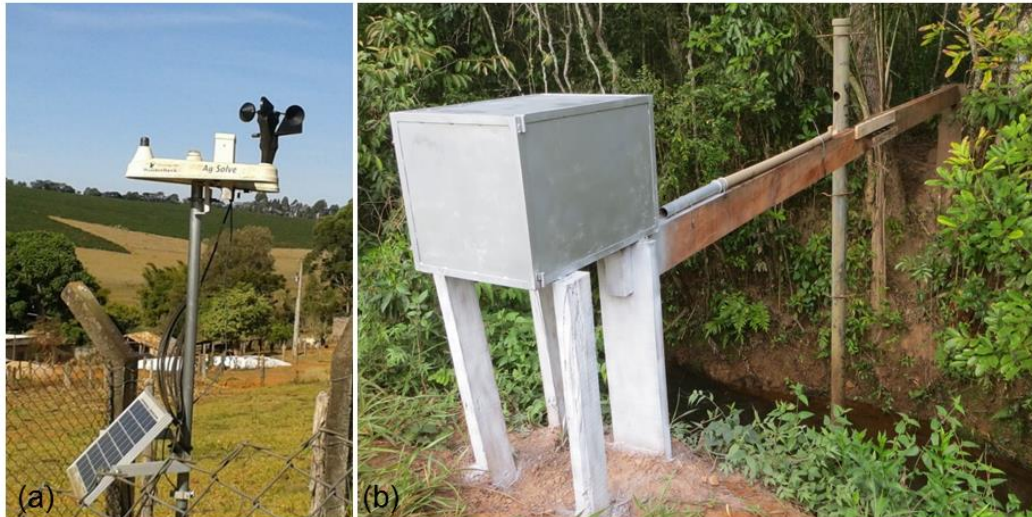


Figura 27 - Estação meteorológica instalada no município de Nazareno - Minas Gerais (a) e seção de controle da BHRJ com estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento das informações hidrológicas.

É importante ressaltar que as estações aqui apresentadas coletam dados de níveis d'água (cota) e precipitação nos intervalos pré-estabelecidos conforme mencionado anteriormente. Para a obtenção dos dados de vazão, faz-se uso da curva-chave de cada uma das cinco seções de controle, que relaciona graficamente cotas e vazões medidas a campo.

2.2 Campanhas hidrológicas e curvas-chave estabelecidas

As curvas-chave para as seções de controle analisadas neste estudo foram ajustadas usando dados de medições de nível d'água dos cursos d'água, velocidade e batimetria, permitindo a determinação da descarga líquida (vazão) correspondente. Foram realizadas campanhas hidrológicas para medições nos cursos d'água utilizando molinetes hidrométricos (Figura 28) em situações em que os cursos d'água apresentaram condições de vazões baixas, médias e altas. Durante as campanhas também foram feitas manutenções nos equipamentos da rede, a fim de garantir a consistência nas informações.



Figura 28 - Exemplos de molinetes hidrométricos utilizados para determinação de vazões em cursos d'água.

A BHAC conta com monitoramento automático desde 2013 e, para a elaboração de sua curva-chave, campanhas hidrológicas vêm sendo realizadas desde 2013, e estão ilustradas na Figura 29. A curva-chave atualizada (Equação 13) e as relações vazão-velocidade (Equação 14) foram obtidas a partir de dados de 24 medições realizadas na seção de controle, entre os anos de 2013 e 2016. As medições realizadas até o momento, neste curso d'água, contemplam níveis d'água de até 3m, vazões de até $40\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e velocidades de até $1,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, como pode ser observado nas curvas apresentadas na Figura 30.

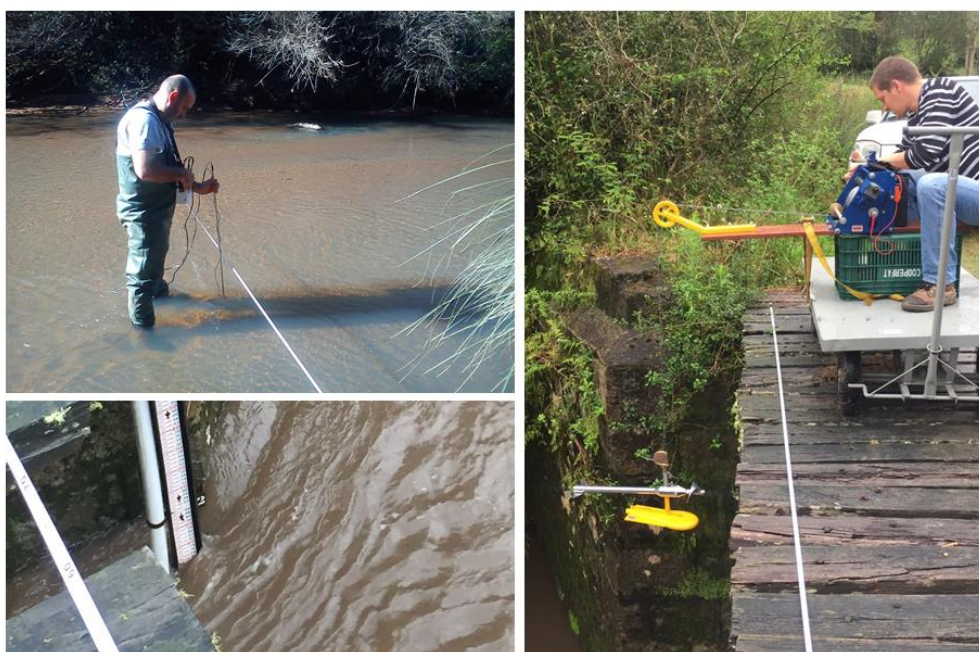


Figura 29 - Medições realizadas na seção de controle da BHAC destacando o curso d'água com diferentes níveis d'água.

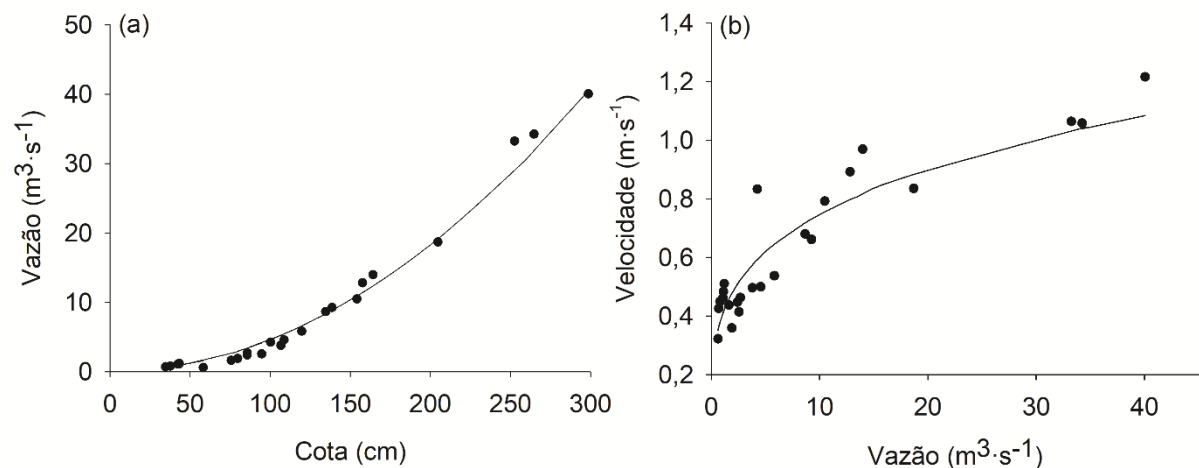


Figura 30 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a BHAC.

$$Q = 0,0005 \cdot H^{1,983} \quad (13)$$

$$v = 0,401 \cdot Q^{0,2695} \quad (14)$$

Em que, Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), H é a cota ou nível d'água (cm) e v é a velocidade média do escoamento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

A BHACN conta com monitoramento hidrológico desde 2015, com medições realizadas na seção de controle em condições bem diferenciadas, como se pode observar na Figura 31. Para a obtenção de sua curva-chave (Equação 15) e curva vazão-velocidade (Equação 16), apresentadas na Figura 32, foram empregados dados de 29 medições realizadas no arroio Caneleira, nos períodos entre 2015 e 2017. Apesar de já terem sido realizadas medições na BHACN com cotas superiores a 4m, por não terem sido observadas cotas intermediárias até o momento, optou-se por condicionar a curva-chave a um intervalo de dados confiáveis. Assim, a cota máxima medida a campo utilizada foi de 70cm, com valores de vazão e velocidade próximos a $5,4 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $0,74 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.



Figura 31 - Medições realizadas na seção de controle da BHACN com diferentes níveis d'água.

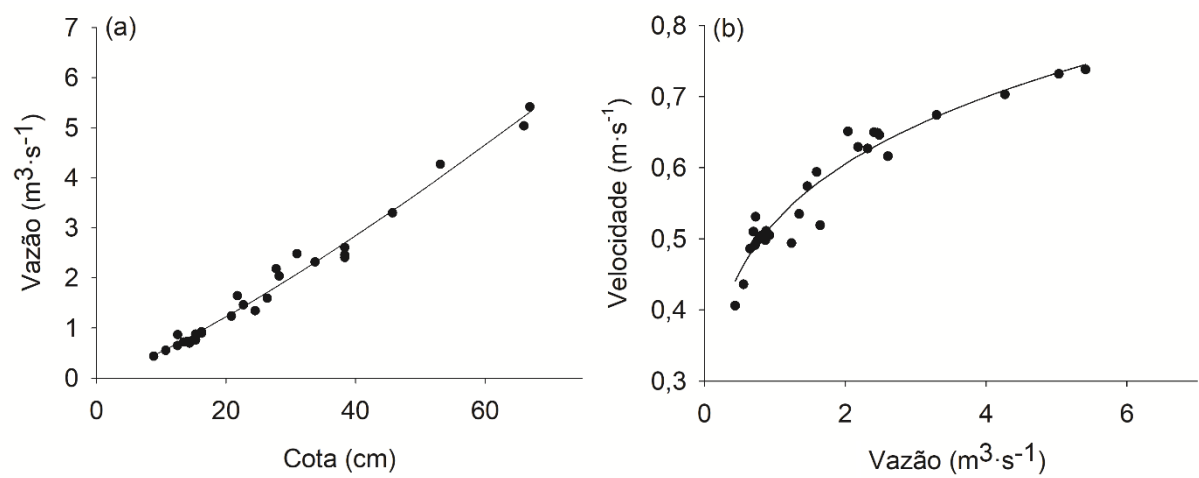


Figura 32 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHACN.

$$Q = 0,0320 \cdot H^{1,217} \quad (15)$$

$$v = 0,524 \cdot Q^{0,209} \quad (16)$$

A BHSE também conta com monitoramento automático desde 2015, contudo, devido à sua rápida resposta hidrológica, não permitindo, muitas vezes, a medição a tempo, sua curva-chave ainda está sendo atualizada. Para o presente estudo, foram utilizadas 16 medições realizadas no exutório da bacia, ilustrado em dois momentos distintos na Figura 33.



Figura 33 - Medições realizadas na seção de controle da BHSE com diferentes níveis d'água.

As medições utilizadas compreendem dados obtidos entre 2015 e 2017, com cotas de até 41 cm, vazões de até $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e velocidades de até $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. a curva-chave (Equação 17) e curva vazão-velocidade (Equação 18) obtidas a partir do conjunto de dados podem ser visualizadas na Figura 34.

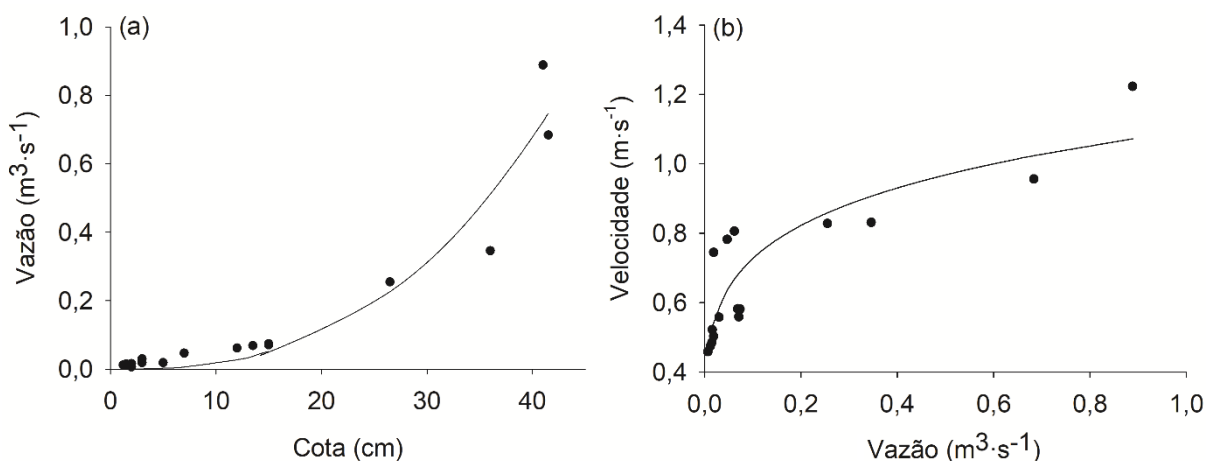


Figura 34 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHSE.

$$Q = 0,00004 \cdot H^{2,659} \quad (17)$$

$$v = 1,095 \cdot Q^{0,178} \quad (18)$$

Para as bacias hidrográficas localizadas em Minas Gerais, assim como os dados hidrológicos das séries históricas, os dados coletados a campo para elaboração das curvas-chave foram cedidos pelo grupo de pesquisa Engenharia de Água e Solo/UFLA para este estudo.

A BHRL está sob monitoramento hidrológico e climático desde o ano de 2006, com apoio da CEMIG/ANEEL (SILVA; MELLO, 2011). Foram utilizadas 21 medições, realizadas entre 2010 e 2013, para a geração das curvas de cota-vazão (Equação 19) e vazão-velocidade (Equação 20), com registros de até 110 cm de altura d'água, e vazão e velocidade aproximadas de $0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e de $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente, como é possível observar na Figura 35.

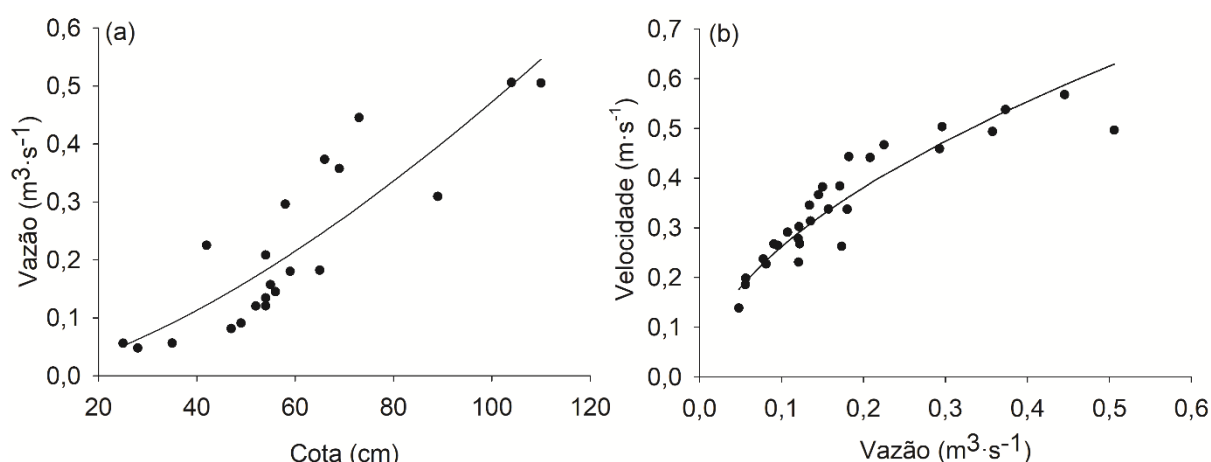


Figura 35 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHRL.

$$Q = 0,000572 \cdot (H - 3,574)^{1,47} \quad (19)$$

$$v = 0,9098 \cdot Q^{0,5409} \quad (20)$$

A BHRJ é monitorada desde 2005 e sua curva-chave (Equação 21) e curva vazão-velocidade (Equação 22) foram obtidas a partir de 40 medições realizadas em seu curso d'água e, estão ilustradas na Figura 36. Foram monitorados níveis d'água de até 71 cm, vazões de até $1,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e velocidades de até $0,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

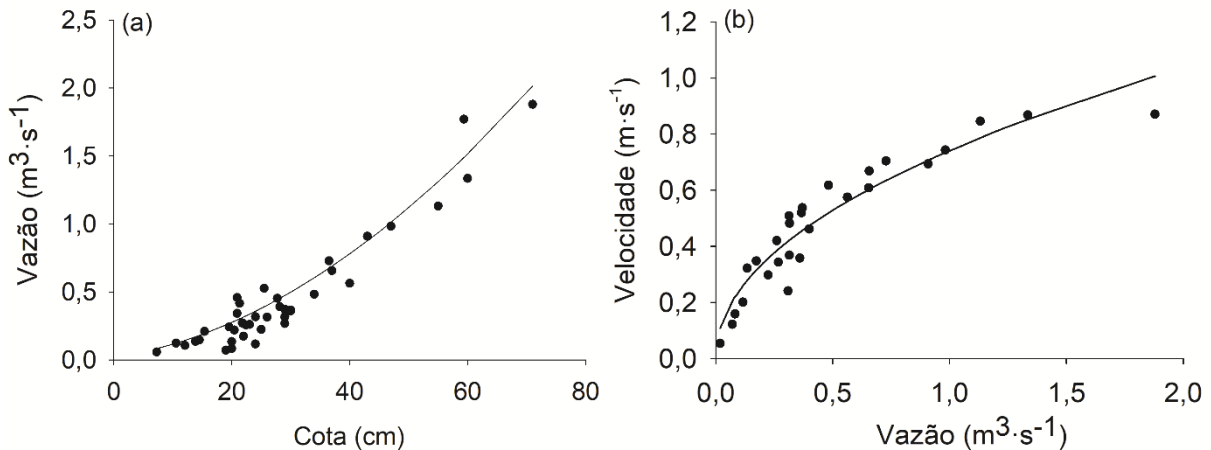


Figura 36 - Curva-chave relacionando dados de cota e vazão (a) e, curva relacionando dados de vazão e velocidade (b) para a seção de controle considerada na BHRJ.

$$Q = 0,00061 \cdot (H + 6,745)^{1,8621} \quad (21)$$

$$v = 0,7402 \cdot Q^{0,4868} \quad (22)$$

Todas as equações de relação cota-vazão e vazão velocidade possuem as mesmas unidades para as variáveis Q , H e v . Ressalta-se aqui, que os valores máximos de níveis d'água (cota), vazão e velocidade observados a campo foram tomados como limitantes durante a seleção dos eventos nas bacias hidrográficas, tomando o cuidado para que as curvas não fossem demasiadamente extrapoladas.

2.3 Seleção dos eventos

Anteriormente à seleção dos eventos, para cada bacia hidrográfica, as séries de níveis d'água foram convertidas em séries de vazões, utilizando as curvas-chave apresentadas na seção anterior.

De posse das séries históricas de precipitação e vazão, organizadas em intervalos de tempo de 5 minutos, para a BHSE, e de 30 minutos para as demais bacias hidrográficas, foram selecionados eventos de precipitação com diferentes durações, totais precipitados e intensidades médias, dando ênfase aos eventos de maiores magnitudes, causadores de cheias mais pronunciadas (RAGHUNATH, 2006). Outro aspecto levado em consideração durante a seleção dos eventos foi o comportamento do hidrograma resultante dos eventos de precipitação selecionados, dando preferência a hidrogramas unimodais, ou seja, com uma única vazão de pico,

nos quais a captação dos parâmetros tempo de ascensão e tempo de recessão se dá de forma bem evidente.

Devido ao fato de possuírem uma rede de monitoramento bem distribuída espacialmente, para as bacias localizadas no RS, realizou-se a interpolação dos dados de precipitação, utilizando a metodologia dos polígonos de Thiessen (THIESSEN; ALTER, 1911), que pondera a precipitação com base na influência de cada estação pluviográfica sobre a área da bacia. A Figura 37 ilustra os polígonos de Thiessen obtidos para a rede de monitoramento da BHAP, bem como as estações com área de influência para as BHAC, BHACN e BHSE.

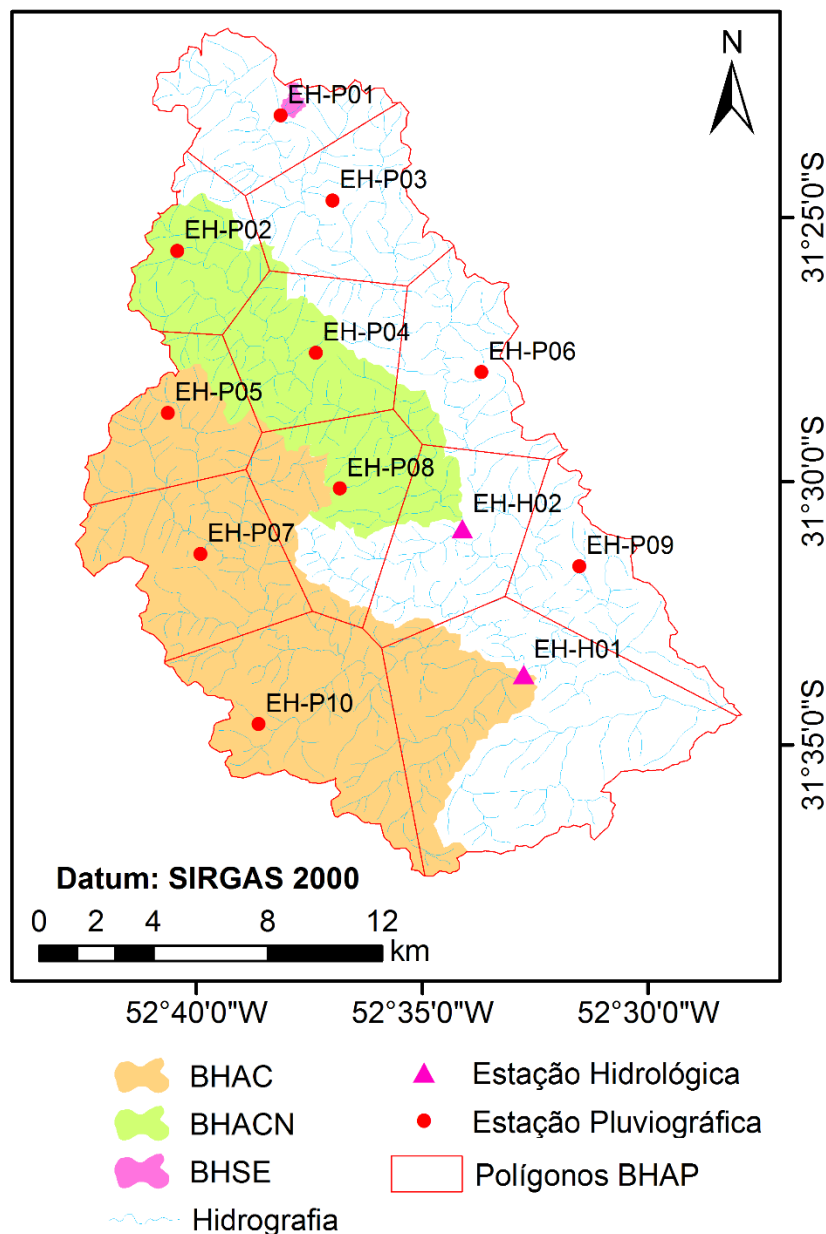


Figura 37 - Polígonos de Thiessen obtidos para a rede de monitoramento da BHAP e estações com influência nas BHAC, BHACN e BHSE.

É possível observar que, para a BHSE, somente a EH-P01 tem influência, enquanto que, as áreas da BHAC e da BHACN englobam a área de influência de sete estações pluviográficas, cada uma. Para a BHAC, têm influência as estações EHP-10 (32,1%), EH-P07 (26,4%), EH-H01 (17,9%), EH-P05 (14,5%), EH-P08 (7,7%), EH-H02 (1,2%) e EH-P04 (0,2%), enquanto que, para a BHACN, as estações EH-P04 (32,1%), EH-P02 (26,6%), EH-P08 (20,7%), EH-H02 (8,7%), EH-P05 (7,2%), EH-P06 (4,1%) e EH-P03 (0,6%). Cada evento selecionado nestas bacias teve a precipitação ponderada pelas estações de influência e seus respectivos “pesos”. Para as BHRJ e BHRL essa etapa não foi necessária, visto que as bacias apresentavam apenas uma estação adquirindo dados de precipitação.

Para cada evento selecionado, e ponderado, se necessário, os dados de precipitação deram origem a um hietograma, e os dados de vazão, a um hidrograma. Visando à análise dos hidrogramas de escoamento superficial direto (ESD), foi necessário realizar a separação dos escoamentos superficial direto e de base. Para isso, fez-se uso da metodologia de separação de escoamento conhecida como inflexões A e C (CHOW *et al.*, 1988), amplamente utilizada em estudos semelhantes (AGIRRE *et al.*, 2005; JENA; TIWARI, 2006).

A Figura 38 está disposta com propósito ilustrativo acerca da separação de escoamento para um evento da BHAC, onde é possível visualizar o ponto A, a partir do qual há chegada de ESD não exutório da bacia, e o ponto C, a partir do qual a chegada de ESD ao exutório se encerra.

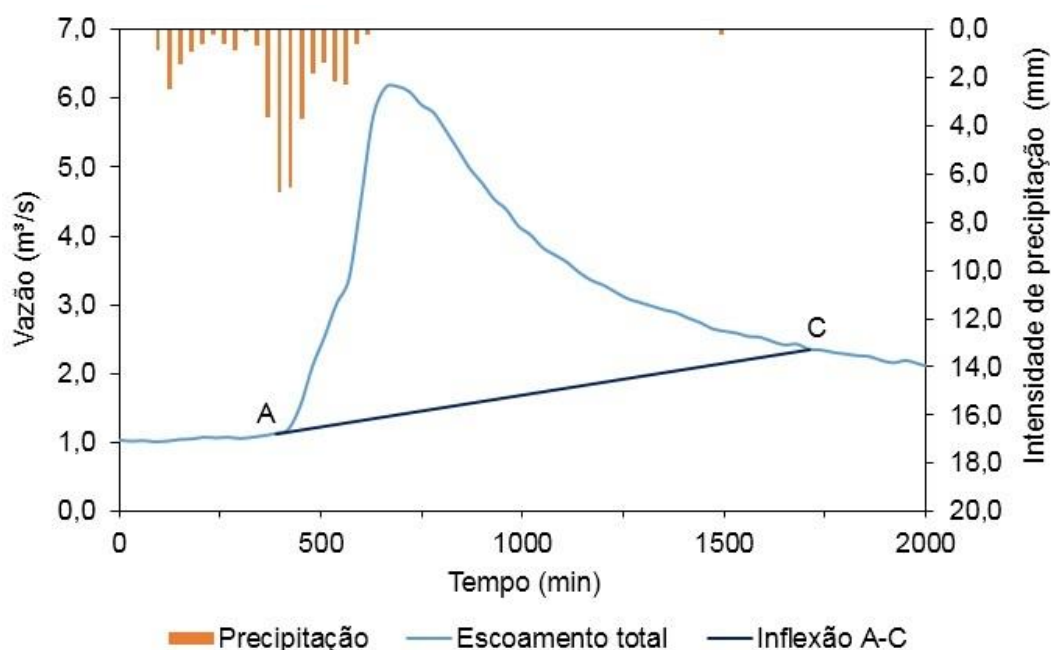


Figura 38 - Ilustração da separação de escoamento para um evento da BHAC, utilizando o método das Inflexões A e C.

A determinação do ponto A, geralmente, é feita de forma visual, face aos valores de vazão, e do ponto C, analiticamente, determinando a constante de depleção (K_{A-C}). De acordo com Mello; Silva (2013), o valor de K_{A-C} é obtido com base nos últimos valores de vazão, até que se encontre um valor para K_{A-C} sensivelmente inferior aos obtidos inicialmente, indicando a contribuição do ESD no valor total da vazão. Em relação à precipitação, o total precipitado anterior ao ponto A é denominado de abstrações iniciais, e consistem na precipitação que ficou retida na vegetação e/ou infiltrou no solo, não gerando ESD (MISHRA *et al.*, 2006).

Após a separação do escoamento, para cada evento selecionado, em cada bacia hidrográfica, foi extraído do hidrograma de escoamento total apenas o hidrograma de ESD, servindo como entrada para a modelagem do hietograma de precipitações efetivas e dos HUIs.

2.4 Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (P_e)

O volume de ESD gerado para cada evento de precipitação foi obtido por integração numérica, seguindo recomendações de Tucci (2005). A partir da razão entre o volume de ESD e a área da bacia, foi obtida a lâmina de ESD, a qual corresponde numericamente à precipitação efetiva ($P_{EFETIVA}$), também conhecida

por, precipitação efetiva total ($P_{\text{EFETIVA,TOTAL}}$), essencial para a estimativa da distribuição temporal das precipitações efetivas.

A distribuição temporal da P_{EFETIVA} , dada pelo hietograma de P_{EFETIVA} foi realizada para cada evento de precipitação, em cada bacia hidrográfica, utilizando o modelo Número da Curva (CN/SCS), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS, 1986) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). De acordo com Cao *et al.* (2011), o modelo CN, descrito pela Equação 23, considera que a P_{EFETIVA} produzida em um dado evento é uma função da precipitação total e das perdas iniciais do processo, conhecidas como abstrações iniciais (I_a), as quais estão associadas à infiltração, retenção de água pelas depressões do terreno e pela cobertura vegetal.

$$P_{\text{EFETIVA}} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (23)$$

Em que, P_{EFETIVA} é a precipitação efetiva (mm), P é a precipitação total (mm), I_a corresponde às abstrações iniciais (mm), geralmente assumidas como 20% de S , e S é o potencial máximo de retenção após o início do escoamento (mm), dependente do valor de CN (Equação 24).

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (24)$$

Os valores de CN são determinados em função de quatro tipos de solos, em ordem crescente de potencial de geração de escoamento superficial direto: A, B, C e D, enquadrados de acordo com três condições de umidade antecedente do solo (AMC – Antecedent Moisture Content), condicionadas pelo valor de precipitação dos cinco dias antecedentes (P_5): AMC I (solo seco e precipitação acumulada dos 5 dias antecedentes (P_5) de até 35 mm), AMC II (solo próximo à capacidade de campo e P_5 entre 35 e 52,5 mm e AMC III (solo muito úmido e P_5 superior a 52,5 mm) (BESKOW *et al.*, 2009). Geralmente, os valores de CN são obtidos em tabelas de combinações de informações de uso e tipo de solo (CAO *et al.*, 2011), extraídas para as condições de uso e cobertura dos solos dos Estados Unidos (ARAÚJO NETO *et al.*, 2012).

Outra forma de aplicação do Modelo CN é a partir de eventos chuva-vazão monitorados, ajustando um valor de CN para cada evento observado, visto que as condições da bacia hidrográfica variam de evento para evento. Segundo Soulis; Valiantzas (2013), este aspecto demonstra a importância que algumas variáveis, tais como intensidade e duração da precipitação, umidade e cobertura do solo, têm na estimativa do ESD ao longo da bacia hidrográfica.

Como estão disponíveis para este estudo séries históricas de precipitação e vazão, discretizadas em intervalos de tempo convenientes à modelagem hidrológica, optou-se por ajustar o valor de CN, conforme recomendado por Chen (1982). Este procedimento garante que, para cada evento, a soma de todas as $P_{EFETIVA}$'s seja numericamente igual ao valor obtido para a $P_{EFETIVA,TOTAL}$, considerando, para isso, o valor observado de I_a para cada evento.

2.5 Modelagem hidrológica com o Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash

O Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUI) (Equação 25), proposto por Nash (1957), considera uma precipitação uniforme ao longo da bacia, propagada até a seção de controle por n reservatórios lineares em cascata, com tempo médio de esvaziamento representado pelo parâmetro k , que reflete a resposta da bacia hidrográfica ao ser estimulada por um ou mais eventos de precipitação efetiva (TUCCI, 2009). O parâmetro k (parâmetro de escala) é igual para todos os reservatórios lineares e tem dimensão de tempo, enquanto que, o parâmetro n (parâmetro de forma) refere-se ao número de reservatórios lineares idênticos que atenuam o pico do HUI.

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (25)$$

Em que, $u(t)$ denota as ordenadas do HUI do modelo de Nash, t é o tempo, n e k são os parâmetros do modelo Nash e Γ a função gama.

Visando à estimativa dos parâmetros k e n , para um sistema linear invariante no tempo, as relações apresentadas nas Equações 26 e 27 são válidas.

$$m_{1(HUI)} = m_{1S} - m_{1E} \quad (26)$$

$$m_{2(HUI)} = m_{2S} - m_{2E} \quad (27)$$

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:

$$m_{1S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{\sum Q_i} \quad (28)$$

$$m_{2S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i^2}{\sum Q_i} - m_{1S}^2 \quad (29)$$

$$m_{1E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i}{\sum P_i} \quad (30)$$

$$m_{2E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i^2}{\sum P_i} - m_{1E}^2 \quad (31)$$

Em que, 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).

Inserindo os referidos parâmetros nas Equações 26 e 27 e manipulando as expressões, obtém-se:

$$n \cdot k = m_{1(HUI)} \quad (32)$$

$$n = \frac{1}{m_{2(HUI)}} \quad (33)$$

A Equação 34 apresenta a relação entre o tempo de pico (t_p) do HUI, assumindo um tempo de atraso total k , que altera o efeito no hidrograma de saída variando o valor de n . De acordo com Rawat *et al.* (2016), a relação para $m_{1(HUI)}$ obtida pelo autor, atende a condição $t_p < m_{1(HUI)}$, essencial para a modelagem do HUI.

$$t_p = (n - 1) \cdot k \quad (34)$$

Devido ao fato dos parâmetros de escala (k) e de forma (n) serem determinados com base em hietogramas e hidrogramas observados, a aplicação do modelo em bacias sem monitoramento hidrológico é pouco usual. Algumas propostas geomorfológicas foram desenvolvidas para a obtenção dos parâmetros do

HUIN, como a de Nash (1960) (P_1), de Wu (1963) (P_2), de Rosso (1984) (P_3) e de Bhaskar *et al.* (1997) (P_4). Essas quatro propostas estão descritas a seguir e foram utilizadas para estimar hidrogramas de cheia nas bacias de estudo.

As variáveis morfométricas utilizadas pelas propostas, tais como a área, a declividade da bacia, o comprimento e a declividade do curso d'água principal, e as razões R_B , R_L e R_A foram obtidas a partir dos seguintes MDEs: i) Cartas topográficas na escala 1:50.000 interpoladas em células de 25m; ii) imagens SRTM com resolução espacial de 30m e 90m; iii) imagens SRTM de 90m interpoladas por krigagem para 30m, disponíveis no banco de dados TOPODATA; iv) imagens ASTER com resolução espacial de 30m; e somente para a BHSE, v) dados de um levantamento topográfico realizado na bacia, interpolados em células de 1 m.

Posteriormente a obtenção dos parâmetros do HUIN, pelas diferentes propostas selecionadas, para cada MDE utilizado, os HUIs obtidos foram convertidos em Hidrogramas Unitários (HUs), utilizando a Equação 35, para um valor de precipitação efetiva unitária (P_u) de 1 mm, incidindo de forma uniforme sobre a área das bacias, durante um intervalo de tempo de 05 minutos para a BHSE, e de 30 minutos para as demais bacias.

$$q(t) = \int_0^{t^*} u(t - \tau) d\tau, \quad \begin{cases} t^* = t, & t < \Delta t \\ t^* = \Delta t, & t \geq \Delta t \end{cases} \quad (35)$$

Em que, $u(t)$ é a ordenada do HUI no tempo t , $q(t)$ é a ordenada do HU na saída da bacia hidrográfica no tempo t , τ é a defasagem entre os tempos do HUI para o do HU e, Δt é o intervalo de tempo desejado para o HU.

2.5.1 Proposta Geomorfológica de Nash (1960) – P_1

A proposta de Nash (1960) teve como objetivo uma equação geral para o HUIN, com base na aproximação dos momentos do HUIN a partir de características morfométricas. Para isso, foram utilizados dados de monitoramento hidrológico e morfométricos de 90 bacias hidrográficas britânicas, com áreas de drenagem entre 12,4km² e 2224,8km².

Segundo os autores, a maior dificuldade da metodologia proposta foi a tomada de decisão referente a quais características geomorfológicas utilizar. Foram utilizadas as características área (A , mi^2), comprimento do maior curso d'água (L , em km), declividade do curso d'água principal (S_r , em partes por 10.000), declividade média da bacia (S_b , em partes por 10.000), coeficiente de variação da raiz quadrada da inclinação terrestre (VLS, adimensional) e o intervalo médio entre os fluxos (MI, em mi).

As Equações 36 e 37 apresentam as regressões obtidas com as variáveis que proporcionaram um melhor ajuste dos momentos do HUIN.

$$m_{1(\text{HUI})} = 27,6 \cdot A^{0,3} \cdot S_b^{-0,3} \quad (36)$$

$$m_{2(\text{HUI})} = 0,41 \cdot L^{-0,1} \quad (37)$$

Relacionando as Equações 32 e 33 com as Equações 36 e 37, tem-se que:

$$n = 2,44 \cdot L^{0,1} \quad (38)$$

$$k = \frac{11,31 \cdot A^{0,3}}{S_b^{0,3} \cdot L^{0,1}} \quad (39)$$

Em que, A é a área da bacia, em milhas², S_b é a declividade média da bacia, em partes por 10.000, e L é o comprimento do curso d'água principal, em milhas.

2.5.2 Proposta Geomorfológica de Wu (1963) – P_2

A proposta geomorfológica de Wu (1963) teve princípios baseados em uma análise realizada pelo autor em 21 bacias hidrográficas pequenas, distribuídas no estado de Indiana, nos Estados Unidos. Segundo o autor, o tempo de pico (t_p) não varia radicalmente para a mesma bacia hidrográfica e, portanto, um t_p médio pode ser associado a outras variáveis relacionadas à bacia hidrográfica. Partindo da relação apresentada na Equação 34, os autores realizaram regressões entre as variáveis t_p e k e algumas características morfométricas das bacias de estudo, obtendo equações que estimam estes parâmetros sem a necessidade de dados provenientes de monitoramento hidrológico.

Segundo os autores, esta formulação pode ser aplicada em bacias de 7 a 100 milhas quadradas, o equivalente a 18,13 a 259 km². Cinco fatores foram utilizados para as análises de regressão: área de drenagem (A , em milhas²), comprimento do curso d'água principal (L , em milhas), a declividade do curso d'água principal (S_r , em partes por 10.000), fator de forma da bacia hidrográfica (k_f , adimensional) e o coeficiente de forma do vale (k_v , adimensional).

Foram estabelecidos diferentes conjuntos de correlações múltiplas entre as variáveis dependentes, t_p e k , e as variáveis independentes A , L , S_r , k_f e k_v . O autor observou que as variáveis k_f e k_v não proporcionaram um grau de correlação melhor do que o obtido pelo uso, somente, das três primeiras variáveis. As Equações 40 e 41 apresentam as relações recomendadas por Wu (1963) para t_p e k , respectivamente.

$$t_p = \frac{31,42 \cdot A^{1,085}}{L^{1,233} \cdot S_r^{0,668}} \quad (40)$$

$$k = \frac{780 \cdot A^{0,937}}{L^{1,474} \cdot S_r^{1,473}} \quad (41)$$

Em que, t_p é o tempo de pico, em horas, k é o coeficiente de armazenamento, em horas, A é a área da bacia, em mi², L é o comprimento do curso d'água principal, em mi, e S_r é a declividade média do curso d'água principal, em partes por 10.000.

O valor de n pode ser obtido a partir da substituição dos valores de t_p e k , estimados pelas Equações 40 e 41, na Equação 34.

2.5.3 Proposta Geomorfológica de Rosso (1984) – P₃

A formulação geomorfológica proposta por Rosso (1984) foi desenvolvida com base em cinco bacias localizadas no sul da Itália, com valores de R_B entre 2,5 e 5,0, de R_L entre 1,5 e 4,1 e, de R_A entre 3,0 e 6,0. Seus conceitos estão amparados nas equações para a vazão (Equação 42) e o tempo de pico (Equação 43), propostas por Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979), de forma que quando multiplicadas, resultem na unidade adimensional IR (Equação 44), que representa o HUI da bacia hidrográfica de interesse.

$$q_p = 1,31 \cdot R_L^{0,43} \cdot \frac{v}{L_\Omega} \quad (42)$$

$$t_p = 0,44 \cdot L_\Omega \cdot \frac{R_B^{0,55}}{R_A^{0,55}} \cdot R_L^{-0,38} \cdot \frac{1}{v} \quad (43)$$

$$IR = q_p \cdot t_p = 0,576 \cdot R_L^{0,05} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \quad (44)$$

Em que, R_B , R_L e R_A são as razões de bifurcação, comprimento e entre áreas, respectivamente, v é a velocidade do escoamento, em $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ e L_Ω é o comprimento do curso d'água de maior ordem, em km.

O autor fez algumas modificações nas constantes das equações de q_p e t_p , com base nos valores obtidos de eventos monitorados para o local de estudo, contudo, respeitaram a relação IR do HUI apresentada pela Equação 44, de forma que, quando multiplicadas, as equações 45 e 46 resultam na Equação 44.

$$q_p = 0,364 \cdot R_L^{0,43} \cdot \frac{v}{L_\Omega} \quad (45)$$

$$t_p = 1,584 \cdot L_\Omega \cdot \frac{R_B^{0,55}}{R_A^{0,55}} \cdot R_L^{-0,38} \cdot \frac{1}{v} \quad (46)$$

Se a Equação 34 for reescrita, como apresentado em (47), e substituída na Equação geral do HUI (Equação 25), pode-se uma equação para q_p , como a apresentada em (48).

$$\frac{t_p}{k} = (n - 1) \quad (47)$$

$$q_p = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot (n - 1)^{n-1} \cdot e^{-(n-1)} \quad (48)$$

Ao multiplicar as Equações 34 e 48, obtém-se uma relação IR para o HUI, que pode ser escrita conforme a equação abaixo:

$$IR = q_p \cdot t_p = \frac{1}{\Gamma(n)} \cdot (n - 1)^n \cdot e^{-(n-1)} \quad (49)$$

Igualando as Equações 44 e 47, o autor encontrou relação cuja única variável dependente era o número de reservatórios. Trabalhando com 126 combinações diferentes para os valores de R_B , R_L e R_A , o autor obteve uma equação de regressão para a obtenção do parâmetro n de forma direta, apresentada na Equação 50.

$$n = 3,29 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,78} \cdot R_B^{0,07} \quad (50)$$

Num processo análogo, igualando as Equações 34 e 46, o autor obteve uma equação para a estimativa do parâmetro k , apresentada a seguir:

$$K = 0,70 \cdot \left(\frac{R_A}{R_B \cdot R_L}\right)^{0,48} \cdot \frac{L_\Omega}{v} \quad (51)$$

É importante observar que, para este método, v é dado em km.h^{-1} , enquanto que, o comprimento d'água de maior ordem, em km .

2.5.4 Proposta Geomorfológica de Bhaskar *et al.* (1997) – P₄

Bhaskar *et al.* (1997), Sahoo *et al.* (2006) e, posteriormente, Bhagwat *et al.* (2011), estabeleceram relações para a obtenção dos parâmetros n e k do HUIN, com base nas equações propostas por Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979), em diferentes bacias indianas. Diferentemente da proposta feita por Rosso (1984), os autores preservaram as relações para q_p e t_p do HUIG propostas por Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979), apresentadas anteriormente pelas Equações 42 e 43. Ao igualarem as equações da unidade adimensional do HUI (IR) obtidas para o HUIG (Equação 44) e para o HUIN (Equação 49), os autores julgaram a relação suficiente para a estimativa do parâmetro n .

A Equação 52 apresenta a relação do parâmetro n com as razões R_B , R_L e R_A , onde, para cada conjunto de razões R_B , R_L e R_A , cria-se uma função objetivo que iguala ambos os lados da equação alterando valor de n .

$$q_p \cdot t_a = \frac{1}{\Gamma(n)} \cdot (n-1)^n \cdot e^{-(n-1)} = 0,5764 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{0,05} \quad (52)$$

Para a estimativa do parâmetro k , os autores reescrevem a Equação 34, isolando o parâmetro k , da seguinte forma:

$$k = \frac{t_p}{(n - 1)} \quad (53)$$

Substituindo o a equação de t_p para o HUIG (Equação 43) na Equação 53, tem que:

$$k = \frac{0,44}{(n - 1)} \cdot \frac{L_\Omega}{v} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{-0,38} \quad (54)$$

Em que, n é o número de reservatórios, k é o coeficiente de armazenamento, em horas, R_A é a razão entre áreas, R_B é a razão de bifurcação, R_L é a razão de comprimento, L_Ω é o comprimento do curso d'água de maior ordem, em km, e v é a velocidade dinâmica, em $m \cdot s^{-1}$.

2.6 Análise do desempenho do HUIN modelado de acordo com diferentes propostas geomorfológicas e fontes de informações do relevo

Para analisar o desempenho das propostas geomorfológicas para o HUIN utilizadas, combinadas com os diferentes MDEs propostos, para cada bacia hidrográfica, fez-se a comparação evento a evento do hidrograma estimado de ESD com o observado. Foram analisadas algumas características do hidrograma estimado pelas combinações proposta/MDE, comparativamente ao observado, tais como: o formato do hidrograma e a qualidade da estimativa das vazões e dos tempos de pico.

O desempenho das combinações proposta/MDE quanto ao comportamento das vazões ao longo do tempo foi avaliado empregando o coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), obtido a partir da Equação 55, e segundo Guilhon; Rocha (2007) reflete a eficiência da aplicação do modelo para estimativas, especialmente das vazões de cheias. 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; $C_{NS} < 0,50$, insatisfatório.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - Q_{i_{est}})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (55)$$

Em que $Q_{i_{obs}}$ é a vazão observada no tempo $t=i$, $Q_{i_{est}}$ é a vazão estimada no tempo $t=i$, $\bar{Q}_{obs}$ é a vazão média observada, e N é o número de ordenadas do hidrograma.

Para análise das vazões máximas obtidas, fez-se uso do erro relativo na estimativa da vazão de pico (ER_{Qp}) (Equação 56), que está relacionado ao viés das vazões estimadas em relação às observadas (ANDRADE *et al.*, 2013). Segundo Moriasi *et al.* (2007), o ER_{Qp} serve de indicativo se o modelo é ou não pobre em representatividade. Foi utilizada a classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007): $|ER_{Qp}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$, bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$, satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$, insatisfatório.

$$ER_{Qp} = \frac{|Q_{p_{obs}} - Q_{p_{est}}|}{Q_{p_{obs}}} \cdot 100 \quad (56)$$

Em que, $Q_{p_{obs}}$ é a vazão de pico observada e $Q_{p_{est}}$ é a vazão de pico estimada.

Análise semelhante à do ER_{Qp} foi realizada para o tempo de pico (Equação 57). O erro relativo na estimativa do tempo de pico (ER_{tp}) serve para ficar a estimativa dos tempos em que o hidrograma chega em seus valores máximos, e enquanto, percentualmente, essa estimativa está errando o tempo da descarga máxima.

$$ER_{tp} = \frac{|t_{p_{obs}} - t_{p_{est}}|}{t_{p_{obs}}} \cdot 100 \quad (57)$$

Em que $t_{p_{obs}}$ é o tempo de pico observado e $t_{p_{est}}$ é o tempo de pico estimado.

3 Resultados e discussão

3.1 Eventos hidrológicos empregados

Foram selecionados 10 eventos para a BHAC, a BHRJ e a BHRL, 8 eventos para a BHACN e 5 eventos para a BHSE, dando prioridade a eventos de maiores magnitudes, desde que os mesmos respeitassem as limitações das curvas-chaves atuais das bacias em estudo. Portanto, por mais que as séries históricas dispusessem de eventos de maiores magnitudes, quando estes extrapolavam muito as curvas estabelecidas, não foram utilizados com o objetivo de não agregar incertezas nos valores de vazão obtidos a partir da combinação de monitoramento limimétrico e a curva-chave existente.

Na Tabela 6 estão apresentadas algumas características dos eventos selecionados, tais como a data e horário do início e do fim da chegada de ESD na seção de controle, a vazão máxima de ESD ($Q_{ESD,MÁX}$), a velocidade máxima de ESD ($V_{ESD,MÁX}$), a precipitação total do evento (P_{TOTAL}), a intensidade média da precipitação do evento ($i_{MÉD}$) e a intensidade média máxima de 60 minutos do evento ($i_{MÁX}$).

Tabela 6 - Data e horário do início e do fim das vazões de ESD na seção de controle, vazão máxima de ESD ($Q_{ESD,MÁX}$), velocidade máxima de ESD ($V_{ESD,MÁX}$), precipitação total (P_{TOTAL}), intensidade média da precipitação ($i_{MÉD}$), e intensidade máxima da precipitação de 60 minutos ($i_{MÁX}$) dos eventos selecionados em cada bacia hidrográfica avaliada.

Evento	Início Escoamento		Fim Escoamento		Q _{ESD,MÁX} (m ³ .s ⁻¹)	V _{ESD,MÁX} (m.s ⁻¹)	P _{TOTAL} (mm)	i _{MÉD} (mm.h ⁻¹)	i _{MÁX} (mm.h ⁻¹)	
	Data	Hora	Data	Hora						
BHAC	1	19/07/2015	07:25:00	21/07/2015	07:55:00	50,08	1,15	113,2	2,8	16,6
	2	21/09/2015	06:25:00	22/09/2015	07:55:00	17,93	0,87	47,6	2,3	13,8
	3	23/09/2015	09:55:00	24/09/2015	03:55:00	51,93	1,16	49,3	3,5	14,4
	4	20/10/2015	06:55:00	21/10/2015	01:25:00	33,64	1,03	37,3	10,7	24,6
	5	13/11/2015	03:25:00	13/11/2015	22:25:00	12,02	0,78	18,4	1,3	14,8
	6	18/12/2015	10:25:00	19/12/2015	08:55:00	16,17	0,85	31,6	2,0	24,7
	7	05/01/2016	12:25:00	06/01/2016	09:55:00	10,35	0,75	53,5	3,7	11,8
	8	15/05/2016	09:25:00	16/05/2016	02:25:00	14,88	0,83	44,6	3,3	12,2
	9	19/10/2016	08:25:00	20/10/2016	10:55:00	6,25	0,66	21,0	1,7	5,4
	10	09/03/2017	19:00:00	10/03/2017	18:00:00	6,26	0,66	36,4	2,8	12,9
BHACN	1	26/08/2015	16:30:00	27/08/2015	19:00:00	1,53	0,57	16,2	2,7	10,6
	2	08/10/2015	06:30:00	09/10/2015	03:30:00	5,16	0,74	32,4	1,2	8,3
	3	05/11/2015	03:00:00	06/11/2015	05:30:00	3,96	0,70	20,9	1,3	5,9
	4	10/11/2015	05:30:00	11/11/2015	05:00:00	3,30	0,67	25,1	2,3	17,5
	5	04/12/2015	04:30:00	05/12/2015	00:30:00	5,63	0,75	29,1	5,8	43,8
	6	13/09/2016	00:30:00	13/09/2016	22:00:00	6,25	0,77	27,1	3,5	13,0
	7	16/10/2016	09:00:00	17/10/2016	03:30:00	5,14	0,74	33,5	6,1	31,5
	8	19/10/2016	09:00:00	20/10/2016	07:30:00	7,10	0,79	25,6	1,9	7,4
BHRJ	1	15/12/2006	22:29:03	16/12/2006	15:29:03	4,85	1,60	38,0	1,2	12,0
	2	06/02/2007	10:40:03	07/02/2007	05:40:03	2,75	1,21	27,0	4,0	10,0
	3	01/07/2008	14:29:01	01/07/2008	23:29:01	11,95	2,48	49,0	2,8	42,0
	4	31/01/2009	16:54:01	01/02/2009	04:54:01	10,15	2,29	23,0	8,4	20,0
	5	14/02/2009	04:24:01	14/02/2009	22:53:01	8,47	2,09	45,0	2,4	18,0
	6	22/02/2012	21:44:15	23/02/2012	11:14:15	5,27	1,66	61,0	3,9	70,0
	7	28/12/2012	18:36:32	29/12/2012	08:36:32	17,72	3,00	78,0	13,4	88,0
	8	08/01/2013	22:37:32	09/01/2013	12:37:32	12,08	2,49	70,0	15,6	44,0
	9	03/01/2016	18:49:05	04/01/2016	09:19:05	17,88	3,01	83,0	8,7	80,0
	10	04/01/2012	01:46:15	04/01/2012	17:46:15	17,46	2,98	58,0	10,5	38,0
BHRL	1	31/10/2006	18:13:05	01/11/2006	02:13:05	0,36	0,52	20,0	20,0	32,0
	2	22/12/2006	12:45:05	22/12/2006	22:45:05	0,66	0,73	49,0	24,5	48,0
	3	02/01/2007	21:45:05	03/01/2007	14:15:05	0,30	0,48	47,0	3,0	18,0
	4	27/01/2007	02:46:05	27/01/2007	14:16:05	0,34	0,51	22,0	11,0	24,0
	5	03/02/2007	17:46:05	04/02/2007	04:16:05	0,36	0,52	36,0	5,1	36,0
	6	04/12/2007	14:18:05	04/12/2007	23:48:05	0,34	0,51	21,0	2,8	32,0
	7	25/11/2008	00:09:05	25/11/2008	12:09:05	0,38	0,54	43,0	7,2	20,0
	8	18/10/2010	12:36:05	18/10/2010	19:36:05	0,50	0,62	36,0	24,0	60,0
	9	13/12/2010	19:25:05	14/12/2010	02:25:05	0,33	0,50	31,0	6,9	32,0
	10	12/02/2012	05:15:03	12/02/2012	14:15:03	0,63	0,71	40,0	20,0	36,0
BHSE	1	04/11/2017	04:30:00	04/11/2017	05:15:00	1,25	1,14	25,6	23,6	38,4
	2	04/11/2017	05:15:00	04/11/2017	06:30:00	1,49	1,17	16,6	12,5	28,8
	3	12/05/2017	21:50:00	12/05/2017	22:55:00	1,59	1,19	25,2	18,9	81,6
	4	20/05/2017	18:45:00	20/05/2017	19:45:00	0,16	0,79	16,8	10,1	26,4
	5	25/05/2017	01:55:00	25/05/2017	02:55:00	0,49	0,96	17,8	17,8	67,2

Pode-se observar maiores amplitudes de vazões máximas e, consequentemente, das velocidades máximas, para BHAC ($Q_{ESD,MÁX} = 6,25$ a $51,93\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $V_{ESD,MÁX} = 0,66$ a $1,16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e para a BHRJ ($Q_{ESD,MÁX} = 2,75$ a $17,88\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $V_{ESD,MÁX} = 1,21$ a $3,01\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), enquanto que, menores amplitudes são observadas para a BHSE ($Q_{ESD,MÁX} = 0,16$ a $1,59\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $V_{ESD,MÁX} = 0,79$ a $1,19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e para a BHRL ($Q_{ESD,MÁX} = 0,33$ a $0,66\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $V_{ESD,MÁX} = 0,48$ a $0,73\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Os valores obtidos para a BHACN ($Q_{ESD,MÁX} = 1,53$ a $7,10\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; $V_{ESD,MÁX} = 0,57$ a $0,79\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) refletem as restrições da curva-chave, uma vez que já foram observadas vazões semelhantes aos da BHAC no local.

Não foram observadas relações entre o tamanho das bacias hidrográficas com as respostas obtidas, em termos de $Q_{ESD,MÁX}$, em relação a um evento de chuva. As diferentes respostas das bacias podem estar associadas à umidade antecedente do solo e ao padrão da ocorrência de cada evento de precipitação, características que também influenciam na geração do ESD.

Com relação aos valores de precipitação total, assim como ocorreu com as amplitudes de vazões máximas, as maiores amplitudes são encontradas na BHAC ($P_{TOTAL} = 18,4$ a $113,2\text{mm}$) e na BHRJ ($P_{TOTAL} = 23$ a 83mm), seguidas da BHRL ($P_{TOTAL} = 20$ a 49mm). As menores amplitudes de precipitação foram observadas na BHSE ($P_{TOTAL} = 16,6$ a $25,6\text{mm}$) e na BHACN ($P_{TOTAL} = 16,2$ a $33,5\text{mm}$).

As maiores amplitudes das intensidades média e máxima foram observadas na BHRL ($i_{MÉD} = 5,1$ a $24,5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $i_{MÁX} = 18$ a $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) e na BHRJ ($i_{MÉD} = 1,2$ a $15,6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $i_{MÁX} = 12$ a $88\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), resultantes de eventos que compreendem o período entre os meses de outubro e fevereiro. Esse comportamento da precipitação condiz com o padrão de precipitação de Minas Gerais, descrito por Reboita *et al.* (2010) como sendo do tipo convectivo, com menores durações e maiores intensidades, apresentando duas estações bem definidas, isto é, um período seco (inverno) e outro chuvoso (verão).

As menores amplitudes de intensidades média e máxima foram observadas nas BHAC ($i_{MÉD} = 1,7$ a $10,7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $i_{MÁX} = 5,4$ a $24,7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) e BHACN ($i_{MÉD} = 1,2$ a $6,1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $i_{MÁX} = 5,9$ a $43,8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$). Para a BHSE ($i_{MÉD} = 10,1$ a $23,6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; $i_{MÁX} = 26,4$ a $81,6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), as intensidades foram mais elevadas que as das BHAC e BHACN, mas o tempo de intervalo de modelagem da bacia é inferior ao das demais, igual a 5 minutos, o que contribui para os altos valores de intensidades observados. Nas bacias localizadas no Rio Grande do Sul, os eventos selecionados ocorreram

de forma distribuída entre os meses do ano, característica que, de acordo com Collischonn; Dornelles (2013), está associada à ocorrência de frentes frias praticamente o ano todo (em torno de 40 frentes por ano). Além disso, sabe-se que o padrão de precipitação da região em que estas bacias estão localizadas apresenta chuvas do tipo frontal, caracterizadas por maiores durações e menores intensidades, abrangendo grandes áreas.

Analisando separadamente as intensidades médias ($i_{MÉD}$) ocorridas nas bacias, verifica-se que não existe uma relação perfeita com a $Q_{ESD,MÁX}$. No entanto, analisando conjuntamente com a variável P_{TOTAL} , observa-se uma ligeira tendência da $Q_{ESD,MÁX}$ aumentar com o crescimento da $i_{MÉD}$ e da P_{TOTAL} .

3.2 Precipitação efetiva e hietogramas

Conforme discutido no Capítulo 1 (Tabela 1), para uma mesma bacia hidrográfica, cada um dos MDEs apresentou um valor diferenciado de área. Em geral, as áreas obtidas pelo MDE oriundo das Cartas foram inferiores àquelas obtidas dos demais MDEs, que se aproximaram entre si. Um comportamento distinto foi verificado apenas para a BHSE, onde o MDE obtido a partir do levantamento topográfico originou em uma área menor que as demais. Assim, para cada uma das bacias, considerando um mesmo hidrograma de ESD, quanto maior o valor da área, menor o valor da $P_{EFETIVA}$ e vice-versa.

A Figura 39 ilustra as precipitações efetivas obtidas a partir das áreas de drenagens extraídas dos diferentes MDEs utilizados, para um evento da BHAC. Na mesma, é possível perceber a diferença entre a $P_{EFETIVA}$ obtida considerando a área de drenagem derivada das Cartas das demais fontes de informações do relevo. Também, é possível observar que as precipitações efetivas obtidas pelas demais fontes se sobrepõem, não sendo possível a identificação de todas. Esse comportamento foi observado em todas as bacias hidrográficas, com exceção da BHSE, onde as áreas obtidas variaram mais entre as fontes.

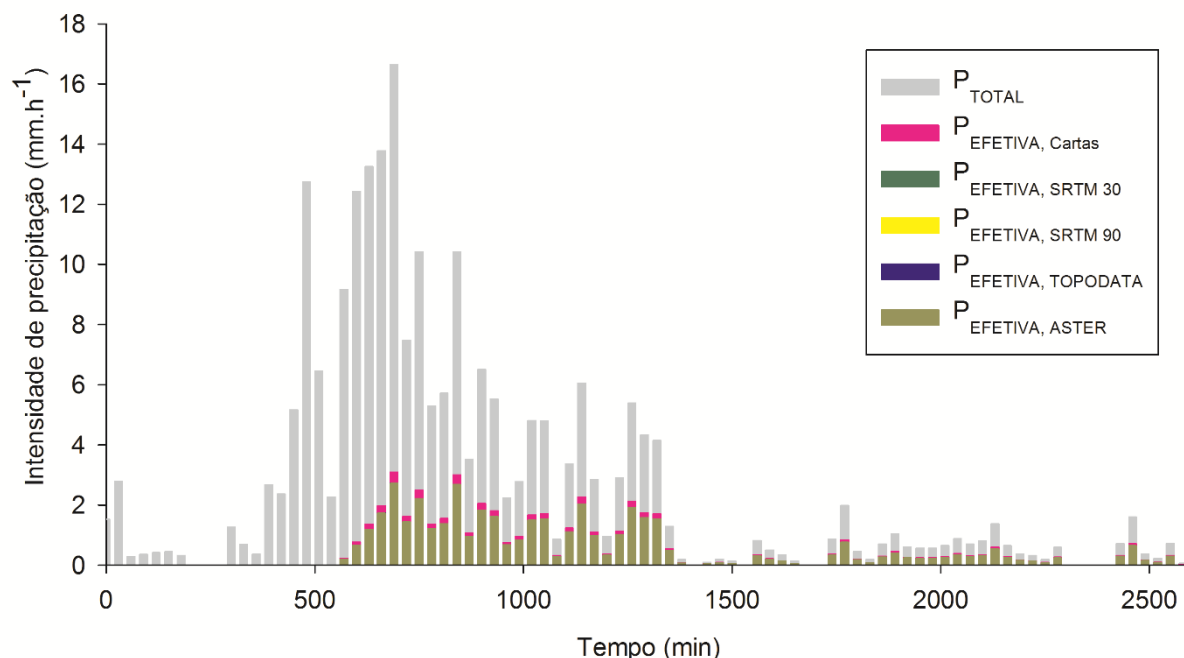


Figura 39 - Exemplo de hietograma de precipitações efetivas considerando a área de drenagem extraída do MDE gerado por diferentes fontes de informação do relevo, exaltando a diferença nos valores obtidos entre as Cartas e os demais MDEs, para um evento da BHAC.

Na Tabela 7 são apresentadas as grandezas associadas à separação de escoamento, tais como a precipitação acumulada dos cinco dias antecedentes (P_5), as abstrações iniciais (I_a), a precipitação efetiva ($P_{EFETIVA}$), o coeficiente de ESD e o Número da curva (CN) para cada evento de precipitação, para as bacias estudadas. Os valores apresentados para a $P_{EFETIVA}$ e o CN correspondem às médias dos valores obtidos para estas variáveis a partir dos diferentes MDEs utilizados.

Tabela 7 - Precipitação total (P_{TOTAL}), precipitação acumulada dos cinco dias antecedentes (P_5), abstrações iniciais (I_a), precipitação efetiva ($P_{EFETIVA}$), coeficiente de ESD (C) e valor de CN, obtidos para os eventos selecionados em cada bacia hidrográfica analisada.

Evento		P _{TOTAL}	P ₅	I _a (mm)	P _{EFETIVA} [*]	Coeficiente de ESD	CN [*]
BHAC	1	113,2	24,3	18,9	22,1	19,5	45,2
	2	47,6	61,4	11,0	4,7	9,9	50,6
	3	49,3	62,3	15,9	8,6	17,4	82,9
	4	37,3	53,3	8,5	6,3	17,0	71,4
	5	18,4	46,8	3,2	2,3	12,7	75,2
	6	31,6	34,3	7,5	2,9	9,1	58,9
	7	53,5	3,1	29,6	2,2	4,1	51,9
	8	44,6	2,0	19,2	2,7	6,1	61,3
	9	21,0	69,6	3,3	1,6	7,8	59,5
	10	36,4	17,4	16,5	1,3	3,6	47,3
BHACN	1	16,2	0,6	5,7	1,0	6,1	71,2
	2	32,4	17,7	13,0	2,6	8,0	66,9
	3	20,9	28,5	5,4	2,5	11,8	75,5
	4	25,1	19,9	0,1	2,2	8,9	50,0
	5	29,1	0,7	0,3	2,6	9,1	47,0
	6	27,1	3,1	5,8	3,2	11,9	68,0
	7	33,5	15,1	3,7	2,3	6,7	41,1
	8	25,6	80,8	5,9	3,7	14,6	75,0
BHRJ	1	38,0	91,0	10,0	4,4	11,7	63,1
	2	27,0	4,0	3,0	2,4	9,0	61,9
	3	49,0	0,0	14,0	8,5	17,4	53,9
	4	23,0	80,0	7,0	6,1	26,5	79,9
	5	45,0	89,0	8,0	7,0	15,5	61,5
	6	61,0	0,0	35,0	3,6	5,8	20,5
	7	78,0	0,0	44,0	8,9	11,4	45,0
	8	70,0	39,0	4,0	8,3	11,8	44,2
	9	83,0	26,0	5,0	13,6	16,4	40,7
	10	58,0	298,0	13,0	15,3	26,3	82,2
BHRL	1	20,0	0,0	0,0	0,4	2,2	22,3
	2	49,0	24,0	0,0	1,3	2,7	13,1
	3	47,0	126,0	2,0	1,0	2,0	10,9
	4	22,0	115,0	0,0	0,6	2,8	23,3
	5	36,0	62,0	2,0	0,6	1,7	31,0
	6	21,0	0,0	0,0	0,5	2,5	23,9
	7	43,0	64,0	2,0	0,9	2,0	12,3
	8	36,0	55,0	0,0	0,6	1,8	11,3
	9	31,0	14,0	0,0	0,5	1,5	10,9
	10	40,0	75,0	0,0	0,6	1,6	9,4
BHSE	1	25,6	9,8	13,4	1,6	6,4	76,0
	2	16,6	32,2	5,6	2,5	14,8	86,8
	3	25,2	53,6	15,2	1,8	7,1	84,6
	4	16,8	24,6	11,4	0,3	1,5	70,1
	5	17,8	35,2	14,4	0,5	2,7	92,5

* Valor médio entre os obtidos utilizando os diferentes MDEs.

Os valores obtidos para a $P_{EFETIVA}$, entre os eventos de uma mesma bacia, variaram em função de dois principais parâmetros: a P_5 e a I_a . Entre as bacias, a $P_{EFETIVA}$ variou em função de mais fatores, como o regime de chuvas, a cobertura vegetal e o tipo de solo. Não foram observadas relações diretas entre os valores de I_a e as $P_{EFETIVA}$'s, contudo, percebe-se que com o aumento da P_5 e da P_{TOTAL} , geralmente, há um aumento da $P_{EFETIVA}$.

Na BHAC, de acordo com a umidade antecedente do solo, 5 eventos se enquadraram na classe AMC I, 1 evento na AMC II e 4 eventos na AMC III. Para os eventos enquadrados como AMC I e AMC II, com exceção de 1 evento, as $P_{EFETIVA}$'s obtidas foram as menores (1,31 a 2,89mm), enquanto que para os enquadrados como AMC III, as $P_{EFETIVAS}$ foram maiores (1,64 a 8,59mm). Assim como esperado, valores de I_a obtidos para os eventos AMC II e III ($I_a = 3,2$ a 15,9mm; $P_5 = 46,8$ a 69,6mm) foram menores que para os AMC I ($I_a = 7,5$ a 29,6mm; $P_5 = 2,0$ a 34,3mm), devido à menor capacidade de armazenamento do solo para os mesmos.

Para a BHACN, 1 evento foi enquadrado na classe AMC III e, os demais, na classe AMC I. Os valores de $P_{EFETIVA}$ variaram em torno de 31,8% ($P_{EFETIVA} = 0,98$ a 3,72mm), e as abstrações iniciais tiveram amplitude máxima igual a 12,9mm (0,1 a 13mm) e P_5 inferiores a 28,5mm, com exceção do evento AMC III ($P_5 = 80,8$ mm).

Na BHRJ, os valores de $P_{EFETIVA}$ entre os eventos variaram 52,8% (3,56 a 15,26mm), com 5 eventos enquadrados como AMC I, 1 evento como AMC II e 5 eventos como AMC III. Para os eventos AMC III ($P_5 = 80,0$ a 298,0mm) foram observados menores valores de P_{TOTAL} (23,0 a 58,0mm) e de I_a (4,44 a 15,26mm), quando comparados aos observados para os eventos AMC I e II ($P_5 = 0,0$ a 39,0mm; $P_{TOTAL} = 27,0$ a 83,0mm; $I_a = 3,0$ a 44,0mm).

Para a BHRL, 4 eventos se enquadraram como AMC I e 6 como AMC III. A variação entre os valores de $P_{EFETIVA}$ foi de 38,4% ($P_{EFETIVA} = 1,48$ a 1,33mm) e os valores de I_a observados foram iguais a 2mm (3 eventos) ou nulos (7 eventos), indicando que a geração do ESD foi ocasionada por lâminas de precipitações elevadas em curto espaço de tempo. É importante ressaltar que o intervalo de 30 min para uma bacia deste porte pode não permitir a identificação das I_a 's de forma adequada. Foram observados dois tipos de respostas da bacia: a primeira, é a geração de ESD a partir de intensidades de precipitação um pouco mais baixas associadas à P_5 's elevadas ($P_5 > 55$ mm) e, a segunda, é a geração de ESD a partir

de intensidade muito altas de precipitação ($i_{MÁX} = 32$ a 48mm.h^{-1}) associadas a valores baixos ou nulos de P_5 .

Na BHSE, a variação entre os valores de $P_{EFETIVA}$ foi de 69,9% ($P_{EFETIVA} = 0,26$ a $2,46\text{mm}$), com 3 eventos enquadrados como AMC I, 1 evento como AMC II e 1 evento como AMC III. As amplitudes observadas para a P_5 (9,8 a $53,6\text{mm}$) e I_a (5,6 a $15,2\text{mm}$), combinadas com sua pequena área ($\sim 0,67\text{km}^2$), indicam que, para que ocorra a geração de ESD, sua capacidade total de armazenamento já deve estar comprometida antes de iniciar o evento de precipitação. Esse tipo de análise só foi possível devido ao intervalo de tempo utilizado para esta bacia, igual a 5min. Em outras bacias, como a BHRL, com intervalo de análise de 30 min, essas análises não se tornam possíveis.

Analizando os valores do coeficiente de ESD, os quais representam a porção da P_{TOTAL} que é convertida em escoamento superficial direto, nota-se significativa distinção entre as bacias. Os maiores valores de coeficiente de ESD foram observados para BHRJ (5,8 a 26,5%) e os menores, para a BHRL (1,48 a 2,8%). A BHAC (3,6 a 17,4%) apresentou os maiores coeficientes e amplitude de valores entre as bacias localizadas no RS. Apesar de apresentar amplitude semelhante à da BHACN, a BHSE (1,5 a 14,8%) apresentou valores máximos inferiores, e muito aproximados dos obtidos para a BHACN (6,1 a 14,6%).

A BHSE apresentou a maior variação entre os coeficientes de ESD ($CV = 79,9\%$) e a menor, foi obtida para a BHRL ($CV = 22,3\%$). Resultados semelhantes foram obtidos por Veber (2016), que concluiu que há uma tendência de maior conversão de chuva em escoamento superficial direto na BHSE, em relação à BHRL, com valores de coeficientes de ESD variando em torno de 62%, enquanto que na BHRL estas variações são bem menores, em torno de 26%.

Com relação aos valores de CN, observou-se que os valores obtidos variaram entre os eventos e entre as bacias. As menores amplitudes dos valores de CN foram obtidas para as BHRL (CN = 9,3 a 31,0) e BHSE (CN = 70,1 a 92,5). A maior amplitude foi observada na BHRJ (CN = 20,5 a 82,2), enquanto que, nas BHAC (CN = 45,2 a 82,9) e BHACN (CN = 41,1 a 75,5) os valores das amplitudes foram intermediários.

Essas variações nos valores de CN também foram verificadas por outros autores. Agirre *et al.* (2005), determinando os valores de CN de forma semelhante, em 18 eventos de precipitação, numa bacia hidrográfica da Espanha, observaram

variações dos valores de CN (19,3 a 72,9). Nunes (2015), avaliando 12 e 18 eventos, respectivamente para as BHAC e BHRJ, observaram altos valores de CN, variando entre 58,6 e 83,4, para a BHAC, e entre 61,5 e 99,1, para a BHRJ.

Entretanto, a análise da amplitude do CN somente fornece uma ideia do comportamento da bacia avaliada com relação aos diferentes eventos ocorridos. Uma vez que, cada evento varia em função da magnitude, duração e distribuição temporal da precipitação, é natural que a bacia responda de forma diferente para cada um deles, variando o valor de CN, como estudado e discutido em diversos trabalhos científicos (AHMAD *et al.*, 2009; NGUYEN *et al.*, 2009; ŠRAJ *et al.*, 2010).

Na prática, são as magnitudes dos valores obtidos para o CN que refletem diretamente na capacidade de geração de ESD da bacia, com base em suas características fisiográficas associadas ao uso e ocupação e o grupo hidrológico do solo. Assim, analisando os valores médios de CN, para cada bacia, verifica-se o maior valor e a menor variação para a BHSE (CN = 82,0; CV = 10,9%), enquanto o menor valor e a maior variação, para a BHRL (CN = 16,8; CV = 44,8%). Para a BHAC, a BHACN e a BHRJ, os valores médios de CN obtidos foram 60,4, 61,9 e 55,3, respectivamente. A variação entre os valores na BHRJ ficou em torno de 34%, enquanto que, nas BHAC e BHACN, em torno de 21%.

A BHRL foi a bacia que apresentou comportamento mais distinto das demais, em relação à geração de ESD, tal que seus valores máximos de CN foram bem menores que os valores mínimos observados nas demais bacias. Grande parte da bacia apresenta solo da classe Cambissolo (Figura 10a), caracterizado essencialmente por profundidade, incluindo o horizonte C, variando de 0,70 a 1,20m (SARTORI *et al.*, 2005) e pode possuir elevada porosidade com alta capacidade de infiltração dependendo da textura das camadas superficiais (HUMANN *et al.* 2011). Outro aspecto relevante na BHRL é a sua ocupação do solo, que conta com grande área coberta por floresta (Figura 10b) e com grande quantidade de serapilheira (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2008), resultando numa melhor estruturação do solo devido à matéria orgânica com maior quantidade de macroporos e de fluxos preferenciais, favorecendo o processo de infiltração e retenção de água no solo. Essa característica de melhor qualidade hidrológica de áreas ocupada por matas e florestas, quando comparadas a outros usos e ocupações do solo, foi constatada por diferentes autores, dos quais se destacam Alvarenga *et al.* (2011); Roa-Garcia *et al.* (2011) e Zimmermann *et al.* (2006). Apesar de apresentar relevo bastante

acidentado e o regime de precipitação ser caracterizado por grandes intensidades e curtas durações, a permeabilidade do solo combinada à capacidade de interceptação da cobertura do solo promovem a infiltração da água na BHRL, reduzindo significativamente o ESD e, conseqüentemente, os valores de CN.

A BHSE apresentou os maiores valores de CN entre as bacias, contudo, não foram observadas $P_{EFETIVA}$'s tão altas como nas demais bacias planas, o que se deve às restrições da curva-chave para a bacia. A bacia possui a classe de solo Luvisolo (Figura 9a), cujas principais características são perfil raso e suscetibilidade à erosão devido à migração da argila dos horizontes superficiais para os subsuperficiais (STRECK *et al.* 2008) que, combinado ao uso predominante de solo exposto e áreas não-cultivadas (Figura 9b), contribui para a geração de ESD.

A BHAC e a BHACN são muito semelhantes fisiograficamente, apresentam os mesmos tipos de solo (Figura 9a) e ocupações do solo (Figura 9b). Os solos predominantes nestas bacias, Argissolos bruno-acinzentado e vermelho-amarelo, são caracterizados pela má drenagem e suscetíveis à erosão hídrica (SARTORI *et al.*, 2005), enquanto que, suas principais ocupações são enquadradas como solo exposto e área não-cultivada, não favorecendo a interceptação da precipitação. Apesar de relevos mais planos propiciarem a infiltração d'água no solo, os solos predominantes desta bacia possuem a característica de rápida saturação entre os horizontes de transição que, combinados aos padrões de precipitação da região (baixa intensidade, longa duração) e a baixa capacidade de interceptação da ocupação do solo, proporcionam a geração de ESD. Outro fator de grande importância para a geração de ESD, a ser analisado nestas bacias, é a superação da intensidade de chuva em relação à taxa de infiltração estável, que pode ocorrer em argissolos, devido a sua má capacidade de drenagem.

Para a BHRJ, os principais tipos de solo são Latossolo e Cambissolo (Figura 11a). Ambos apresentam boa capacidade de infiltração, contudo, os cambissolos são muito suscetíveis à erosão hídrica, apresentando grande potencial de geração de escoamento superficial (SARTORI *et al.*, 2005). As ocupações do solo predominantes são pastagem e milho (Figura 11b), que, assim como observado para as BHAC e BHACN, pouco contribuem com a interceptação da precipitação. Apesar de sua declividade e a permeabilidade do solo favorecerem a infiltração, a BHRJ tem valores elevados de $P_{EFETIVA}$, que se devem às intensidades mais altas de

precipitação, com valores de P_{TOTAL} elevados em curtos períodos de tempo, dificultando a infiltração de água no solo.

Diante desses aspectos, nota-se que o processo de conversão de precipitação em vazão de ESD nas bacias estudadas é resultado da interação de diversos fenômenos, os quais atuam de modo favorável ou não para a geração do ESD, dependendo das características fisiográficas e do padrão de precipitação de cada bacia.

3.3 Parâmetros obtidos para as propostas geomorfológicas do HUIN

Os parâmetros obtidos pelos diferentes MDEs utilizados, para cada uma das bacias de estudo, estão apresentados nas Tabelas 8 e 9, contemplando as propostas P_1 e P_2 , e, P_3 e P_4 , respectivamente. Como foi possível observar na caracterização geomorfológica realizada para as cinco bacias deste estudo, no Capítulo 1, diferentes MDEs resultam em informações distintas para uma mesma bacia, com maiores ou menores diferenças, dependendo da variável analisada. Logo, com diferentes dados de entrada para as propostas geomorfológicas para o HUIN, espera-se que os hidrogramas de ESD resultantes também difiram entre si.

Tabela 8 - Parâmetros extraídos dos MDEs extraídos das diferentes fontes de informações do relevo e utilizados para a obtenção dos parâmetros do HUIN para cada bacia hidrográfica analisada pelas propostas P_1 e P_2 , a saber: área (A, em milhas quadradas), comprimento do curso d'água principal (L, em milhas), declividade média da bacia (S_b , em partes por 10.000) e declividade do curso d'água principal (S_r , em partes por 10.000)

		Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER	Lev. Topográfico
BHAC	A	46,8	52,4	52,5	52,3	52,4	-
	L	15,7	14,8	14,8	14,5	14,8	-
	S_b	1108,8	1194,0	1161,0	1077,0	1260,0	-
	S_r	66,0	60,7	55,2	56,3	54,2	-
BHACN	A	23,5	26,2	26,3	26,2	26,1	-
	L	12,4	13,2	13,1	12,7	12,9	-
	S_b	975,6	1095,7	1057,7	980,2	1160,8	-
	S_r	90,1	96,8	91,0	99,0	97,9	-
BHRJ	A	12,3	12,5	12,4	12,5	12,5	-
	L	7,7	7,4	7,7	7,4	7,2	-
	S_b	1347,0	1134,0	1164,0	768,0	1078,0	-
	S_r	28,0	31,4	38,4	31,9	45,0	-
BHRL	A	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7	-
	L	2,8	2,6	2,8	2,6	3,0	-
	S_b	3495,1	3715,8	3696,0	3450,0	3693,0	-
	S_r	332,0	311,8	304,9	212,2	416,0	-
BHSE	A	0,31	0,33	0,34	0,34	0,36	0,25
	L	0,78	0,79	0,74	0,72	0,80	0,81
	S_b	1015,5	1060,8	988,4	911,9	1119,3	1305,4
	S_r	417,8	495,9	492,6	476,5	395,1	385,8

As propostas P_1 e P_2 , como visto anteriormente, utilizam informações de área (A) e comprimento do curso d'água principal (L). Além disso, a P_1 também requer a declividade da bacia (S_b), enquanto declividade do curso d'água principal (S_r) é necessário para a P_2 .

É possível observar na Tabela 8 que os parâmetros que mais apresentaram diferenças entre as fontes, indiferentemente da bacia hidrográfica, foram S_b e S_r . Os valores das áreas e comprimentos do curso d'água principal variaram menos entre as fontes para uma mesma bacia, quando comparados às declividades, contudo, são os pesos de cada variável nas equações de interesse que de fato tem maior impacto na determinação dos parâmetros do HUIN.

Tabela 9 - Parâmetros extraídos dos MDEs extraídos das diferentes fontes de informações do relevo e utilizados para a obtenção dos parâmetros do HUIN para cada bacia hidrográfica analisada pelas propostas P₃ e P₄, a saber: razão de bifurcação (R_B, adimensional), razão de comprimento (R_L, adimensional), razão entre áreas (R_A, adimensional) e comprimento do curso d'água de maior ordem (L_Ω, em km)

Bacia	Cartas	SRTM 30	SRTM 90	TOPODATA	ASTER	Lev. Topográfico	
BHAC	R _B	3,96	4,12	4,08	3,95	4,31	-
	R _L	3,16	2,71	3,18	2,69	3,09	-
	R _A	2,86	2,47	2,67	2,36	2,79	-
	L _Ω	17,58	16,76	16,67	16,86	17,03	-
BHACN	R _B	3,50	4,17	5,72	3,88	4,08	-
	R _L	2,68	2,48	4,05	2,52	2,49	-
	R _A	2,76	2,33	3,42	2,20	2,09	-
	L _Ω	10,75	11,55	15,80	11,34	11,43	-
BHRJ	R _B	4,33	4,48	4,37	4,06	5,08	-
	R _L	2,24	3,72	2,36	2,25	3,60	-
	R _A	1,98	3,85	2,00	2,05	3,38	-
	L _Ω	4,05	8,27	3,80	4,69	8,07	-
BHRL	R _B	5,20	5,67	4,90	5,38	5,00	-
	R _L	3,45	4,31	3,11	3,41	3,83	-
	R _A	4,32	4,84	3,56	3,50	4,18	-
	L _Ω	3,01	3,30	3,00	3,09	3,55	-
BHSE	R _B	3,50	4,25	3,83	3,00	4,14	2,25
	R _L	1,96	6,47	1,22	0,98	2,12	5,88
	R _A	1,03	3,77	0,91	0,64	2,73	3,14
	L _Ω	0,11	0,11	0,08	0,11	0,58	0,12

Para as P₃ e P₄, as informações utilizadas são as razões de bifurcação (R_B), de comprimento (R_L) e entre áreas (R_A), comprimento do curso d'água de maior ordem (L_Ω) e velocidade do escoamento. As velocidades foram obtidas pelas curvas vazão-velocidade, apresentadas anteriormente, relacionando a Q_{ESD,MÁX} de cada evento com a velocidade correspondente. Os valores de velocidade, para cada evento selecionado, estão apresentados na Tabela 6, juntamente com as demais características dos eventos.

Observa-se na Tabela 9 que quanto menor a bacia hidrográfica, menores os valores de L_Ω. Visto que as propostas P₃ e P₄ são diretamente proporcionais a este

parâmetro, seus valores podem exercer grande influência na estimativa dos parâmetros do HUIN. Além disso, as diferenças nos valores das razões entre as fontes, para a mesma bacia, podem resultar em valores distintos nos parâmetros do HUIN, principalmente com a variação dos valores de velocidade.

Pode-se observar a partir das variações dos atributos entre as bacias que, nas bacias de relevo mais plano, quanto maior a área da bacia hidrográfica, menores as variações entre os valores obtidos para os parâmetros pelos diferentes MDEs utilizados.

Para a BHSE, os parâmetros obtidos (Tabelas 8 e 9) apresentaram as maiores variações entre os MDEs, principalmente o L_{Ω} (105,1%) e as razões R_L (78,1%) e R_A (65,7%). Para os parâmetros A , S_b e S_r , as variações foram em torno de 12%, enquanto que para L e R_B , foram de 4,4 e 21,8%, respectivamente. Para as demais bacias hidrográficas, os parâmetros que apresentaram as maiores variações entre os MDEs foram a declividade S_r e as razões R_L e R_A . Os parâmetros com as menores variações foram A , L e R_B . Com exceção do parâmetro S_r , as bacias BHRJ e BHAC foram as que apresentaram, respectivamente, as maiores e menores variações para os parâmetros obtidos pelos diferentes MDEs. Para a S_r , a maior variação foi observada na BHRL (23,1%) e a menor na BHACN (4,3%).

De forma geral, os atributos utilizados na P_3 e na P_4 foram os que apresentaram maiores variações entre os MDEs, o que se deve, muito provavelmente, às diferentes hidrografias obtidas pelas fontes utilizadas, tanto em comprimento como em ordenamento da rede de drenagem. Para a P_1 , os parâmetros utilizados foram os que apresentaram as menores variações entre os MDEs, enquanto que, para a P_2 , somente o parâmetro S_r apresentou variações mais elevadas entre as fontes.

De posse dos valores apresentados nas Tabelas 8 e 9, foram determinados os parâmetros n e k do HUIN de acordo com cada uma das quatro propostas geomorfológicas avaliadas. As Tabelas 10 a 14 apresentam os parâmetros do HUIN obtidos, a partir de cada MDE, para a BHAC, a BHACN, a BHRJ, a BHRL e a BHSE, respectivamente.

Tabela 10 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHAC, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.

Proposta/Evento		Cartas		SRTM 30		SRTM 90		TOPODATA		ASTER	
		n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
P_1	-	3,2	199,6	3,2	203,0	3,2	204,8	3,2	209,8	3,2	199,8
P_2	-	5,0	62,2	4,8	84,8	4,5	97,9	4,5	98,3	4,4	100,5
P_3	1	4,6	87,8	5,3	82,3	5,0	79,1	5,3	83,0	5,0	81,5
	2		115,7		108,5		104,3		109,5		107,5
	3		86,9		81,5		78,3		82,2		80,7
	4		97,7		91,6		88,0		92,4		90,7
	5		128,9		120,9		116,2		122,0		119,7
	6		119,0		111,6		107,2		112,6		110,5
	7		134,2		125,8		120,9		127,0		124,6
	8		121,7		114,1		109,7		115,2		113,0
	9		153,7		144,1		138,5		145,5		142,8
	10		153,7		144,1		138,5		145,4		142,7
P_4	1	4,5	88,8	5,2	82,7	4,9	79,9	5,2	83,5	4,9	82,3
	2		117,1		109,1		105,4		110,1		108,6
	3		87,9		81,9		79,1		82,7		81,5
	4		98,8		92,1		89,0		92,9		91,7
	5		130,4		121,5		117,4		122,6		121,0
	6		120,4		112,2		108,4		113,2		111,7
	7		135,7		126,5		122,2		127,7		125,9
	8		123,1		114,7		110,8		115,8		114,2
	9		155,5		144,9		140,0		146,2		144,2
	10		155,4		144,8		140,0		146,2		144,2

Para a BHAC (Tabela 10), os valores obtidos para n e k variaram mais entre os MDEs do que entre as propostas geomorfológicas. Foram observadas variações do valor de n entre 0,3 (P_1) a 5,93% (P_4) para as propostas e, entre 18,1 (Cartas) a 21,3% (TOPODATA), para os MDEs. Os maiores valores de n , em geral, foram obtidos pela P_3 ($n = 4,6$ a $5,3$) e P_4 ($n = 4,5$ a $5,2$), que ficaram muito próximas, e os menores, pela P_1 ($3,2$ a $3,2$).

Os valores obtidos para k (Tabela 10) variaram mais que os obtidos para n , tanto entre as fontes, como entre as propostas. Entre as propostas, a variação nos valores de k foi de 2,07% (P_1) a 18,11% (P_2) e, os maiores valores foram obtidos pela P_1 ($k = 199,6$ a $209,8$ min) e os menores, pela P_2 ($k = 62,2$ a $100,5$ min). Entre as fontes, as menores variações foram obtidas pelos MDEs ASTER (27,7%) e SRTM 90 (30,4%), enquanto que as maiores, pelos MDEs Cartas (56,3%) e SRTM 30

(53,3%). Os menores valores foram obtidos pelo MDE Cartas ($k = 62,2$ a $199,6\text{min}$) e os maiores, pelo MDE TOPODATA ($k = 82,2$ a $209,8\text{min}$).

A P_1 foi a que teve as menores variações entre os valores de k e n , o que se deve, provavelmente, ao fato desta proposta utilizar os parâmetros morfométricos A , L e S_b , que apresentaram leve diferenciação para a BHAC. A variação mais elevada para os valores de k , pela P_2 , podem ser consequência das diferenças observadas para a S_r (8,3 %). Os valores próximos de n e k obtidos pela P_3 e P_4 podem ser justificados pelas pequenas variações dos parâmetros entre as fontes para a BHAC. Como ambas propostas utilizam os mesmos parâmetros extraídos do relevo, quanto menor a variação destes, menores são as diferenças nos parâmetros n e k .

Para a BHACN (Tabela 11), os parâmetros obtidos apresentaram comportamentos semelhantes em relação aos obtidos para a BHAC, com exceção da P_2 .

Tabela 11 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHACN, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.

Proposta/Evento		Cartas		SRTM 30		SRTM 90		TOPODATA		ASTER	
		n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
P ₁	-	3,1	172,5	3,2	171,2	3,2	173,3	3,1	177,6	3,2	168,4
P ₂	-	5,4	29,0	5,8	26,5	5,6	29,4	5,9	27,0	5,8	26,7
P ₃	1	4,2	121,7	5,5	115,3	5,4	128,7	5,5	112,8	5,9	109,2
	2		94,3		89,4		99,7		87,5		84,6
	3		99,7		94,5		105,4		92,5		89,5
	4		103,6		98,1		109,5		96,0		92,9
	5		92,7		87,8		98,0		85,9		83,1
	6		90,7		85,9		95,8		84,0		81,3
	7		94,4		89,4		99,8		87,5		84,7
	8		88,3		83,6		93,3		81,8		79,2
P ₄	1	4,2	123,1	5,5	115,6	5,4	129,5	5,4	113,2	5,9	109,2
	2		95,4		89,6		100,4		87,8		84,7
	3		100,8		94,7		106,1		92,8		89,5
	4		104,7		98,4		110,2		96,4		93,0
	5		93,7		88,0		98,6		86,2		83,2
	6		91,7		86,1		96,5		84,3		81,3
	7		95,5		89,7		100,5		87,8		84,7
	8		89,2		83,8		93,9		82,1		79,2

Em relação às propostas, no caso da BHACN (Tabela 11), as menores e maiores variações entre os valores de n (0,24 a 12,6%) e k (1,9 a 6,9%) foram obtidas pela P_1 e P_4 , respectivamente. Entre as fontes de relevo, a menor e a maior variação entre os valores de n foram obtidas pelos MDEs Cartas (22,0%) e ASTER (26,3%), enquanto que, para os valores de k , pelos MDEs SRTM 90 (52,8%) e TOPODATA (67,9%), respectivamente.

Os maiores valores de n foram observados para a P_2 ($n = 5,4$ a $5,9$) e os menores para a P_1 ($n = 3,1$ a $3,2$), enquanto que, para os valores de k , os maiores foram observados para P_1 ($k = 168,4$ a $177,6\text{min}$) e menores para P_2 ($k = 26,7$ a $29,4\text{min}$). Os valores de n e k obtidos pela P_3 e P_4 , assim como ocorreu na BHAC, foram muito próximos, com valores um pouco superiores para a P_4 em relação à P_3 . Observou-se também que, independente da proposta, os menores valores de n e k foram obtidos pelos MDEs Cartas e ASTER, respectivamente. Para os maiores valores não foram observados comportamentos semelhantes, com os valores variando entre os MDEs.

Assim como observado para a BHAC, entre os MDEs houve maior variação nos valores de n e k , que entre as propostas geomorfológicas. Somente os valores obtidos para a P_2 ficaram bem diferenciados dos obtidos para a BHAC, possivelmente em virtude dos valores mais elevados obtidos para S_r .

A BHRJ, depois da BHSE, foi a bacia para a qual se obteve as maiores variações entre os parâmetros utilizando os diferentes MDEs, logo, uma maior variação nos valores de n e k , como é possível observar na Tabela 12, é esperada e condizente com os resultados obtidos até o momento para esta bacia.

Tabela 12 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHRJ, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados.

Proposta/Evento		Cartas		SRTM 30		SRTM 90		TOPODATA		ASTER	
		n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
P_1	-	3,0	135,3	3,0	143,7	3,0	141,7	3,0	161,4	3,0	146,2
P_2	-	2,4	179,7	2,5	162,1	2,8	113,0	2,5	158,3	3,0	98,9
P_3	1		13,8		29,9		12,6		16,7		26,2
	2		18,2		39,4		16,6		22,1		34,6
	3		8,9		19,3		8,1		10,8		16,9
	4		9,6		20,9		8,8		11,7		18,3
	5	6,4	10,5	4,1	22,8	6,4	9,6	5,9	12,8	4,9	20,0
	6		13,3		28,7		12,1		16,1		25,2
	7		7,4		15,9		6,7		8,9		14,0
	8		8,9		19,2		8,1		10,7		16,8
	9		7,3		15,8		6,7		8,9		13,9
	10		7,4		16,0		6,8		9,0		14,1
P_4	1		13,8		30,3		12,6		16,7		26,5
	2		18,2		39,9		16,6		22,1		34,9
	3		8,9		19,5		8,1		10,8		17,1
	4		9,6		21,1		8,8		11,7		18,5
	5	6,5	10,5	4,0	23,1	6,5	9,6	5,9	12,8	4,9	20,2
	6		13,2		29,1		12,1		16,1		25,4
	7		7,3		16,1		6,7		8,9		14,1
	8		8,8		19,4		8,1		10,7		17,0
	9		7,3		16,0		6,7		8,9		14,0
	10		7,4		16,2		6,7		9,0		14,2

As propostas que resultaram na menor e maior variação dos valores de n (0,3 a 20%) e k (6,7 a 39,9%) foram a P_1 e a P_4 , respectivamente. Entre as fontes, a menor e a maior variação nos valores de n (22,4 a 47,8%) e de k (68,4 a 107,5%) foram obtidas pelos MDEs SRTM 30 e Cartas, respectivamente. Os menores valores de k e de n foram obtidos pelo MDE SRTM 90 ($k = 6,7$ a $141,7\text{min}$) e SRTM 30 ($n = 2,5$ a $4,1$), respectivamente. Os maiores valores, tanto de n quanto de k , variaram entre os MDEs para cada uma das propostas utilizadas.

Em geral, a P_2 resultou nos menores valores de n e, a P_3 e P_4 , nos menores valores de k . Os menores valores de n , pela P_2 , podem estar associados aos menores valores observados para S_r e, os menores valores de k para a P_3 e P_4 , aos menores valores de L_Ω e maiores de velocidade ($v = 1,2$ a $3,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), cuja razão tem relação direta com o valor de k .

Os valores observados (Tabela 12) mostram que a BHRJ foi a mais sensível à aplicação das propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs. Diversos fatores podem estar contribuindo para este comportamento da bacia, com destaque para a sua área, considerada pequena ($\sim 32\text{km}^2$), declividade baixa do terreno e do curso d'água principal, além dos altos valores de velocidade observados.

Sendo a BHRL, a mais diferenciada das demais em termos de tamanho e declividade, o comportamento diferenciado dos parâmetros n e k em relação ao das demais bacias já era esperado. Na Tabela 13 estão apresentados os valores obtidos para n e k da BHRL, para cada uma das propostas geomorfológicas do HUIN, combinadas com os diferentes MDEs.

Tabela 13 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHRL, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados

Proposta/Evento		Cartas		SRTM 30		SRTM 90		TOPODATA		ASTER	
		n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
P_1	-	2,7	70,6	2,7	70,0	2,7	69,7	2,7	71,7	2,7	69,4
P_2	-	7,3	4,9	7,0	5,9	7,0	5,5	5,4	10,8	8,8	3,2
P_3	1		34,1		34,0		33,5		31,4		38,4
	2		24,4		24,3		24,0		22,4		27,5
	3		37,1		37,1		36,5		34,2		41,9
	4		34,7		34,6		34,1		31,9		39,1
	5	4,1	33,8	4,1	33,7	4,6	33,2	5,0	31,1	4,2	38,1
	6		34,9		34,9		34,3		32,1		39,4
	7		32,7		32,6		32,1		30,0		36,8
	8		28,4		28,3		27,9		26,1		32,0
	9		35,4		35,4		34,8		32,6		39,9
	10		25,1		25,1		24,7		23,1		28,3
P_4	1		34,5		34,5		33,9		31,6		38,9
	2		24,7		24,7		24,2		22,6		27,9
	3		37,6		37,6		36,9		34,5		42,4
	4		35,1		35,1		34,4		32,2		39,6
	5	4,1	34,2	4,0	34,2	4,5	33,6	4,9	31,4	4,1	38,6
	6		35,4		35,4		34,7		32,4		39,9
	7		33,1		33,1		32,4		30,3		37,3
	8		28,8		28,7		28,2		26,3		32,4
	9		35,9		35,9		35,2		32,9		40,5
	10		25,4		25,4		24,9		23,3		28,7

Em relação às propostas, no caso da BHRL (Tabela 13), as menores e maiores variações de n (0,6 a 17,2%) e k (1,3 a 46,6%) foram obtidas, respectivamente, pela P_1 e P_2 . Entre as fontes, as menores variações de n (27,2%) e k (66,7%) foram obtidas quando tais parâmetros foram estimados a partir de informações do MDE TOPODATA, enquanto que, as maiores variações de n (53,7%) e k (89,5%), foram obtidas pelos MDEs ASTER e Cartas, respectivamente.

Os menores valores de n foram obtidos pela P_1 ($n = 2,7$ a $2,7$) e, os maiores, pela P_3 ($n = 4,1$ a $5,0$). Para os valores de k , os menores valores foram obtidos pela P_2 ($k = 3,2$ a $10,8$ min), e os maiores, pela P_1 ($k = 69,4$ a $71,7$ min). Os menores valores de n , pela P_1 , estão associados aos menores valores de L , enquanto que, os maiores valores de k , pela P_2 , aos maiores valores de S_r observados para a bacia. Para a P_3 e P_4 , os valores de n e k variaram mais entre as fontes que para as demais bacias, o que pode ser resultado dos diferentes valores das razões R_B , R_L e R_A obtidos para esta bacia.

A BHSE foi a bacia que apresentou as maiores variações entre os valores dos parâmetros do relevo, logo, apresentou as maiores diferenças nos parâmetros n e k , como é possível observar na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros n (adimensional) e k (em minutos) do HUIN para a BHSE, obtidos pelas diferentes propostas geomorfológicas combinadas com os diferentes MDEs utilizados

Proposta/ Evento		Cartas		SRTM 30		SRTM 90		TOPODATA		ASTER		Lev. Topográfico	
		n	k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
P ₁	-	2,4	53,5	2,4	61,5	2,4	61,8	2,4	64,0	2,4	65,4	2,4	62,2
P ₂	-	4,8	2,8	5,1	3,1	5,8	2,5	5,7	2,9	5,5	3,1	5,0	3,7
P ₃	1		0,4		0,4		0,4		0,5		3,4		0,6
	2		0,4		0,4		0,4		0,5		3,3		0,6
	3	9,0	0,4	4,1	0,4	10,2	0,4	11,0	0,5	4,8	3,3	2,9	0,6
	4		0,5		0,5		0,4		0,6		4,0		0,8
	5		0,6		0,6		0,5		0,8		4,9		0,9
	1		0,00043		0,00044		0,00036		0,00052		0,00342		0,00065
P ₄	2		0,00041		0,00043		0,00035		0,00050		0,00332		0,00063
	3	9,8	0,00041	4,0	0,00042	11,5	0,00034	12,6	0,00050	4,7	0,00328	2,9	0,00062
	4		0,00050		0,00052		0,00042		0,00061		0,00404		0,00077
	5		0,00061		0,00064		0,00051		0,00075		0,00492		0,00093

Referente à BHSE (Tabela 14), as propostas que apresentaram as menores e maiores variações para n (0,4 a 55,4%) e k (6,8 a 129,4%) foram a P_1 e a P_4 , respectivamente. Entre as fontes, para os valores de n , a menor variação foi obtida pelo MDE SRTM 30 (28,9%) e, a maior, pelo TOPODATA (59,9%), enquanto que,

para os valores de k , o menor valor foi obtido pelo MDE ASTER (171,4%) e o maior pelo SRTM 90(188,2%).

Os valores de n (Tabela 14) foram enormemente elevados ($n = 2,4$ a $12,6$), enquanto os valores de k foram muito elevados para a P_1 ($k = 53,5$ a $65,4\text{min}$), e com valores tendendo a zero para a P_4 ($k = 0,00034$ a $0,00492\text{min}$). É notável que estes valores não refletem a realidade da bacia, contudo, é importante ressaltar que durante a proposição das propostas utilizadas, bacias desse porte não foram utilizadas, o que pode justificar alguns resultados obtidos.

Os valores de n obtidos pela P_1 podem ser considerados razoáveis com a BHSE devido ao fato de os mesmos serem obtidos de forma direta proporcionalmente aos valores de comprimento do maior curso d'água ($L = 0,7$ a $0,8\text{km}$), que foram baixos. Para a P_2 , os altos valores obtidos para n ($4,8$ a $5,8$) e baixos para k ($2,5$ a $3,7\text{min}$) são consequência dos valores obtidos para S_r ($385,7$ a $495,9$, em partes por 10.000) mais elevados frente aos obtidos para as demais bacias.

Um dos parâmetros que favoreceu os baixos valores de k (Tabela 14) para a P_3 e P_4 foram os valores obtidos para o comprimento do curso d'água de maior ordem ($L_\Omega = 79$ a 582m), que foram muito baixos frente aos valores utilizados normalmente, na ordem de quilômetros. Para a BHSE, existem dois cursos d'água bem definidos que se unem pouco antes do exutório da bacia, formando um novo curso, de ordem mais alta e, consideravelmente menor que os demais, como é possível observar no Apêndice A34.

Analisando os parâmetros obtidos pelas diferentes propostas entre as bacias utilizadas, pode-se observar que, para a P_1 , os valores de n e k decrescem com a diminuição da área e do comprimento do curso d'água principal. Para a P_2 , observou-se que com o aumento declividade do curso d'água principal, os valores de n aumentam e os de k , diminuem. Para as propostas P_3 e P_4 não foi possível observar comportamentos semelhantes aos das P_1 e P_2 , o que pode ser consequência das grandes diferenças nos valores obtidos para os parâmetros utilizados por essas propostas, principalmente de L_Ω e v .

Foram feitas buscas por estudos que tenham utilizado as propostas geomorfológicas para o HUIN empregadas neste trabalho a fim de comparar os parâmetros obtidos e, conseqüentemente, o desempenho dos hidrogramas de ESD simulados. Para as propostas P_1 e P_2 foram encontradas poucas aplicações na

literatura (ROSSO, 1984; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015), o que dificultou a discussão com os resultados observados. Para a P_3 e P_4 foram encontrados alguns trabalhos (ADIB *et al.*, 2010; ALEMNGUS; MATHUR, 2014; ZAKIZADEH; MALEKINEZHAD, 2015), especialmente na Índia e no Irã. Foram selecionados trabalhos em que as bacias apresentam características morfométricas próximas das bacias estudadas no presente trabalho, para posterior comparação dos parâmetros obtidos do HUIN obtidos.

Rosso (1984) comparou a P_1 e a P_2 com a P_3 , sem considerar diferentes fontes de informação do relevo, em três bacias italianas: Ilice ($A = 4,7\text{km}^2$), Virgínio ($A = 58,3\text{km}^3$) e Elsa ($A = 806\text{km}^2$). Para Ilice, os valores obtidos para n (2,7) e k (63min) pela P_1 foram muito próximos dos observados para a BHRL, pela mesma proposta. Para a P_2 , os autores observaram valores bastante discrepantes dos demais propostas, com valor de n (~13) superior e de k (0,6min) inferior. Esse comportamento de n e k também foi observado para a P_2 na BHRL e na BHSE, o que se deve, muito provavelmente, à magnitude da área das bacias e de seus cursos d'água principais, visto que, mesmo com declividades diferentes, as bacias apresentaram o mesmo comportamento. O valor de k (33min) obtido por Rosso (1984) para a P_3 também se aproximou dos observados para a BHRL, contudo, o valor de n (2,1) foi inferior, o que se deve aos diferentes valores observados para R_B , R_L e R_A . Para a bacia Virgínio, Rosso (1984) obteve valores de n (3,0) e k (160min), pela P_1 , muito próximos dos obtidos para a BHACN, para a mesma proposta. Com relação à P_2 , o valor obtido para n , igual a 5,1, se aproximou dos obtidos para a BHACN ($n = 5,4$ a $5,9$), contudo, os valores de k não foram similares. Como as áreas de drenagem da BHACN e de Virgínio são muito próximas, pode-se atribuir as diferenças obtidas nos valores de k às diferenças entre as declividades das bacias, cujos dados não foram fornecidos pelo autor. Para as bacias Ilice e Virgínio, os valores de n e k obtidos pela P_3 não se aproximaram dos obtidos neste estudo, reflexo dos valores diferenciados das razões R_B , R_L e R_A das bacias utilizadas pelo autor.

Aplicando as propostas P_1 e P_3 na bacia iraniana Manshad ($A = 60,0\text{km}^2$; $L = 14,5\text{km}$; $L_\Omega = 9,23\text{km}$; $\Omega = 5$), Zakizadeh; Malekinezhad (2015) obtiveram alguns valores semelhantes aos deste estudo. Para a P_1 , os autores obtiveram n e k iguais a 3,0 e 4,0 h (~241minutos), respectivamente. Os valores de n ficaram muito próximos dos obtidos para a BHACN, pela mesma proposta, enquanto que os de k

foram muito superiores, provavelmente devido ao fato da declividade da bacia ($S_b = 43,9\%$) ser consideravelmente superior à da BHACN. Para a P_3 , os valores de k (36 a 85min) ficaram muito próximos dos obtidos para a BHRJ, o que pode ser devido ao fato de que as bacias têm valores de R_L muito próximos e as velocidades utilizadas ($0,9$ a $3,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) foram muito próximas às da BHRJ ($1,2$ a $3,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Estudando a bacia do rio Kasilian ($A = 67,5\text{km}^2$; $L_\Omega = 10,6\text{km}$; $\Omega = 4$), cujas características são semelhantes à da BHACN, Adib *et al.* (2010) compararam o HUIC e sua versão geomorfológica com o HUIN e a P_4 . Para a P_4 , utilizando cartas topográficas na escala 1:25.000, os autores obtiveram n igual a 2,8 e valores de k entre 1,3 e 3,4 horas (~ 77 a 204min), com k médio igual de 2,1 horas ($\sim 123\text{min}$). Os valores de k obtidos pelos autores ficaram próximos dos obtidos para BHAC, para a mesma proposta, contudo, os valores de n foram muito discrepantes, o que se deve, provavelmente, aos valores R_A obtidos para a BHACN ($R_A = 2,2$ a $3,4$), frente ao observado pelos autores ($R_A = 4,93$).

Alemngus; Mathur (2014) aplicaram a formulação da P_4 na bacia Dbarwa ($A = 194,6\text{km}^2$; $L_\Omega = 17,7\text{km}$), na Eritréia. A bacia Dbarwa apresenta algumas semelhanças com a BHRJ, tais como a declividade média da bacia ($S_b = 12,5\%$) e a ordem de drenagem ($\Omega = 3$), além de valores das razões próximos quando utilizado o MDE ASTER. Os autores obtiveram n igual 3,0 e, utilizando velocidades de $3,7$ a $4,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, seus valores de k variaram de 0,5 a 0,6 horas (~ 30 a 36min), valores próximos dos obtidos para a BHRJ pela P_4 , combinada com o MDE ASTER.

De forma geral, em função das diferenças obtidas para as razões R_B , R_L e R_A nas bacias de estudo frente às da literatura, a estimativa do parâmetro n , tanto pela P_3 como pela P_4 , resultaria em valores diferentes, visto que seu valor é dependente somente das razões. Os valores de k , por possuírem mais parâmetros relacionados como L_Ω e v , para a P_3 , e L_Ω , v e n para a P_4 , apresentam, muitas vezes, comportamentos mais diferenciados, onde a razão entre L_Ω e v possui um peso maior dentro da equação, ou seja, mesmo que as razões R_B , R_L e R_A não sejam tão próximas entre bacias, uma relação L_Ω/v semelhante pode levar a resultados finais semelhantes.

3.4 Desempenho dos modelos frente a estimativa de hidrogramas de ESD

No apêndice B, estão apresentados os hidrogramas de ESD estimados para cada evento selecionado, em relação aos MDEs e às propostas geomorfológicas utilizadas, para cada uma das bacias utilizadas neste estudo.

Analisando os hidrogramas de ESD estimados a partir dos diferentes pares de n e k obtidos, foi possível observar aspectos quanto ao seu comportamento ao longo do tempo (C_{NS}) e às características relacionadas ao pico dos hidrogramas (ER_{Qp} e ER_{tp}). As estatísticas obtidas para os hidrogramas estimados para as BHAC, BHACN, BHRJ, BHRL e BHSE estão apresentadas nas Tabelas 15 a 19, respectivamente.

Tabela 15 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHAC com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entre os MDEs e as propostas utilizadas

Propostas utilizadas										
Proposta/ MDE		C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)		
		Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd
P ₁	Cartas	0,21	0,81	0,52	20,2	54,8	42,8	27,8	122,2	66,7
	SRTM 30	0,20	0,80	0,51	20,9	55,4	43,5	27,8	122,2	66,7
	SRTM 90	0,20	0,79	0,50	21,2	55,7	44,0	27,8	126,7	67,4
	TOPODATA	0,18	0,77	0,48	22,2	56,6	45,1	27,8	133,3	70,8
	ASTER	0,22	0,82	0,52	20,2	54,8	42,7	22,2	122,2	66,2
P ₂	Cartas	0,57	0,94	0,78	1,7	46,4	19,6	0,0	55,6	18,7
	SRTM 30	0,42	0,96	0,77	0,9	22,2	11,0	0,0	77,8	31,3
	SRTM 90	0,36	0,96	0,74	3,1	28,9	14,8	5,6	88,9	37,5
	TOPODATA	0,35	0,96	0,72	3,7	29,5	15,3	5,6	88,9	38,2
	ASTER	0,36	0,96	0,73	4,5	30,2	15,9	5,6	88,9	38,2
P ₃	Cartas	0,36	0,68	0,52	1,1	42,1	26,9	33,3	77,8	56,4
	SRTM 30	0,18	0,55	0,36	1,7	42,9	28,0	42,9	90,0	70,0
	SRTM 90	0,34	0,67	0,51	0,6	39,0	23,5	33,3	77,8	55,7
	TOPODATA	0,17	0,55	0,35	2,1	43,5	28,6	42,9	90,0	70,6
	ASTER	0,29	0,62	0,46	0,6	40,9	25,6	38,1	80,0	60,7
P ₄	Cartas	0,38	0,69	0,54	1,2	42,1	26,9	33,3	77,8	56,4
	SRTM 30	0,19	0,56	0,37	1,7	42,9	28,0	38,1	90,0	68,0
	SRTM 90	0,35	0,68	0,53	0,5	39,1	23,5	33,3	77,8	55,7
	TOPODATA	0,18	0,55	0,36	2,1	43,5	28,6	42,9	90,0	70,0
	ASTER	0,30	0,63	0,48	0,7	41,0	25,7	33,3	77,8	59,2

Com base nos valores de C_{NS} (Tabela 15), as combinações proposta/MDE que proporcionaram os melhores resultados foram a P_2 combinada com os MDEs Cartas ($C_{NS,MÉD} = 0,78$) e SRTM 30 ($C_{NS,MÉD} = 0,77$) enquanto que, os piores resultados foram obtidos P_3 combinada com o MDE TOPODATA ($C_{NS,MÉD} = 0,35$).

Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE Cartas ($C_{NS} = 0,21$ a $0,94$; $C_{NS,MÉD} = 0,59$) e os piores pelo MDE TOPODATA ($C_{NS} = 0,17$ a $0,96$; $C_{NS,MÉD} = 0,48$). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($C_{NS} = 0,35$ a $0,96$; $C_{NS,MÉD} = 0,75$) e os piores, pela P_3 ($C_{NS} = 0,17$ a $0,68$; $C_{NS,MÉD} = 0,44$). É possível perceber que os valores de C_{NS} variaram entre as fontes e entre as propostas. Para a P_2 , independente do MDE utilizado, os valores observados na Tabela 15 demonstram que a proposta permitiu estimar bem o comportamento dos hidrogramas, enquanto que as demais propostas tiveram desempenho inferior.

Após enquadrar os valores de C_{NS} obtidos para a BHAC de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), pôde-se observar que as classes com maior número de eventos enquadrados foram as “Muito bom” e “Insatisfatório”, enquanto que, a classe “Satisfatório” foi a que menos teve eventos enquadrados. Os MDEs Cartas e TOPODATA foram, respectivamente, os que apresentaram os maiores e menores números de eventos enquadrados nas classes “Muito bom”, “Bom” e “Satisfatório”. Consequentemente, o maior número de eventos enquadrados como “Insatisfatório” foi obtido pelo MDE TOPODATA, e o menor pelo MDE Cartas.

Entre as propostas, verificou-se que a P_2 e a P_3 foram, respectivamente, as que apresentaram os maiores e menores números de eventos enquadrados nas classes “Muito bom”. A P_2 foi a proposta com menos eventos enquadrados como “Insatisfatório” enquanto que as P_3 e P_4 foram as com maiores números de eventos enquadrados nesta classe. Com exceção da P_2 , para as demais propostas, as classes com maior número de eventos enquadrados foram as “Insatisfatório” e “Bom”, respectivamente, enquanto que, a classe “Muito bom” foi a que teve menos eventos enquadrados.

Com base nos valores obtidos para o ER_{Qp} , a combinação proposta/MDE que proporcionou os melhores resultados foi a P_2 combinada com os MDE SRTM 30 ($ER_{Qp,MÉD} = 11\%$) enquanto os piores foram obtidos pela P_1 combinada com o MDE TOPODATA ($ER_{Qp,MÉD} = 45,1\%$). Entre as fontes, os valores médios do ER_{Qp} variaram muito pouco ($\sim 4\%$), com o melhor desempenho obtido pelo MDE SRTM 90 ($ER_{Qp} = 0,5$ a $55,7\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 26,4\%$) e os piores, pelo MDE TOPODATA ($ER_{Qp} =$

2,1 a 56,6%; $ER_{Qp,MÉD} = 29,4\%$). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($ER_{Qp} = 0,9$ a 46,4%; $ER_{Qp,MÉD} = 15,3\%$), e os piores, pela P_1 ($ER_{Qp} = 20,2$ a 56,6%; $ER_{Qp,MÉD} = 43,6\%$).

Com base na classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007), grande maioria dos eventos estimados para a BHAC foi enquadrada na classe “Insatisfatório” e, a classe com menor número de eventos enquadrados foi a “Bom”. Os MDEs que apresentam o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” foram o SRTM 30 e o TOPODATA enquanto que o maior número de eventos enquadrados como “Insatisfatório” foi obtido pelos MDEs Cartas e TOPODATA. O MDE SRTM 90 apresentou o maior número de eventos enquadrados como “Bom”, e os MDEs Cartas e SRTM 30, como “Satisfatório”.

Em relação às propostas utilizadas, a P_1 teve quase todos os eventos estimados enquadrados como “Insatisfatório”, e nenhum enquadrado como “Muito bom” ou “Bom”. A P_3 e a P_4 tiveram todos os eventos enquadrados nas mesmas classes, com 50% deles enquadrados como “Insatisfatório”, 25% como “Satisfatório” e os outros 25% divididos nas demais classes. A P_2 foi a proposta com melhor desempenho de ER_{Qp} , com o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” e o menor número de eventos enquadrados como “Insatisfatório”.

Com base no ER_{tp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_2 combinada com os MDE Cartas ($ER_{tp,MÉD} = 18,7\%$) e os piores, a partir da P_1 combinada com o MDE TOPODATA ($ER_{tp,MÉD} = 70,8\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE Cartas ($ER_{tp} = 0$ a 122,2%; $ER_{tp,MÉD} = 49,5\%$) e os piores, pelo MDE TOPODATA ($ER_{tp} = 5,6$ a 133,3%; $ER_{tp,MÉD} = 62,4\%$). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($ER_{tp} = 0$ a 88,9%; $ER_{tp,MÉD} = 32,8\%$), e os piores, pela P_1 ($ER_{tp} = 22,2$ a 133,3%; $ER_{tp,MÉD} = 67,5\%$).

Apesar de terem sido observados alguns valores baixos para os erros na estimativa do tempo e da vazão de pico, as médias obtidas entre os eventos revelam que grande parte dos hidrogramas apresentou defasagem entre os picos estimados e observados, e vazões super ou subestimadas em relação às observadas.

Na Figura 40 estão apresentados alguns eventos estimados para a BHAC, com bom e mau desempenho, segundo as classificações utilizadas para o C_{NS} e o ER_{Qp} .

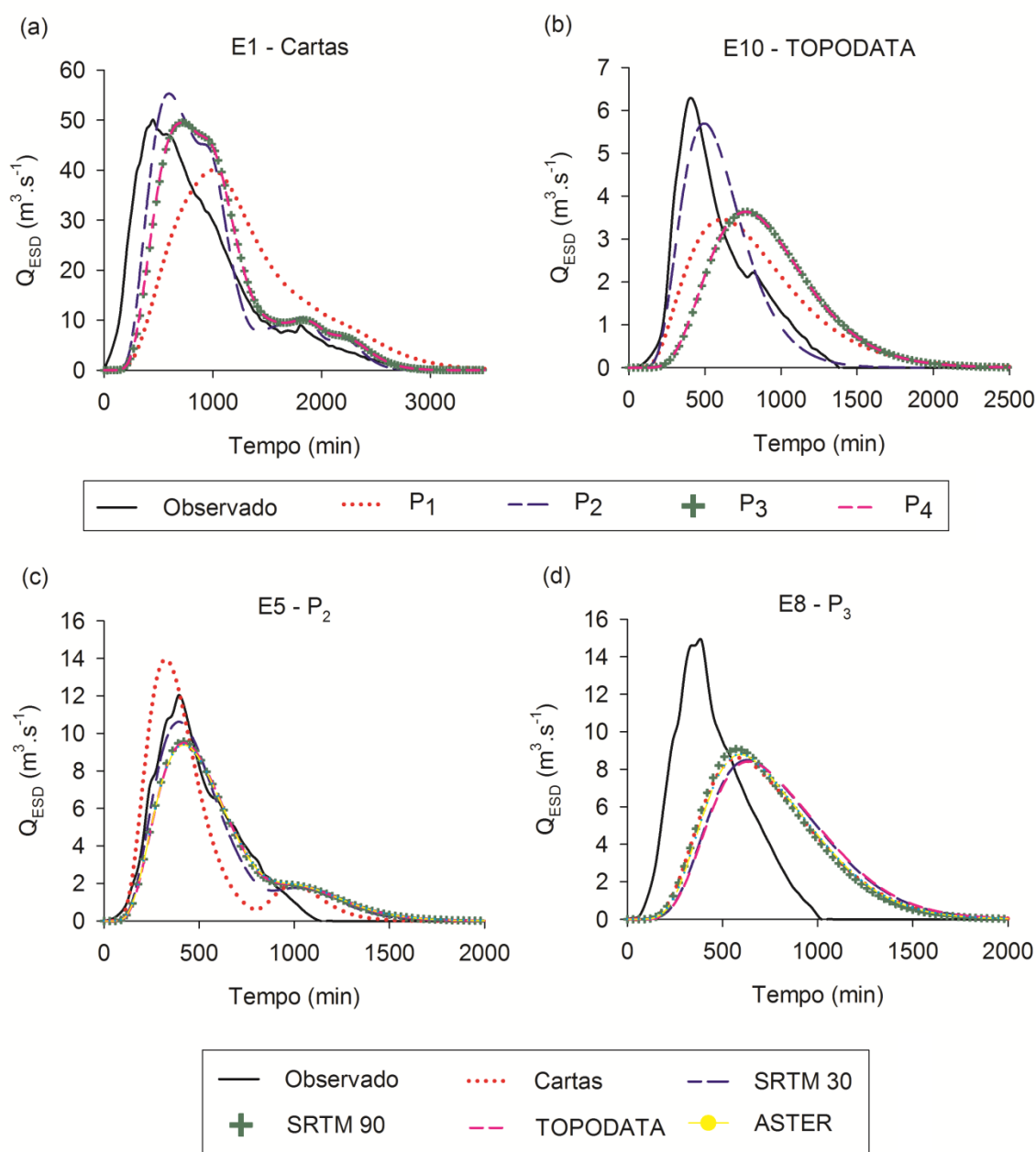


Figura 40 - Eventos da BHAC enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.

Adib *et al.* (2010) verificaram valores de C_{NS} muitos próximos aos obtidos neste trabalho para a BHAC, utilizando a P_4 na bacia do rio Kasilian, no Irã. Os autores observaram variações do C_{NS} de 0,3 a 0,9, com base em 13 eventos observados e média igual a 0,53. Entretanto, os valores médios obtidos para o $ER_{Qp,MÉD}$ (4,92%) e o $ER_{tp,MÉD}$ (4,37%) obtidos pelos autores foram muito diferenciados dos obtidos para a BHAC. Bhaskar *et al.* (1997) observaram resultados semelhantes aos obtidos para o ER_{Qp} e o ER_{tp} da BHAC, na bacia do rio

Jira, na Índia. Os autores estimaram hidrogramas resultantes de 12 eventos observados e obtiveram ER_{Qp} variando de 0,1 a 85,1%, com média igual a 36,2% e, ER_{tp} variando de 4,2 a 60%, com média igual a 30,7%. Apesar de apresentar área (615km²) superior à da BHAC e valor de n diferenciado (2,8), a bacia do rio Jira apresentou valores de k (152 a 234min) bem próximos aos da BHAC, o que pode justificar os resultados obtidos para o tempo e a vazão de pico dos hidrogramas.

Tabela 16 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHACN com base em 8 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entres os MDEs e as propostas utilizadas

Proposta/ MDE	C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)			
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	
P ₁	Cartas	0,55	0,96	0,83	0,5	44,9	17,0	0,0	31,3	14,6
	SRTM 30	0,55	0,95	0,83	0,4	44,9	16,9	5,6	31,3	16,4
	SRTM 90	0,54	0,95	0,82	1,2	45,6	17,4	0,0	31,3	16,1
	TOPODATA	0,52	0,94	0,81	2,9	46,7	18,6	0,0	37,5	17,0
	ASTER	0,56	0,96	0,84	0,8	44,0	16,4	0,0	31,3	14,7
P ₂	Cartas	-17,79	-0,41	-6,26	76,1	313,1	160,5	0,0	61,1	38,4
	SRTM 30	-19,09	-0,51	-6,75	79,3	330,6	168,8	33,3	61,1	43,7
	SRTM 90	-16,93	-0,32	-5,84	74,7	299,6	154,8	20,0	55,6	40,0
	TOPODATA	-18,51	-0,45	-6,49	78,8	318,2	164,8	20,0	61,1	40,7
	ASTER	-18,82	-0,48	-6,62	79,1	324,8	166,9	31,8	61,1	42,4
P ₃	Cartas	0,73	0,94	0,86	8,0	33,6	21,8	0,0	36,4	14,5
	SRTM 30	0,53	0,92	0,74	2,1	26,6	14,3	0,0	43,8	18,4
	SRTM 90	0,44	0,89	0,67	2,5	33,3	10,2	5,9	56,3	26,6
	TOPODATA	0,57	0,92	0,76	0,4	25,7	15,9	0,0	43,8	16,9
	ASTER	0,51	0,89	0,70	0,8	25,7	15,3	5,9	50,0	21,3
P ₄	Cartas	0,74	0,93	0,86	8,1	33,9	22,4	0,0	25,0	10,1
	SRTM 30	0,54	0,92	0,75	2,1	26,7	14,6	0,0	43,8	18,4
	SRTM 90	0,44	0,89	0,67	2,1	33,5	10,3	5,9	56,3	26,0
	TOPODATA	0,57	0,92	0,77	0,3	25,7	16,1	0,0	43,8	16,0
	ASTER	0,50	0,88	0,70	1,1	25,8	15,4	5,9	50,0	22,1

Com base nos valores de C_{NS} obtidos para a BHACN (Tabela 16), os melhores resultados foram obtidos a partir do MDE Cartas combinado com as propostas P_3 ($C_{NS,MÉD} = 0,78$) e P_4 ($C_{NS,MÉD} = 0,78$) e os piores a partir da P_2

combinada com o MDE SRTM 30 ($C_{NS,MÉD} = -6,75$). O melhor desempenho entre as propostas foi da P_1 ($C_{NS} = 0,52$ a $0,96$; $C_{NS,MÉD} = 0,83$), seguida das P_3 e P_4 ($C_{NS} = 0,44$ a $0,93$; $C_{NS,MÉD} = 0,75$). A P_2 ($C_{NS} = -19,09$ a $-0,32$; $C_{NS,MÉD} = -6,39$) apresentou comportamento totalmente discrepante ao ocorrido na BHAC, com valores de C_{NS} muito abaixo do considerável (“Insatisfatório”). Para análise de desempenho dos MDEs, foi necessária uma análise desconsiderando os valores obtidos em conjunto com a P_2 , pois estes ficaram muito discrepantes dos das demais propostas. Neste contexto, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE Cartas ($C_{NS} = 0,55$ a $0,96$; $C_{NS,MÉD} = 0,85$) e os piores pelo MDE SRTM 90 ($C_{NS} = 0,44$ a $0,95$; $C_{NS,MÉD} = 0,72$).

É possível perceber que os valores de C_{NS} variaram entre as fontes e entre as propostas. Para a P_1 , independente do MDE utilizado, os valores observados na Tabela 16 demonstram que a proposta permitiu estimar satisfatoriamente os hidrogramas, enquanto que a P_2 não possibilitou estimar de forma satisfatória nenhum dos hidrogramas.

Os valores de C_{NS} obtidos para a BHACN foram enquadrados de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), com muitos enquadramentos nas classes “Muito bom” e “Bom”, com os menores números de eventos enquadrados na classe “Satisfatório”. O MDE Cartas foi o que apresentou o maior número de eventos enquadrados na classe “Muito bom” (~75%), enquanto que o SRTM 90 obteve o menor número de eventos na classe “Muito bom” e o maior na classe “Insatisfatório”. Em relação as propostas utilizadas, verificou-se que a P_1 e a P_2 foram, respectivamente, as que apresentaram os maiores e menores números de eventos enquadrados nas classes “Muito bom”. A P_2 teve todos os eventos enquadrados como “Insatisfatório” e a P_1 não teve nenhum evento enquadrado nessa classe. A P_3 e a P_4 resultaram em hidrogramas enquadrados, em grande maioria, nas classes “Muito bom” e “Bom”, e poucos enquadrados como “Insatisfatório”.

Com base nos valores obtidos para o ER_{Qp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_3 combinada com os MDE SRTM 90 ($ER_{Qp,MÉD} = 10,2\%$) e os piores a partir da P_2 combinada com o MDE SRTM 30 ($ER_{Qp,MÉD} = 168,8\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE SRTM 90 ($ER_{Qp} = 1,2$ a $299,6\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 48,2\%$) e os piores pelo MDE Cartas ($ER_{Qp} = 0,5$ a $313,1\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 55,4\%$). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_3 ($ER_{Qp} = 0,4$ a $33,6\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 15,5\%$) e os piores pela P_2 ($ER_{Qp} = 74,7$ a $330,6\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 163,2\%$).

Com base na classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007) para o ER_{Qp} , grande maioria dos eventos estimados foi enquadrada na classe “Insatisfatório” e a classe com menor número de eventos enquadrados foi a “Bom”, assim como ocorreu na BHAC. Os MDEs que apresentam o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” foram o SRTM 90, enquanto que o maior número enquadrado como “Insatisfatório” foi obtido pelo MDE SRTM 30. Os MDEs Cartas e TOPODATA foram os que menos enquadraram eventos nas classes “Muito bom” e mais enquadraram na classe “Satisfatório”. Em relação às propostas utilizadas, a P_2 teve todos os eventos estimados enquadrados como “Insatisfatório” e a P_1 foi a que resultou em maior número de eventos enquadrados como “Muito bom”. A P_3 e a P_4 tiveram praticamente todos os eventos enquadrados nas mesmas classes, com mais enquadramentos nas classes “Muito bom” e “Satisfatório” (~65%) e menores na classe “Bom” (~12,5%).

Para o ER_{tp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_4 combinada com os MDE Cartas ($ER_{tp,MÉD} = 10,1\%$) e os piores a partir da P_2 combinada com o MDE SRTM 30 ($ER_{tp,MÉD} = 43,7\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE Cartas ($ER_{tp} = 0$ a $61,1\%$; $ER_{tp,MÉD} = 19,4\%$) e os piores pelo MDE SRTM 90 ($ER_{tp} = 0$ a $56,3\%$; $ER_{tp,MÉD} = 27,2\%$), e entre as propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_1 ($ER_{tp} = 0$ a $37,5\%$; $ER_{tp,MÉD} = 15,7\%$) e os piores pela P_2 ($ER_{tp} = 0$ a $61,1\%$; $ER_{tp,MÉD} = 41,0\%$).

A Figura 41 ilustra alguns hidrogramas de ESD estimados para a BHACN que obtiveram estatísticas com bom e mau desempenho de acordo com os valores de C_{NS} e ER_{Qp} obtidos.

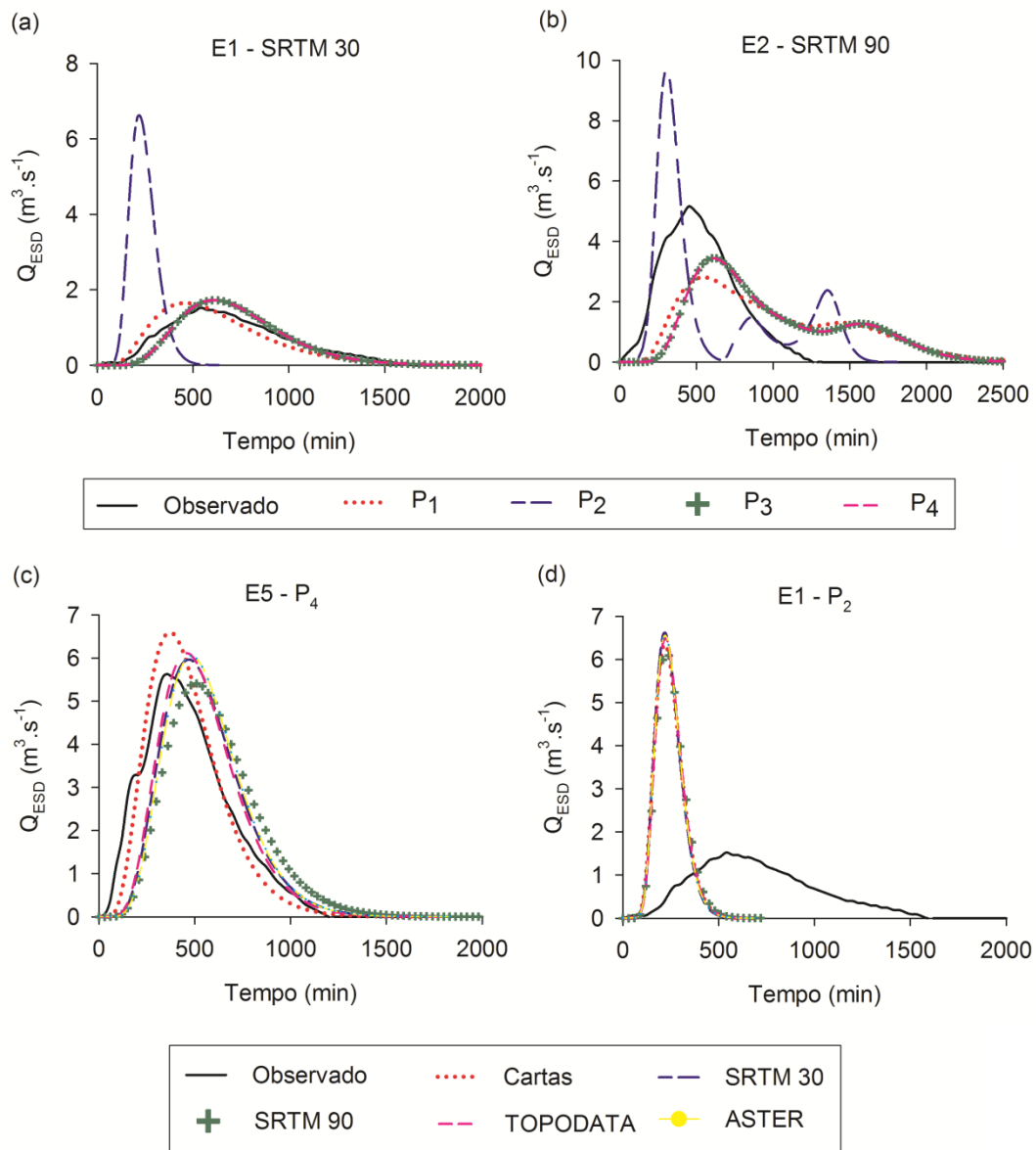


Figura 41 - Eventos da BHACN enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.

Para a BHACN, em geral, percebe-se um bom desempenho das propostas geomorfológicas, com exceção da P_2 , que não obteve bom desempenho devido ao seu valor mais elevado de S_r . Resultados semelhantes aos das estatísticas utilizadas foram obtidos por Ghumman *et al.* (2014) na bacia Kaha, no Paquistão. Analisando 15 eventos, utilizando a P_4 , os autores obtiveram valores de C_{NS} variando de 0,87 a 0,95, bem elevados, assim como os obtidos para a BHACN, para a mesma proposta. Os valores obtidos para ER_{Qp} (2 a 19%; $ER_{Qp,MÉD} = 10,1\%$) e para ER_{tp} (0 a 14%; $ER_{tp,MÉD} = 6,6\%$) também condizem com os obtidos para a BHACN, exaltando a utilização da proposta não só para a estimativa do

comportamento das vazões ao longo do tempo, mas também para a obtenção dos valores comumente utilizados em projetos, como o tempo e a vazão de pico.

Tabela 17 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHRJ com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entre os MDEs e as propostas utilizadas

Proposta/ MDE		C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)		
		Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd
P ₁	Cartas	0,39	0,91	0,62	8,1	48,5	25,5	8,1	48,5	25,5
	SRTM 30	0,35	0,87	0,57	12,2	51,0	28,9	12,2	51,0	28,9
	SRTM 90	0,35	0,88	0,57	11,5	50,7	28,4	11,5	50,7	28,4
	TOPODATA	0,25	0,77	0,46	21,0	56,0	35,8	21,0	56,0	35,8
	ASTER	0,34	0,86	0,55	13,5	51,7	29,9	13,5	51,7	29,9
P ₂	Cartas	0,46	0,89	0,64	17,7	54,2	33,3	17,7	54,2	33,3
	SRTM 30	0,48	0,92	0,67	12,5	51,2	29,2	12,5	51,2	29,2
	SRTM 90	0,61	0,97	0,81	3,1	37,1	15,2	3,1	37,1	15,2
	TOPODATA	0,49	0,93	0,68	11,0	50,4	28,0	11,0	50,4	28,0
	ASTER	0,61	0,96	0,81	0,4	32,5	15,3	0,4	32,5	15,3
P ₃	Cartas	-20,15	-0,97	-7,92	117,6	499,5	248,9	117,6	499,5	248,9
	SRTM 30	-13,20	0,26	-3,85	72,4	326,0	164,3	72,4	326,0	164,3
	SRTM 90	-21,86	-1,25	-8,72	119,5	500,2	263,3	119,5	500,2	263,3
	TOPODATA	-17,68	-0,58	-6,59	104,6	458,3	220,0	104,6	458,3	220,0
	ASTER	-12,96	0,24	-3,83	73,5	311,7	163,5	73,5	311,7	163,5
P ₄	Cartas	-20,11	-0,95	-7,78	117,6	501,3	247,6	117,6	501,3	247,6
	SRTM 30	-13,21	0,26	-3,84	72,1	326,7	164,1	72,1	326,7	164,1
	SRTM 90	-21,85	-1,22	-8,68	120,0	504,9	263,1	120,0	504,9	263,1
	TOPODATA	-17,64	-0,57	-6,59	104,2	457,5	219,8	104,2	457,5	219,8
	ASTER	-12,96	0,25	-3,83	73,5	313,3	163,7	73,5	313,3	163,7

Com base nos valores de C_{NS} obtidos para a BHRJ (Tabela 17), pôde-se observar que os valores de C_{NS} variaram entre as fontes e entre as propostas. E que os melhores resultados foram obtidos a partir da combinação da P_2 com os MDEs SRTM 90 e ASTER ($C_{NS,MÉD} = 0,81$) e os piores, da P_3 e P_4 com o MDE SRTM 90 ($C_{NS,MÉD} = -8,7$).

Assim como foi observado para a BHAC, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($C_{NS} = 0,46$ a $0,96$; $C_{NS,MÉD} = 0,72$), seguida pela P_1 ($C_{NS} = 0,25$ a $0,91$;

$C_{NS,MÉD} = 0,55$). Para a P_3 e P_4 , independente do MDE utilizado, todos os eventos apresentaram valores de C_{NS} muito abaixo do considerado “Insatisfatório” e, por isso, para análise de desempenho dos MDEs, foi necessário desconsiderar os valores obtidos em conjunto com estas propostas. Neste contexto, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE SRTM 90 ($C_{NS} = 0,35$ a $0,97$; $C_{NS,MÉD} = 0,69$) e os piores, pelo MDE TOPODATA ($C_{NS} = 0,25$ a $0,93$; $C_{NS,MÉD} = 0,57$).

De acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), os valores de C_{NS} obtidos para a BHRJ foram enquadrados como “Insatisfatório” ou “Muito bom”, com o menor número de eventos sendo enquadrados como “Satisfatório”. Os MDEs SRTM 90 e ASTER foram os que apresentam o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” e os menores como “Insatisfatório”. O MDE TOPODATA resultou em maior número de eventos enquadrados como “Insatisfatório” e o menor como “Muito bom”. As classes “Bom” e “Satisfatório” foram as com menor número de eventos enquadrados (~12%), independente do MDE utilizado. Com base nas propostas, verificou-se que a P_3 e a P_4 enquadraram todos os eventos estimados como “Insatisfatório”. A P_2 classificou grande parte dos eventos como “Muito bom” (~70%) e foi a proposta com menor número de eventos enquadrados como “Insatisfatório”. A P_1 apresentou resultados razoáveis, com quase metade dos eventos enquadrados como “Insatisfatório” e, os demais enquadrados entre “Muito bom” e “Bom”.

Para o ER_{Qp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da combinação da P_2 com o MDE SRTM 90 ($ER_{Qp,MÉD} = 15,2\%$) e os piores, da P_3 com o MDE SRTM 90 ($ER_{Qp,MÉD} = 247,6\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE SRTM 90 ($ER_{Qp} = 3,1$ a $504,9\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 21,8\%$) e os piores pelo MDE TOPODATA ($ER_{Qp} = 11,0$ a $458,3\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 31,9\%$)., enquanto que, entre as propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($ER_{Qp} = 0,4$ a $54,2\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 24,2\%$) e os piores pela P_3 ($ER_{Qp} = 72,4$ a $500,2\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 212,0\%$).

Com base na classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007), a grande maioria dos eventos estimados foi enquadrada na classe “Insatisfatório” e a classe com menor número de eventos enquadrados foi a “Muito bom”. Os MDEs que apresentaram o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” foram o SRTM 90 enquanto que, o maior número enquadrado como “Insatisfatório”, foi obtido pelo MDE TOPODATA. Entre as propostas, foi possível observar que a P_3 e a P_4 tiveram todos os eventos estimados enquadrados como “Insatisfatório”. A P_2 foi a

proposta que resultou em maior número de eventos enquadrados como “Muito bom” e menor como “Insatisfatório”, enquanto a P_1 enquadrrou grande parte dos eventos como “Insatisfatório” (~55%) e “Satisfatório” (~28%) .

Os valores de ER_{tp} da BHRJ (Tabela 17) indicam que os melhores resultados foram obtidos a partir da P_2 combinada com os MDE ASTER ($ER_{tp,MÉD} = 21,1\%$) e os piores a partir da P_1 combinada com o MDE TOPODATA ($ER_{tp,MÉD} = 58,6\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE ASTER ($ER_{tp} = 0$ a $90,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 35,3\%$) e os piores pelo MDE TOPODATA ($ER_{tp} = 0$ a $100,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 43,1\%$). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($ER_{tp} = 0,4$ a $54,2\%$; $ER_{tp,MÉD} = 24,2\%$) e os piores pelas P_3 e P_4 ($ER_{tp} = 72,4$ a $500,2\%$; $ER_{tp,MÉD} = 212,0\%$). A Figura 42 ilustra alguns hidrogramas de ESD estimados para a BHRJ com bom e mau desempenho segundo as estatísticas utilizadas.

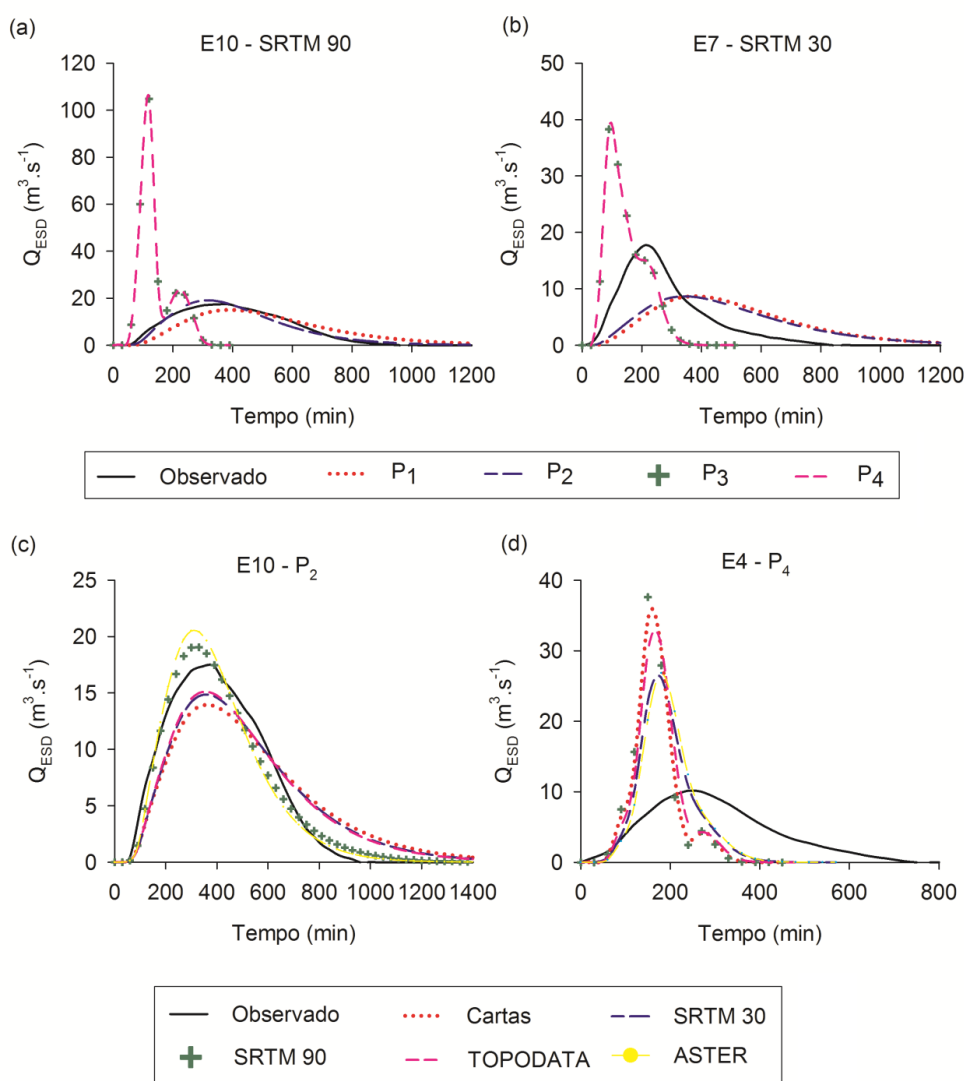


Figura 42 - Eventos da BHRJ enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.

A BHRJ apresentou comportamento das propostas P_1 e P_2 semelhante ao da BHAC, o que pode ter ocorrido devido às semelhanças de algumas características geomorfológicas extraídas das bacias, como a declividades S_b e S_r . As diferenças observadas para as propostas P_3 e P_4 podem ser resultantes dos valores distintos de L_Q e v obtidos para as duas bacias.

Os resultados observados para a BHRJ se assemelham aos obtidos por Zakizadeh; Malekinezhad (2015), na bacia iraniana Manshad. Para a P_1 , os autores obtiveram C_{NS} variando de -0,98 a 0,65, bem diferenciados da BHRJ, enquanto que, os valores de ER_{Qp} (6,95 a 62,97%; $ER_{tp,MÉD} = 39,57\%$) e ER_{tp} (15 a 44,29%; $ER_{tp,MÉD} = 37,14\%$) foram mais próximos dos obtidos para a mesma proposta. Para a P_3 , os valores de k da bacia estudada pelos autores ficou muito próximo dos obtidos para a BHRJ, com valores insatisfatórios de C_{NS} (-5,15 a -0,87), e valores de ER_{Qp} (2,44 a 134,46%; $ER_{Qp,MÉD} = 42,35\%$) e de ER_{tp} (31,25 a 85,71%; $ER_{tp,MÉD} = 68,31\%$) bem elevados, assim como os observados para a BHRJ.

Tabela 18 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHRL com base em 10 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entre os MDEs e as propostas utilizadas

Propostas utilizadas										
Proposta/ MDE	C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)			
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	
P ₁	Cartas	-0,29	0,71	0,32	7,6	54,1	32,4	25,0	250,0	81,3
	SRTM 30	-0,29	0,73	0,33	6,9	53,5	31,8	25,0	250,0	78,8
	SRTM 90	-0,29	0,72	0,33	7,3	53,7	32,2	25,0	250,0	78,8
	TOPODATA	-0,29	0,71	0,32	8,7	54,5	33,1	25,0	250,0	81,3
	ASTER	-0,29	0,72	0,32	6,9	53,6	31,9	25,0	250,0	81,3
P ₂	Cartas	-8,05	0,28	-1,82	48,3	251,2	115,1	0,0	100,0	19,6
	SRTM 30	-7,40	0,33	-1,58	47,7	249,1	118,8	0,0	100,0	13,1
	SRTM 90	-7,58	0,31	-1,62	47,4	248,8	115,9	0,0	100,0	15,1
	TOPODATA	-4,20	0,66	-0,49	19,1	165,5	78,9	0,0	150,0	27,4
	ASTER	-9,04	0,17	-2,34	40,2	213,9	111,4	0,0	100,0	31,0
P ₃	Cartas	-0,56	0,70	0,18	2,5	79,3	17,6	0,0	200,0	63,0
	SRTM 30	-0,54	0,71	0,19	1,9	80,3	17,5	0,0	200,0	60,5
	SRTM 90	-0,62	0,58	0,08	0,9	75,6	18,1	20,0	200,0	71,8
	TOPODATA	-0,73	0,51	-0,02	0,3	80,0	17,9	20,0	200,0	71,8
	ASTER	-0,56	0,59	0,14	3,3	66,1	20,0	20,0	200,0	71,8
P ₄	Cartas	-0,54	0,71	0,20	1,9	80,3	17,6	0,0	200,0	57,1
	SRTM 30	-0,53	0,72	0,21	1,7	81,1	17,5	0,0	200,0	57,1
	SRTM 90	-0,60	0,60	0,10	0,6	75,2	18,0	20,0	200,0	71,8
	TOPODATA	-0,68	0,52	0,00	0,3	79,7	17,9	20,0	200,0	71,8
	ASTER	-0,54	0,61	0,16	3,4	65,3	20,0	20,0	200,0	71,8

Para a BHRL, com base nos valores de C_{NS} apresentados na Tabela 18, os melhores resultados foram obtidos a partir da combinação da P₁ com o MDE SRTM 90 (C_{NS,MÉD} = 0,33) e os piores, a partir da P₂ com o MDE ASTER (C_{NS,MÉD} = -2,34). A proposta P₂ apresentou valores de C_{NS}, ER_{Qp} e ER_{tp} inadequados para os eventos estimados, sendo necessária a exclusão destes valores para algumas análises comparativas, como a do C_{NS} em função dos MDEs utilizados.

Excluindo os valores de C_{NS} observados para as fontes combinadas com a P₂, percebe-se que o melhor desempenho foi obtido pelo SRTM 30 (C_{NS} = -0,54 a 0,73; C_{NS,MÉD} = 0,25) e o pior pelo TOPODATA (C_{NS} = -0,73 a 0,71; C_{NS,MÉD} = 0,10). Em relação às propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P₁ (C_{NS} = -0,29 a 0,73;

$C_{NS,MÉD} = 0,32$), e o pior pela P_2 ($C_{NS} = -9,04$ a $0,66$; $C_{NS,MÉD} = -1,57$). Para a P_3 e P_4 , os valores de C_{NS} foram muito similares, variando de $-0,73$ a $0,72$, com valores médios iguais a $0,12$.

É possível perceber que os valores de C_{NS} variaram entre as fontes e entre as propostas e que, apesar de os valores máximos obtidos entre os eventos revelarem que alguns hidrogramas ficaram bem ajustados, os valores médios demonstram que estes foram uma exceção, prevalecendo os eventos com mau desempenho.

Enquadrando os valores de C_{NS} obtidos para os eventos estimados da BHRL, de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), pôde-se perceber que a grande maioria foi classificada com desempenho “Insatisfatório” e as classes com menor número de eventos enquadrados foram a “Satisfatório” e “Muito bom”. Com relação às fontes, todos os MDEs tiveram cerca de 75% dos eventos enquadrados como “Insatisfatório” e os MDEs SRTM 30 e Cartas foram os que conseguiram enquadrar mais eventos na classe “Muito bom” (~13%). Com base nas propostas utilizadas, verificou-se que a P_2 enquadrou praticamente todos os eventos como “Insatisfatório”, enquanto que a P_1 foi a proposta com menor número de eventos enquadrados. A P_3 e a P_4 apresentaram resultados semelhantes, com grande parte dos eventos enquadrados como “Insatisfatório” (~80%) e uma minoria como “Satisfatório” (~6%).

Com base nos valores obtidos para o ER_{Qp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_3 e P_4 combinadas com os MDE SRTM 30 ($ER_{Qp,MÉD} = 17,5\%$) e os piores a partir da P_2 combinada com o MDE SRTM 30 ($ER_{Qp,MÉD} = 118,8\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE TOPODATA ($ER_{Qp} = 0,3$ a $165,5\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 37,0\%$) e os piores pelo MDE SRTM 30 ($ER_{Qp} = 1,7$ a $249,1\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 46,4\%$), enquanto que, entre as propostas, o melhor desempenho foi obtido pelas P_3 e P_4 ($ER_{Qp} = 0,3$ a $81,0\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 18,2\%$) e os piores pela P_2 ($ER_{Qp} = 19,1$ a $251,2\%$; $ER_{Qp,MÉD} = 108,0\%$).

Com base na classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007), metade dos eventos estimados foi enquadrada na classe “Insatisfatório” e a classe com menor número de eventos enquadrados foi “Bom”. Os MDEs Cartas e SRTM 30 apresentaram o maior número de eventos enquadrados como “Muito bom”, enquanto que o número de eventos enquadrados como “Insatisfatório” foi praticamente o mesmo para todas as fontes (~50%). Entre as propostas, a P_2 enquadrou praticamente todos os eventos estimados como “Insatisfatório”, enquanto

a P_3 e a P_4 foram as que menos enquadraram eventos nessa classe e enquadraram metade dos eventos como “Muito bom”. A P_1 enquadrrou 20% dos eventos nas classes “Muito bom” e “Bom” e os demais na classe “Insatisfatório”.

Para o ER_{tp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_2 combinada com os MDE SRTM 30 ($ER_{tp,MÉD} = 13,1\%$) e os piores, a partir da P_1 combinada com os MDEs Cartas, TOPODATA e ASTER ($ER_{tp,MÉD} = 81,3\%$). Entre as fontes, o melhor desempenho foi obtido pelo MDE SRTM 30 ($ER_{tp} = 0$ a $250,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 52,4\%$) e o pior pelo MDE ASTER ($ER_{tp} = 0$ a $250,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 64,0\%$), enquanto que entre as propostas, o melhor desempenho foi obtido pela P_2 ($ER_{tp} = 0$ a $150,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 21,3\%$) e o pior pela P_1 ($ER_{tp} = 25,0$ a $250,0\%$; $ER_{tp,MÉD} = 80,3\%$). Na Figura 43 estão ilustrados eventos enquadrados com bom e mau desempenho para a BHRL, de acordo com as estatísticas utilizadas.

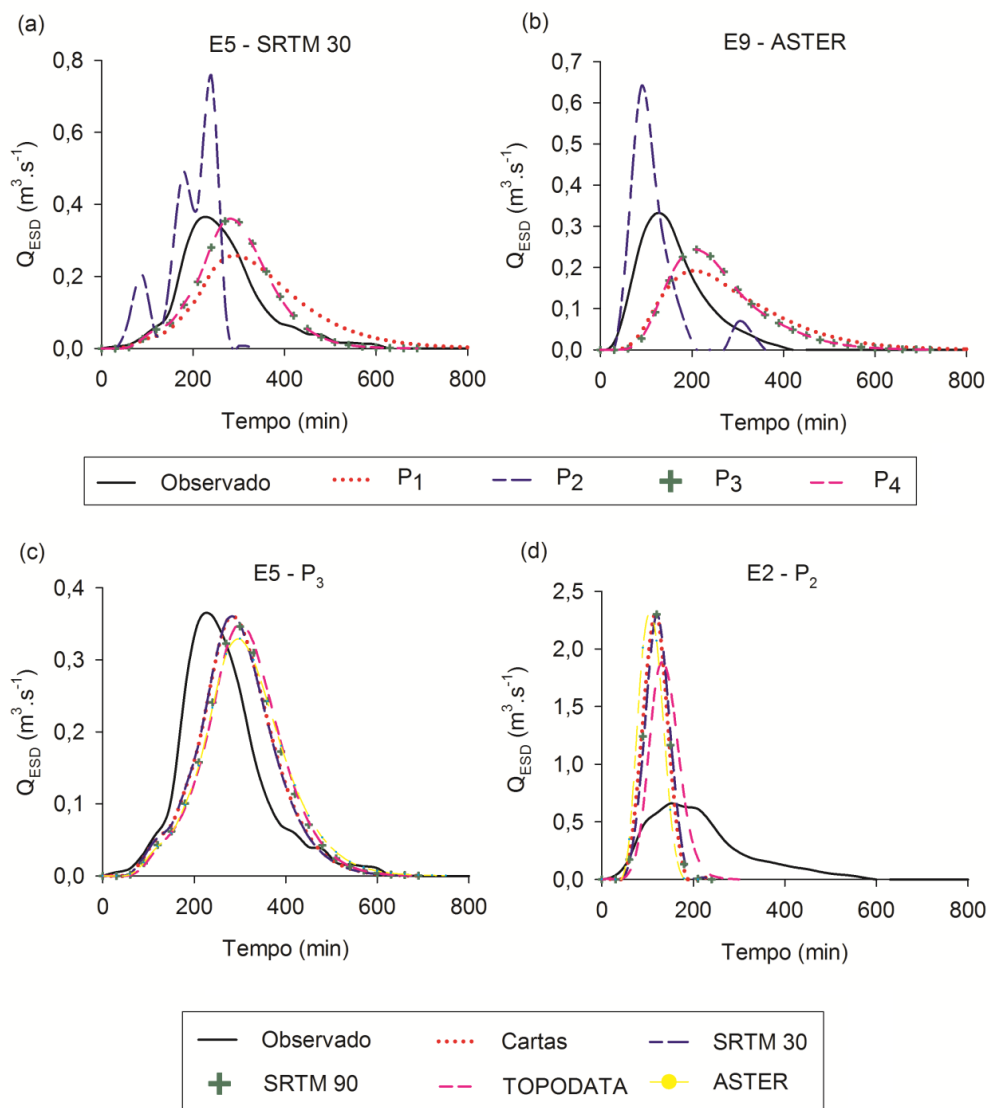


Figura 43 - Eventos da BHRL enquadrados com bom (a) e com mau desempenho (b), variando as propostas geomorfológicas, e com bom (c) e com mau desempenho (d), variando os MDEs.

É importante ressaltar que, apesar de apresentar valores insatisfatórios de C_{NS} e ER_{Qp} , a P_2 foi a que obteve os menores valores para o ER_{tp} , sugerindo o uso combinado das propostas para a modelagem dos hidrogramas de ESD nesta bacia. Os bons resultados de ER_{Qp} e insatisfatórios de C_{NS} , obtidos pela P_3 e P_4 indicam que a estimativa da vazão de pico foi realizada de forma aproximada pelas propostas, mas há uma defasagem de tempo entre os picos observados e simulados. Sahoo *et al.* (2006) também observaram esse comportamento em alguns eventos na bacia Ajay, na Índia, utilizando a P_4 para modelagem do ESD.

Tabela 19 - Valores mínimos, máximos e médios observados para as estatísticas obtidas para a BHSE com base em 5 eventos chuva-vazão, considerando as diferentes combinações entre os MDEs e as propostas utilizadas

ES e as propostas utilizadas										
Proposta/ MDE		C _{NS}			ER _{Qp} (%)			ER _{tp} (%)		
		Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd
P ₁	Cartas	-0,17	0,01	-0,10	88,6	92,9	90,7	340,0	1150,0	646,3
	SRTM 30	-0,17	0,01	-0,10	88,6	93,0	90,7	340,0	1150,0	646,3
	SRTM 90	-0,17	0,01	-0,10	89,0	93,2	91,0	360,0	1200,0	670,3
	TOPODATA	-0,17	0,01	-0,10	89,0	93,2	91,1	380,0	1200,0	681,0
	ASTER	-0,16	0,01	-0,09	89,5	93,5	91,4	360,0	1150,0	650,3
	Lev. Topográfico	-0,19	0,01	-0,11	87,1	92,0	89,4	300,0	1050,0	578,3
P ₂	Cartas	-0,87	0,51	-0,11	28,2	69,7	55,7	20,0	500,0	182,3
	SRTM 30	-0,95	0,59	-0,10	22,2	69,0	53,4	0,0	500,0	213,3
	SRTM 90	-0,89	0,49	-0,14	26,3	69,8	55,1	20,0	500,0	182,3
	TOPODATA	-0,90	0,45	-0,16	27,6	69,6	55,3	20,0	500,0	182,3
	ASTER	-0,72	0,35	-0,14	40,1	72,4	61,5	20,0	500,0	189,0
	Lev. Topográfico	-0,94	0,65	-0,04	21,5	69,1	52,5	0,0	450,0	198,3
P ₃	Cartas	-1,74	0,34	-0,16	40,4	57,6	46,3	0,0	400,0	148,0
	SRTM 30	-2,19	0,30	-0,29	38,6	56,4	46,0	60,0	400,0	172,0
	SRTM 90	-1,93	0,33	-0,20	40,6	57,5	46,5	0,0	400,0	148,0
	TOPODATA	-1,70	0,57	-0,13	11,6	59,7	41,0	33,3	400,0	164,7
	ASTER	-1,31	0,57	-0,27	8,4	61,2	43,7	20,0	500,0	229,0
	Lev. Topográfico	-2,12	0,35	-0,26	37,6	54,6	45,2	0,0	400,0	152,0
P ₄	Cartas	-2,37	0,30	-0,33	37,6	56,2	45,6	50,0	400,0	137,0
	SRTM 30	-2,38	0,30	-0,33	37,7	56,6	45,8	50,0	400,0	137,0
	SRTM 90	-2,39	0,29	-0,34	37,7	56,8	45,9	50,0	400,0	137,0
	TOPODATA	-2,45	0,29	-0,35	36,8	59,0	45,6	50,0	400,0	137,0
	ASTER	-2,13	0,29	-0,28	42,2	57,7	47,0	50,0	400,0	137,0
	Lev. Topográfico	-2,32	0,31	-0,32	37,0	54,5	44,7	0,0	400,0	117,0

Com base nos valores de C_{NS} obtidos para a BHSE, apresentados na Tabela 19, observou-se que somente um dos cinco eventos estimados teve algumas combinações proposta/MDE enquadradas com desempenho entre “Bom” e “Satisfatório”, segundo a classificação de Moriasi *et al.* (2007). A P_2 combinada com os MDEs Cartas, SRTM 30 e Lev. Topográfico, e a P_3 combinada com os MDEs TOPODATA e ASTER foram as combinações que permitiram os melhores desempenhos, enquanto que, os demais hidrogramas estimados foram enquadrados como “Insatisfatório”. Convenientemente, o evento que teve comportamento distinto é o que apresenta a maior $Q_{ESD, MÁX}$, o que justificaria a adequabilidade das propostas, que foram desenvolvidas para a modelagem de cheias em bacias hidrográficas.

Com base nos valores obtidos para o ER_{Qp} , os melhores resultados foram obtidos a partir da P_4 ($ER_{Qp, MÉD} = 44,8\%$) e da P_3 ($ER_{Qp, MÉD} = 45,8\%$). Em geral, os menores erros foram obtidos combinando estas propostas com os MDE Lev. Topográfico e os maiores erros com o MDE ASTER. Com base na classificação proposta por Van Liew *et al.* (2007), somente um evento não foi enquadrado como insatisfatório. Para este evento, a combinação da P_2 com os MDEs SRTM 30 e Lev. Topográfico possibilitou o enquadramento do ER_{Qp} na classe “Satisfatório”, enquanto que as combinações P_3 e MDE TOPODATA e P_3 e MDE ASTER enquadraram nas classes “Bom” e “Muito bom”, respectivamente.

Em relação ao ER_{tp} , todos os resultados obtidos, independente do MDE e da proposta utilizada, erraram o tempo de pico em mais de 150%. O MDE do Lev. Topográfico foi o que apresentou os menores valores médios (261,4%), enquanto os maiores foram obtidos pelo MDE ASTER (301,3%). A P_1 foi a proposta com pior desempenho ($ER_{tp, MÉD} = 645,4\%$), enquanto a P_4 foi a proposta com valor de $ER_{tp, MÉD}$ menor, igual a 133,7%. Os valores mínimos observados para a P_2 e a P_3 indicam que, para algum dos eventos, o tempo de pico foi bem estimado. Analisando os eventos, verificou-se que, para estas propostas, quanto menor a $Q_{ESD, MÁX}$, maior o ER_{tp} , e vice-versa.

É importante ressaltar que mais eventos devem ser estudados para esta bacia, para verificar com maior acuidade os resultados obtidos. Além disso, eventos de maiores magnitudes devem ser estimados, visto que até o presente estudo, a curva-chave da bacia encontra-se bastante limitada. Na literatura, não foram encontrados estudos que envolvam bacias de tal magnitude. Além disso, como já

mencionado anteriormente, as propostas geomorfológicas utilizadas não foram desenvolvidas utilizando dados provenientes de bacias hidrográficas tão pequenas, o que torna os dados obtidos alarmantes quanto suas aplicações para dimensionamento de projetos locais.

Analisando os resultados obtidos entre as bacias estudadas, de forma geral, é possível perceber um desempenho melhor da P_2 para as bacias com menor declividade do curso d'água principal, como a BHAC e BHRJ, enquanto que, para bacias com S_r mais acidentadas, como a BHACN e a BHRL, esta proposta tem desempenho inferior às demais.

Não foi possível observar uma combinação de proposta-MDE que descrevesse melhor ou pior o conjunto de bacias analisadas, nem levando em consideração a declividade, nem o tamanho da área da bacia. Apenas para as BHAC e BHRJ, os comportamentos do C_{NS} e do ER_{Qp} foram similares, com a P_2 combinada com o MDE Cartas obtendo os melhores valores para C_{NS} e a P_2 combinada com os MDEs SRTM gerando os menores valores de ER_{Qp} . Alguns hidrogramas estimados tiveram bons enquadramentos para ER_{Qp} e baixos valores de C_{NS} , o que se deve, provavelmente, à defasagem de tempo entre os hidrogramas estimado e observado.

Os diferentes valores obtidos para as estatísticas utilizadas (C_{NS} , ER_{Qp} e ER_{tp}), sobressaindo-se umas sobre as outras para uma mesma bacia, indicam que o uso combinado dos modelos pode ser um caminho para análise do comportamento das vazões ao longo do tempo, com a análise separada das estimativas de Q_p e t_p , fornecendo um conhecimento mais abrangente da resposta hidrológica das bacias, principalmente das desprovidas de monitoramento hidrológico.

4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

- A principal hipótese do estudo, de que as diferentes formulações geomorfológicas do HUI de Nash resultam, para um mesmo evento de chuva, em hidrogramas distintos, foi confirmada.
- Os parâmetros geomorfológicos avaliados são sensíveis à fonte e à escala de informações do relevo, desta forma resultando em variações para os parâmetros n e k do HUIN, obtidos a partir de propostas geomorfológicas.
- Não é possível observar uma combinação de proposta-MDE que descreva melhor ou pior o conjunto de bacias analisadas, nem levando em consideração a declividade, nem o tamanho da área da bacia.
- A P_1 é a proposta menos indicada para utilização nas bacias hidrográficas estudadas, pois em nenhuma delas obteve os melhores resultados para C_{NS} e ER_{Qp} .
- Para a BHAC e a BHRJ, a P_2 é a proposta mais indicada, principalmente se combinadas com MDEs Cartas e SRTM 30.
- Para a BHACN e a BHRL, a P_3 e a P_4 são as propostas mais indicadas, uma vez que os resultados obtidos foram os melhores e não apresentaram diferenças substanciais entre si.
- Na BHSE, a área de drenagem, muito pequena frente às demais utilizadas, pode ter sido uma condicionante para a boa estimativa dos hidrogramas de cheia. Os parâmetros associados às propostas geomorfológicas utilizadas diferiram muito para essa bacia e, conseqüentemente, os hidrogramas obtidos. Seria indicado um estudo mais aprofundado nesta bacia e, se possível, a geração de parâmetros específicos do HUIN para o local.
- Mais estudos nesse âmbito devem ser realizados nas bacias, utilizando mais eventos e de maiores magnitudes, visto que para algumas bacias utilizadas, como a BHACN e BHSE, as curvas-chave ainda são limitadas.
- Apesar da P_1 e da P_2 serem de mais fácil aplicação em virtude dos parâmetros e de não dependerem de informação da velocidade, apresentaram bons

resultados em relação às demais, as quais são baseadas no estudo de Rodriguez-Iturbe; Valdes (1979).

- Um maior número de bacias hidrográficas com diferentes características fisiográficas, devem ser utilizadas para verificar se o comportamento dos modelos e dos MDEs utilizados permanecerão os mesmos ou apresentarão algumas limitações. A utilização de algumas formulações geomorfológicas como a P_1 e a P_2 , nunca antes aplicadas para as regiões em análise, e os bons resultados obtidos, podem servir de subsídio para a composição de sistemas simplificados de monitoramento e alerta de desastres naturais por inundações.

Considerações Finais

A análise realizada neste estudo, contemplando diferentes propostas geomorfológicas para o HUIN, combinadas com diferentes fontes e escalas de informações do relevo apresenta uma importância significativa no contexto da engenharia hidrológica, principalmente no âmbito da modelagem hidrológica em pequenas bacias, inclusive nas que apresentam carência de dados de monitoramento hidrológico. Isso se deve ao fato de que, especialmente no Brasil, os projetistas têm empregado formulações empíricas e simplificadas obtidas em estudos realizados para bacias específicas, sem verificar previamente a acurácia das estimativas, o que pode vir a acarretar em problemas de dimensionamento hidrológico e hidráulico, bem como na gestão dos recursos hídricos.

Com exceção da BHSE, para as demais, foram obtidas combinação de proposta/MDE com bom desempenho, tanto na estimativa do comportamento do hidrograma, como na estimativa dos valores de tempo e vazão de pico. A análise das estatísticas obtidas permite observar combinações de proposta/MDE que melhor estimam o comportamento do hidrograma, e outras que melhor estimam o tempo e a vazão de pico. Neste sentido, a utilização destas propostas com bom desempenho, de forma combinada, pode ser de grande valia para a composição de sistemas simplificados de previsão e alertas a enchentes.

Além disso, os bons resultados obtidos utilizando o MDE SRTM 30m permite aos projetistas uma reflexão acerca da utilização das cartas topográficas, pois estas ainda necessitam de um processamento anterior à obtenção dos MDEs, enquanto que o produto SRTM já é distribuído no formato matricial.

A partir da modelagem dos hidrogramas de cheias, além de ter sido verificado o impacto das diferenças de características fisiográficas entre as bacias, especialmente aquelas vinculadas ao solo e ao uso e ocupação do solo, também foi constatado que a diferença do padrão de chuvas entre as duas regiões exerceu influência na modelagem. Pode-se observar que, em geral, eventos que apresentam precipitação de curta duração são estimados de forma satisfatória, enquanto que, eventos com maiores durações e menores intensidades apresentam estimativa insatisfatória.

A contribuição deste estudo no âmbito da engenharia hidrológica é de grande importância, haja vista que o mesmo faz uma análise robusta da influência de diferentes fontes e escalas de informações do relevo e de diferentes propostas geomorfológicas para o modelo do HUIN, em bacias de características distintas e de magnitudes com relatos escassos na literatura.

Ainda que os resultados deste estudo tenham sido promissores, indica-se que estudos futuros nesta temática sejam desenvolvidos no intuito de:

- analisar a influência da densidade de postos pluviográficos sobre a estimativa de cheia nestas bacias;
- avaliar a utilização das propostas geomorfológicas para o HUIN considerando a discretização espacial em sub-bacias hidrográficas;
- investigar a influência do padrão de chuva das bacias localizadas no RS na estimativa de cheias, analisando um maior número de eventos e de diferentes magnitudes;
- obter equações empíricas para os parâmetros do HUIN destas bacias, considerando diferentes parâmetros geomorfológicos e condições fisiográficas locais.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, M.; TSU, H.; HULLEY, G.; IWAO, K.; PIERI, D.; CUDAHY, T.; JEFFREY KARGEL, J. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 38, p. 292-301, 2015.

ADIB, A.; SALARIJAZI, M.; VAGHEFI, M.; SHOOSHTARI, M. M.; AKHONDALI, A. M. Comparison between GCIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 34, p. 91 – 103, 2010.

AGIRRE, U.; GOÑI, M.; LÓPEZ, J. J.; GIMENA, F. N. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Catena**, v. 64, p. 321-332, 2005.

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.

AHMAD, M. M.; GHUMMAN, A. R.; AHMAD, S.; HASHMI, H. N. Estimation of a unique pair of Nash model parameters: An optimization approach. **Water Resources Management**, v. 24, n. 12, p. 2971–2989, 2010.

ALEMNGUS, A.; MATHUR, B. S. Geomorphologic Instantaneous Unit hydrographs for rivers in Eritrea (East Africa). **Journal of Indian Water Resources Society**, v. 34, n. 1, p. 1-14, 2014.

ALEXANDRE, A. M. B.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B. Incorporação do Impacto da Rede de Reservatórios Superficiais Artificiais de Caráter Intranual na Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 67-82, 2013.

ALTAF, F.; MERAJ, G.; ROMSHOO, S. A. Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Geography Journal**, v. 2013, Article ID 178021, p.1-14, 2013. DOI:10.1155/2013/178021

ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. 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.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, B. 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.

ANGILLIERI, M. Y. E. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. **Environmental Geology**, v. 55, n. 1, p. 107-111, 2008.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALACIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do Número de Curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Revista Irriga**, v. 1, n.1, p. 264– 279, 2012.

ARAÚJO, O. S.; BRUM, E. V. P.; SILVA, E. P.; CAIONI, C.; CLAUDINO, W. V. Acurácia posicional do modelo digital de terreno com os modelos digitais de elevação: ASTER GDEM, SRTM e TOPODATA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19; p. 42-51, 2014.

ASTER GDEM VALIDATION TEAM. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results**, 2011. Disponível em < http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf> Acesso em 15 de dezembro de 2017.

ATHMANIA, D.; ACHOUR, H. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. **Remote Sensing**, v. 6, n. 5, p. 4600-4620, 2014.

BAPTISTA, M.; CARDOSO, A. RIOS E CIDADES: uma longa e sinuosa história... **Revista UFMG**, v. 20, n.2, p. 124-153, 2013.

BECEK, K. Assessing Global Digital Elevation Models Using the Runway Method: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Versus the Shuttle Radar Topography Mission Case. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 8, p. 4823- 4831, 2014.

BECKER, D.; ANDRÉS-HERRERO, M.; WILLMES, C.; WENIGER, G.; BARETH, G. Investigating the Influence of Different DEMs on GIS-Based Cost Distance Modeling for Site Catchment Analysis of Prehistoric Sites in Andalusia. **International Journal of Geo-Information**, 2017, v. 6, n. 2, 2017. DOI:10.3390/ijgi6020036

BEKELE, E. G.; KNAPP, H. V. Watershed modeling to assessing impacts of potential climate change on water supply availability. **Water Resources Management**, v. 24, n. 13, p. 3299–3320, 2010.

BESKOW S.; MELLO, C. R.; COELHO, G.; SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma Bacia Hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 33, pp 169-178, 2009.

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, n. 2, p. 341–363, 2013.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. “**Ciclo hidrológico**”. In: Rodrigues, C. “Programa Gestor de Recursos Hídricos.” Santa Cruz do Sul: EssereNel Mondo, cap. 1, p. 6-12, 2015. ISBN 978-85-67722-49-8.

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.

BHANG, K. J.; SCHWARTZ, F. W.; BRAUN, A. Verification of the Vertical Error in C-Band SRTM DEM Using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 1, p. 36-44, 2007.

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.

BHUNYA, P. K.; MISHRA, S. K.; OJHA, C. S. P.; BERNDTSSON, R. Parameter Estimation of Beta Distribution for Unit Hydrograph Derivation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 4, p. 325-332, 2004.

BOURGINE, B.; BAGHDADI, N. Assessment of C-band SRTM DEM in a dense equatorial forest zone. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 337, n. 14, p. 1234, 2005.

BRASIL. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Decreto Nº 89.817, de 20 de junho de 1984.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

BRASIL. **Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto no 89.817**. Decreto Nº 5.334 de 6 de janeiro de 2005.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; LUERCE, T. D. Avaliação de bases SRTM para extração de variáveis morfométricas e de drenagem. **Geociências**, v. 31, n. 3, p. 381-393, 2012.

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems** (Oxford University Press, New York), 190 p., 1998.

CALLOW, J. N.; VAN NEIL, K. P.; BOGGS, G. S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis. **Journal of Hydrology**., v. 332, n. 1–2, p. 30–39, 2007.

CAO, H.; VERVOORT, W.; DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774–3789, 2011.

CASSALHO, F.; BESKOW, S.; VARGAS, M. M.; MOURA, M. M.; ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e27, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.021720160064>

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 218-226, 2010.

CHARRIER, R.; LI, Y. Assessing resolution and source effects of digital elevation models on automated floodplain delineation: A case study from the Camp Creek Watershed, Missouri. **Applied Geography**, v. 34, p. 38-46, 2012.

CHAVAN, S. R.; SRINIVAS, V. V. Effect of DEM source on equivalent Horton–Strahler ratio based GIUH for catchments in two Indian river basins. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 463–489, 2015.

CHEN, X.; CHEN, Y. D.; XU, C. Y. A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variations of basin topography and rainfall. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 2, p. 242–252, 2007.

CHOI, J. Y.; ENGEL, B. A. Real-Time Watershed Delineation System Using Web-GIS. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 17, n. 3, p. 189–196, 2003.

CHOI, J. Y.; LEE, G.; KIM, J. C. Estimation of the Nash Model Parameters Based on the Concept of Geomorphologic Dispersion. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 10, p. 806–817, 2011.

CHOPRA, R.; DHIMAN, R. D., SHARMA, P. K. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using Remote sensing and GIS techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 531–539, 2005.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYES, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill Book Company, 1998. 571 p.

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

CHU, H.; WANG, C.; HUANG, M.; LEE, C.; LIU, C.; LIN, C. Effect of Point Density and Interpolation of Lidar-Derived High-Resolution Dems on Landscape Scarp Identification. **GIScience & Remote Sensing**, v. 51, n. 6, p. 731–747, 2014.

CHUNG, E.; LEE, K. S. Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multicriteria decision making techniques. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 1502–1511, 2009.

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

CLEVELAND, T. G.; HE, X.; ASQUITH, W. H.; FANG, X.; THOMPSON, D. B. Instantaneous Unit Hydrograph Evaluation for Rainfall-Runoff Modeling of Small Watersheds in North and South Central Texas. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, n. 5, p. 479–485, 2006.

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

CRISS, R.E.; WINSTON, W.E. Discharge predictions of a rainfall-drive theoretical hydrograph compared to common models and observed data. **Water Resources Research**, v. 44, W10407, 2008. DOI: 10.1029/2007WR006415.

CROLEY II, T. E. Gamma Synthetic Hydrographs. **Journal of Hydrology**, v. 47, p. 41-52, 1980.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. **Estudo dos solos do município de Pelotas**. Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, 1996, 54p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 12).

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo**. Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, Ed. UFPel, 1996, 28p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 23/96).

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J.; SEVERO, C. R. S.; SOARES, M. J.; COSTA, C. N.; NUNES, M. L; **Estudo dos solos do município de Canguçu**. Pelotas, RS: EMBRAPA-CPACT, Ed. UFPel, 1997, 90p. (EMBRAPA-CPACT, Documentos, 31/97).

DAR, R. A.; CHANDRA, R.; ROMSHOO, S. A. Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. **Journal of Mountain Science**, v. 10, n. 1, p. 731–741, 2013.

DAS, A. K.; MUKHERJEE, S. Drainage Morphometry Using Satellite Data and GIS in Raigad District, Maharashtra. **Journal Geological Society of Índia**, v. 65, p. 577-589, 2005.

DEWITT, J. D.; WARNER, T. A.; CONLEY, J. F. Comparison of DEMs derived from USGS DLG, SRTM, a statewide photogrammetry program, ASTER GDEM and LiDAR: implications for change detection. **GIScience & Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 179-197, 2015.

ELKHRACHY, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. **Ain Shams Engineering Journal**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007>

ELLOUZE-GARGOURI, E.; BARGAOUI, Z. Runoff Estimation for an Ungauged Catchment Using Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) and Copulas. **Water Resources Management**, v. 26, n. 6, p. 1615–1638, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos** (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979.

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**, Inc. (Esri), 2014. CD-ROM.

EZE, E. B.; JOEL, E. Morphometric parameters of the Calabar River Basin: implication for hydrologic processes. **Journal of Geography and Geology**, v. 2, n. 1, p. 19–26, 2010.

FALCÃO, A. P.; MAZZOLARI, A.; GONÇALVES, A. B.; ARAÚJO, M. A. V. C.; TRIGO-TEIXEIRA, A. Influence of elevation modelling on hydrodynamic simulations of a tidally-dominated estuary. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 152–164, 2013.

FALORNI, G.; TELES, V.; VIVONI, E. R.; BRAS, R. L.; AMARATUNGA, K. S. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. F2, p. 1-20, 2005.

FANG, X.; THOMPSON, D. B.; CLEVELAND, T. G.; PRADHAN, D.E.P.; MALLA, R. Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, p. 202-211, 2008.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, RG2004, 2007. DOI: 10.1029/2005RG000183

FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006.

GAJALAKSHMI, K.; ANANTHARAMA, V. Comparative Study of Cartosat-DEM and SRTM-DEM on Elevation Data and Terrain Elements. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 4, n. 1, p. 1361-1366, 2015.

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.

GERICKE, O. J.; PLESSIS, J. A. Catchment parameter analysis in flood hydrology using GIS applications. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 54, n. 2, p. 15-26, 2012.

GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J. Improving hydrological information acquisition from DEM processing in floodplains. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 502-514, 2009.

GHUMMAN, A. R.; AHMAD, M. M.; HASHMI, H. N.; KAMAL, M. A. Development of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, p. 3153–3163, 2012.

GHUMMAN, A. R.; AHMAD, M. M.; HASHMI, H. N.; KAMAL, M. A. Regionalization of Hydrologic Parameters of Nash Mode. **Water Resources**, v. 38, n. 6, 2011, p. 735–744, 2011.

GHUMMAN, A. R.; KHAN, Q. U.; HASHMI, H. N.; AHMAD, M. M. Comparison of Clark, Nash Geographical Instantaneous Unit Hydrograph Models for Semi Arid Regions. **Water Resources and the Regime of Water Bodies**, v. 41, n. 4, p. 364–371, 2014.

GOMES, T. L.; MAGALHÃES, S. V. G.; ANDRADE, M. V. A.; FRANKLIN, W. R.; PENA, G. C. Efficiently computing the drainage network on massive terrains using external memory flooding process. **Geoinformatica**, v. 19, n. 4, p. 671–692, 2015.

GOTTSCHALK, L.; WEINGARTNER, R. Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. **Journal of Hydrology**, v. 208, p. 148 – 162, 1998.

GREEN, C. H.; TOMER, M. D.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v.49, n. 2, p.413-422, 2006.

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.

HIMANSHU, S. K.; PANDEY, A.; PALMATE, S. S. Derivation of Nash Model parameters from Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph for a Himalayan River using ASTER DEM. In: Proceedings of International Conference on Structural Architectural and Civil Engineering, 2015, Dubai. Anais... Dubai: Innovative Research Publication, 2015. p. 234-239. ISBN:9788193137321

HIMANSHU, S.K.; FISCA, G. N.; RAUTELA, S.; ANUJA, K. M.; TIWARI, M. Remote Sensing and GIS Applications in Determination of Geomorphological Parameters and Design Flood for a Himalyan River Basin, India. **International Research Journal of Earth Sciences**, v. 1, n. 3, p. 11-15, 2013.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337–347, 2010.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, p. 275-370, 1945.

HOSSEINI, S. M.; MAHJOURI, N.; RIAHI, S. Development of a Direct Geomorphologic IUH Model for Daily Runoff Estimation in Ungauged Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 6, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001333.

HÜMANN, M.; SCHÜLER, G.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; JOHST, M.; CASPARI, T. Identification of runoff processes – the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology**, v. 409, p. 637-649, 2011.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: **Third International Symposium on Spatial Data Handling**, Sydney: Columbus, Ohio: International Geographical Union, p. 117-133, 1988.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p. 211-232, 1989.

HVIDEGAARD, S. M.; SØRENSEN, L. S.; FORSBERG, R. ASTER GDEM validation using LiDAR data over coastal regions of Greenland. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 1, p. 85–91, 2012.

IBGE. **Noções Básicas de Cartografia**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/representacao.html> Acesso em 21 de dezembro de 2017.

JABUR, A. S.; RIZZI, N. E. Estimativas da vazão máxima e capacidade de saturação hídrica da bacia hidrográfica do Alto do Rio Ligeiro em Pato Branco, PR. **Revista Floresta**, v. 41, n. 4, p. 833 - 846, 2011.

JAIN, V.; SINHA, R. Derivation of Unit Hydrograph from GIUH Analysis for a Himalayan River. **Water Resources Management**, v. 17, p. 355–375, 2003.

JARIHANI, A. A.; CALLOW, J. N.; MCVICAR, T. R.; NIEL, T. G. V.; LARSEN, J. R. Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 489–506, 2015.

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.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

JIN, C. A deterministic gamma-type geomorphologic instantaneous unit hydrograph based on path types. **Water Resources Research**, v. 28, n. 2, p. 479–486, 1992.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 914-922, 2008.

KAAB, A. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 463–474, 2005.

KHALEGHI, M. R.; GHOLAMI, V.; GHODUSI, J.; HOSSEINI, H. Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, p. 163–171, 2011.

KHALEGHI, M. R.; GHOLAMI, V.; GHODUSI, J.; HOSSEINI, H. Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, p. 163–171, 2011.

KINSEY-HENDERSON, A. E.; WILKINSON, S. N. Evaluating Shuttle radar and interpolated DEMs for slope gradient and soil erosion estimation in low relief terrain. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 128-139, 2013.

KUMAR, A. Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Based Hydrologic Response Models for Ungauged Hilly Watersheds in India. **Water Resources Management**, v. 29, p. 863–883, 2015.

KUMAR, B.; VENKATESH, M.; TRIPHATI, A.; ANSHUMALI. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Rihand River Basin, Central India. **Sustainable Water Resources Management**, 2017. DOI 10.1007/s40899-017-0118-3

KUMAR, M.; KUMAR R.; SINGH P. K.; SINGH, M.; YADAV K. K.; MITTAL H. K. Catchment delineation and morphometric analysis using geographical information system. **Water Science & Technology**, v. 72, n. 7, p.1168-75, 2015.

KUMAR, R.; CHATTERJEE, C.; LOHANI, A. K.; KUMAR, S.; SINGH, R. D. Sensitivity Analysis of the GIUH based Clark Model for a Catchment. **Water Resources Management**, v. 16, p. 263–278, 2002.

KUMAR, R.; CHATTERJEE, C.; SINGH, R. D.; LOHANI, A. K.; KUMAR, S. Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) models. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1829–1840, 2007.

KUMAR, R.; CHATTERJEE, C.; SINGH, R. D.; LOHANI, A. K.; KUMAR, S. 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.

LAS HERAS, M. M.; SACO, P. M.; WILLGOOSE, G. R. A Comparison of SRTM V4 and ASTER GDEM for Hydrological Applications in Low Relief Terrain. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v, 78, n. 7, p. 757–766, 2012.

LI, C.; GUO, S.; ZHANG, W.; ZHANG, J. Use of Nash's IUH and DEMs to identify the parameters of an unequal-reservoir cascade IUH model. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 4073–4082, 2008.

LI, J.; WONG, D. W. S. Effects of DEM sources on hydrologic applications. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, p. 251–261, 2010.

LI, P.; SHI, C.; LI, Z.; MULLER, J.; DRUMMOND, J.; LI, X.; LI, T.; LI, Y.; LIU, J. Evaluation of ASTER GDEM using GPS benchmarks and SRTM in China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 5, p. 1744–1771, 2013.

LIU, H.; KIESEL, J.; HÖRMANN, G.; FOHRER, N. Effects of DEM horizontal resolution and methods on calculating the slope length factor in gently rolling landscapes. **Catena**, v. 87, p. 368–375, 2011.

LUANA, S.; HOU, X.; WANG, Y. Assessing the accuracy of SRTM DEM and ASTER GDEM datasets for the coastal zone of Shandong Province, Eastern China. **Polish Maritime Research**, v. 22, n. 86, p. 15-20, 2015.

LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 5, p. 339-358, 2006.

MAGESH, N. S.; CHANDRASEKAR, N.; KALIRAJ, S. A GIS based automated extraction tool for the analysis of basin morphometry. **Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science**, v. 2, n. 1, p. 32–35, 2012.

MANTELLI, L. R.; BARBOSA, J. M.; BITENCOURT, M. D. Assessing ecological risk through automated drainage extraction and watershed delineation. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 5, p. 325–331, 2011.

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

MENDAS, A. The contribution of the digital elevation models and geographic information systems in a watershed hydrologic research. **Applied Geomatics**, v. 2, p. 33-42, 2010.

MENEZES, M. D.; JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Hydrological dynamics of two springs, associated to land use, soil characteristics and physical-hydrological attributes at Lavrinha creek watershed – Mantiqueira Mountains (MG). *Scientia Forestalis*, v. 37, n. 82, p. 175-184, 2009.

MIKHAILOVA, M. V.; MIKHAILOV, V. N.; MOROZOV, V. N. Extreme Hydrological Events in the Danube River Basin over the Last Decades. **Water Resources and the Regime of Water Bodies**, 2012, v. 39, n. 2, p. 161–179, 2012.

MILIAREISIS, G. C.; PARASCHOU, C. V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, p. 49–59, 2005.

MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2017.

MISPAN, M. R.; RASID, M. Z. A.; RAHMAN, N. F. A.; KHAIRI KHALID, K.; HARON, S. H.; AHMAD, N. Assessment of ASTER and SRTM Derived Digital Elevation Model for Highland Areas of Peninsular Malaysia Region. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 6, p. 316-320, 2015.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 3–30, 1991.

MORAIS, J. D.; FARIA, T. S.; ELMIRO, M. A. T.; NERO, M. A.; SILVA, A. A.; NOBREGA, R. A. A. Altimetry assessment of ASTER GDEM v2 and SRTM v3 Digital Elevation Models: A case study in urban area of Belo Horizonte, MG, Brazil. **Bulletin of Geodetic Sciences**, v. 23, n. 4, p. 654-558, 2017.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MUKHERJEE, S.; JOSHI, P. K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R. D.; MUKHOPADHY, A. Y. A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p.2 05-217, 2013.

MUÑOZ, E.; ARUMÍ, J. L.; VARGAS, J. A Design Peak Flow Estimation Method for Medium Large and Data-Scarce Watersheds With Frontal Rainfall. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 3, p. 439–448, 2012.

MURPHY, P. N. C.; OGILVIE, J.; MENG, F.; ARP, P. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 1747–1754, 2008.

NAIR, H. C.; PADMALAL, D.; JOSEPH, A.; VINOD, P. G. Delineation of Groundwater Potential Zones in River Basins Using Geospatial Tools—an Example from Southern Western Ghats, Kerala, India. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 1, n. 5, 2017. DOI 10.1007/s41651-017-0003-5

NASH, J. E. A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 17, n. 3, p. 249-282, 1960.

NASH, J. E. The form of the Instantaneous Unit Hydrograph. In: Assembleia Generale de Toronto, 3, 1957, Toronto. Anais... Toronto: IAHS, p.114-121, 1957.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles*. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NEUMANN, M. R. B.; ROIG, H. L.; SOUZA, A. L. F. Digital elevation models obtained by contour lines and SRTM/Topodata, for digital soil mapping. **Journal of Soil Science and Environmental Management**, v. 3, n. 5, p. 104-109, 2012.

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.

NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall–runoff models based on the linear reservoir concept. **Catena**, v. 76, p. 206–214, 2009.

NUNES, G. S. **Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 187p. 2015

OZDEMIR, H.; BIRD, D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. **Environmental Geology**, v. 56, p. 1405–1415, 2009.

OZERNOY, V. M.; SMITH, D. R.; SICHERMAN, A. Evaluating computerized Geographic Information Systems using decision analysis. **Interfaces**, v. 11, n. 5, p. 92-100, 1981.

PAKHMODE, V.; KULKARNI, H.; DEOLANKAR, S. B. Hydrological drainage analysis in watershed-programme planning: a case from the Deccan basalt, India. **Hydrogeology Journal**, v. 11, n. 5, p. 595–604, 2003.

PETSCH, C.; MONTEIRO, J. B.; BUENO, M. B. Análise comparativa da acuracidade da rede de drenagem gerada automaticamente e extraída de carta topográfica: Estudo de caso no Município de Ponta Grossa – PR. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 4, p.1195–1205, 2012.

PINHEIRO, H. S. K.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; ANJOS, L. H. C. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p.1384-1394, 2012.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, p. 159–176, 2001.

PRASAD, P. R.; REDDY, N. L. K.; PRASAD, N. V. B. S. S.; RAJU, D. N. Integrated water resources assessment and management in a small watershed – a geomorphic approach. **Hydrology Research**, v. 46, n. 2, p. 180-191, 2015.

QGIS Development Team, 2017. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/>>

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241– 262, 2003.

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

RAI, R. K.; UPADHYAY, A.; SARKAR, S.; UPADHYAY, A. M.; SINGH, V. P. GIUH Based Transfer Function for Gomti River Basin of India. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 9, n. 2, p. 24-50, 2009.

RAIS, S.; JAVED, A. Drainage characteristics of Manchi basin, Karauli district, Eastern Rajasthan using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Geomatics and Geosciences**, v. 5, n. 1, p. 104-118, 2014.

RAWAT, S. S.; KUMAR, P.; JAIN, M. K.; MISHRA, S. K.; NIKAM, B. A Simple Lag Time Based GIUH Model for Direct Runoff Hydrograph Estimation. **International Journal of Innovative Research & Development**, v. 5, n. 3, p. 197-204, 2016.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. New York: Springer Verlag, 2006. 494 p.

RIO GRANDE DO SUL. **Declara integrante do patrimônio cultural do Estado o Arroio Pelotas**. Lei Nº 11.895, de 28 de março de 2003.

ROA-GARCÍA, M. C.; BROWN, S.; SCHREIER, H.; LAVKULICH, L. M. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. **Water Resources Research**, v. 47, n. 5, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009582.

RODRÍGUEZ, E., MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249–260, 2006.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; GONZÁLEZ-SANABRIA, M. A.; BRAS, R. L. Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph. **Water Resources Research**, v. 18, n. 4, p. 877-886, 1982.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; VALDÉS, J. B. The Geomorphologic Sctructure of Hydrologic Response. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979.

ROMSHOO, S. A.; BHAT, S. A.; RASHID, I. Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus basin. **Journal of Earth System Science**, v. 121, n. 3, p. 659–686, 2012.

ROSSO, R. Nash Model Relation to Horton Order Ratios. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, p. 914-920, 1984.

SAHOO; B; CHATTERJEE, C.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R.; KUMAR, R. Flood Estimation by GIUH-Based Clark and Nash Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 6, p. 515 – 525, 2006.

SANEP - Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas, 2018. Disponível em: <<http://server.pelotas.com.br/sanep/captacao/>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2018.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 2, n. 2, p. 7-20, 2007.

SARKAR, S.; GOEL, N. K.; MATHUR, B. S. Adequacy of Nakagami-m Distribution Function to Derive GIUH. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, p. 1070-1079, 2009.

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

SATGÉ, F.; BONNETA, M. P.; TIMOUKA, F.; CALMANTB, S.; PILLCOC, R.; MOLINAC, J.; LAVADO-CASIMIROD, W.; ARSEN, A.; J.F. CRÉTAUX, J. F.; GARNIERE, J. Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, p. 465-488, 2015.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 67, p. 697-646, 1956.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA. Technical Release n. 55, 1986.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**, 2ª ed. Berlin; New York: de Gruyter, 2003. 612 p. ISBN 3-11-017549-5.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.

SEYLER, F.; MULLER, F.; COCHONNEAU, G.; GUIMARÃES, L.; GUYOT, J. L. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 3173–3185, 2009.

SHAFIQUE, M.; MEIJDE, M. V. Impact of uncertainty in remote sensing DEMs on topographic amplification of seismic response and V_s^{30} . **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 4, p. 2237–2245, 2015.

SHARMA, A.; TIWARI, K. N. A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1394–1404, 2014.

SHARMA, C. S.; MISHRA, A.; PANDA, S. N. Assessing Impact of Flood on River Dynamics and Susceptible Regions: Geomorphometric Analysis. **Water Resources Management**, v. 28, p. 2615-2638, 2014.

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

SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe - Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. Pesquisa sobre as interações entre o regime pluvial e o regime de escoamento das sub-bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG. 2011. 350 p. Relatório Final de Atividades do Projeto de P&D 176. Não publicado.

SILVA, C. R. P.; DEMARQUI, E. N.; ALMEIDA, F. T.; MINGOTI, R.; SOUZA, A. P. Diferentes modelos digitais de elevação na caracterização física da bacia hidrográfica do Rio Nandico, MT, Brasil. **Scientia Plena**, v. 11, n. 15, 051701, 2015.

SINGH, K. P. Unit Hydrographs - A comparative study. **Water Resources Bulletin**, v. 12, n. 2, p. 381 - 392, 1976.

SINGH, P. K.; MISHRA, S. K.; JAIN, M. K. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, n. 2, p. 239-261, 2014.

SINGH, P; THAKUR, J. K.; SINGH, U. C. Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. **Environmental Earth Sciences**, v. 68, n. 7, p. 1967–1977, 2013. DOI 10.1007/s12665-012-1884-8

SINGH, S. K. Simple Parametric Instantaneous Unit Hydrograph. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v, 141, n. 5, 2015, 04014066, 2015.

SINGH, V. P.; SINGH, K. Derivation of the Gamma Distribution by Using the Principle of Maximum Entropy (Pome). **Water Resources Bulletin**, v. 21, n. 6, p. 941–952, 1985.

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 19, n.1, p. 447-454, 1938.

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.

SOULIS, K. X.; VALIANTZAS, J. D. Identification of the SCS-CN Parameter Spatial Distribution Using Rainfall-Runoff Data in Heterogeneous Watersheds. **Water Resources Management**, v. 27, n. 6, p. 1737–1749, 2013.

SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. M. Modelo Digital de Elevação e extração automática de drenagem: dados, métodos e precisão para Estudos Hidrológicos e Geomorfológicos. **Boletim de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 134-149, 2014.

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.

SREEDEVI, P. D.; OWAIS, S.; KHAN, H. H.; AHMED, S. Morphometric Analysis of a Watershed of South India Using SRTM Data and GIS. **Journal Geological Society of India**, v. 73, p.543-552, 2009.

STACKELBERG, N. O. Von; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. **Transactions of the ASABE**, v.50, n.2, p.455-468, 2007.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 63, p. 923 – 938, 1952.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2008. 126 p.

SUDHAKAR, B. S.; ANUPAM, K. S.; AKSHAY, O. J. Snyder Unit Hydrograph and GIS for Estimation of Flood for Un-Gauged Catchments in Lower Tapi Basin, India. **Hydrology Current Research**, v. 6, n. 1, p. 1000195, 2015. DOI:10.4172/2157-7587.1000195.

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.

SUPRAJA, B.; HEMALATHA, T.; BABU, C. M. Estimation of Peak Discharge in an Ungauged Watershed Using GIUH Model Supported With GIS and RS. **International Journal of Applied Research**, v. 2, n. 2, p. 754-759, 2016.

SWAIN, J. B.; JHA, R.; PATRA, K. C. Stream flow prediction in a typical ungauged catchment using GIUH approach. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 993 – 1000, 2015.

SZABÓ, G.; SINGH, S. K.; SZABÓ, S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 83–84, p. 137-145, 2015.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 81-100, 1991.

TAYLOR, A. B.; SCHWARZ, H. E. Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 33, n. 2, p. 235–246, 1952.

THIESSEN, A.; ALTER, J. C. Precipitation averages for large areas. Climatological Data For July, 1911. **Monthly Weather Review**, v. 39, n. 10, p. 1082-1084, 1911.

THOMAS, J.; JOSEPH, S.; THRIVIKRAMJI, K. P.; ARUNKUMAR, K. S. Sensitivity of digital elevation models: The scenario from two tropical mountain river basins of the Western Ghats, India. **Geoscience Frontiers**, v. 5, p. 893-909, 2014.

THOMAS, J.; PRASANNAKUMAR, V. Comparison of basin morphometry derived from topographic maps, ASTER and SRTM DEMs: an example from Kerala, India. **Geocarto International**, v. 30, n. 3, p. 346–364, 2015.

THOMPSON, J. A.; BELL, J. C.; BUTLER, C. A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. **Geoderma**, v.100, p. 6789, 2001.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, v.30, n.5, p. 849-857, 2006.

TOUTIN, T. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 228– 240, 2002.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p. ISBN 8570258232.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VEBER, C. L. P. **Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p. 113. 2016.

VEITH, T. L.; VAN LIEW, M. W.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. **Transactions of the ASABE**, v.53, p.1477-1486, 2010.

VIEIRA, D. M. S.; RODRIGUES TORRES, J. L. R.; OLIVEIRA, L. M.; GONÇALVES, O. R.; OLIVEIRA, M. A. Morfometria e qualidade da água da microbacia do córrego do Sapecado, afluente do rio Uberaba. **Global Science and Technology**, v. 05, n. 03, p. 11 – 22, 2012.

VITTALA, S. S.; GOVINDAIAH, S.; GOWDA, H. H. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada Area of Tumkur District, South India using Remote Sensing and GIS Techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 351-362, 2004.

WANG, X.; CHEN, Y.; SONG, L.; CHEN, X.; XIE, H.; LIU, L. Analysis of lengths, water areas and volumes of the Three Gorges Reservoir at different water levels using Landsat images and SRTM DEM data. **Quaternary International**, v. 304, p. 115-125, 2013.

WECHSLER, S. P. Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users. **URISA Journal**, v. 15, n. 2, p. 57-64, 2003.

WU, I. Design hydrographs for small watersheds in Indiana. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 89, n. 6, p. 35–66, 1963.

YUE, L.; YU, W.; SHEN, H.; ZHANG, L.; HE, Y. Accuracy assessment of SRTM V4.1 and ASTER GDEM V2 in high-altitude mountainous areas: A case study in Yulong Snow Mountain, China. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015. Anais... Milan: IEEE, 2015. p. 5011-5014. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326958

ZAKIZADEH, F.; MALEKINEZHAD, H. Comparison of Methods for Estimation of Flood Hydrograph Characteristics. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 40, n. 12, p. 828-837, 2015.

ZAMAN, M .A.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood frequency analysis in arid regions: A case study for Australia. **Journal of Hydrology**, v. 475, p.74–83, 2012.

ZEBKER, H. A.; GOLDSTEIN, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. B5, p. 4993–4999, 1986.

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.

ZHANG, H.; HUANG, G. Building channel networks for flat regions in digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 20, p. 2879–2887, 2009.

ZHANG, H.; YAO, Z.; YANG, Q.; LI, S.; BAARTMAN, J. E. M.; GAI, L.; YAO, M.; YANG, X.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. **Catena**, v. 151, p. 174 181, 2017.

ZHANG, S.; ZHAO, B.; E. ERDUN, E. Watershed Characteristics Extraction and Subsequent Terrain Analysis Based on Digital Elevation Model in Flat Region. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 11, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000961

ZHAO, C.; JENSEN, J.; DENG, X.; DEDE-BAMFO, N. Impacts of LiDAR Sampling Methods and Point Spacing Density on DEM Generation. **Papers in Applied Geography**, v. 2, n. 3, p. 261-270, 2016.

ZHAO, S.; CHENG, W.; ZHOU, C.; CHEN, X.; ZHANG, S.; ZHOU, Z.; LIU, H.; CHAI, H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: an example in the Loess Plateau and North China Plain of China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 23, p. 8081-8093, 2011.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; MORAES, J. M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, v. 222, p. 29-38, 2006.

Apêndices

Apêndice A – Caracterização geomorfológica das bacias hidrográficas

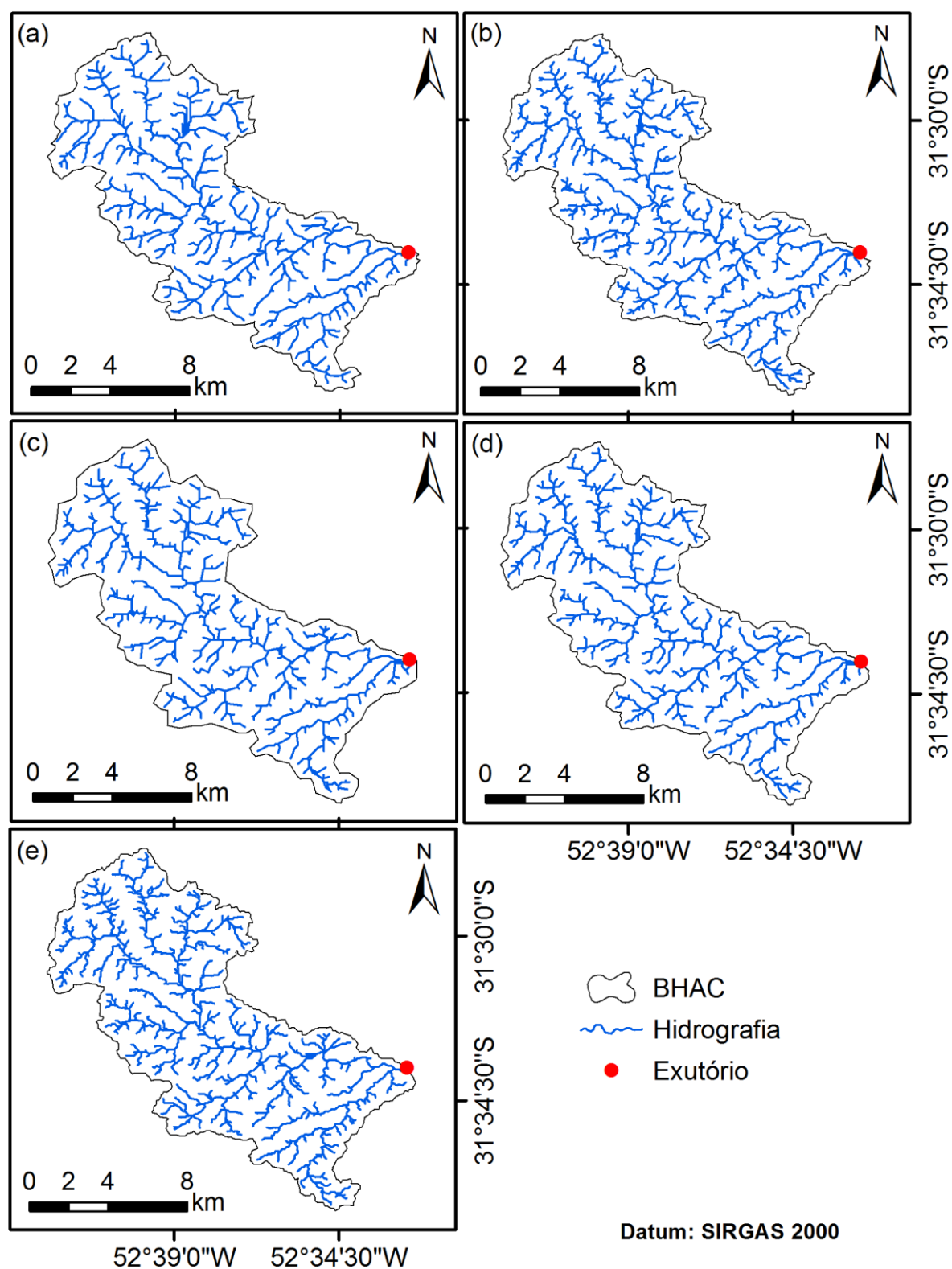


Figura A1 – Divisor de águas e rede de drenagem da BHAC derivados a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

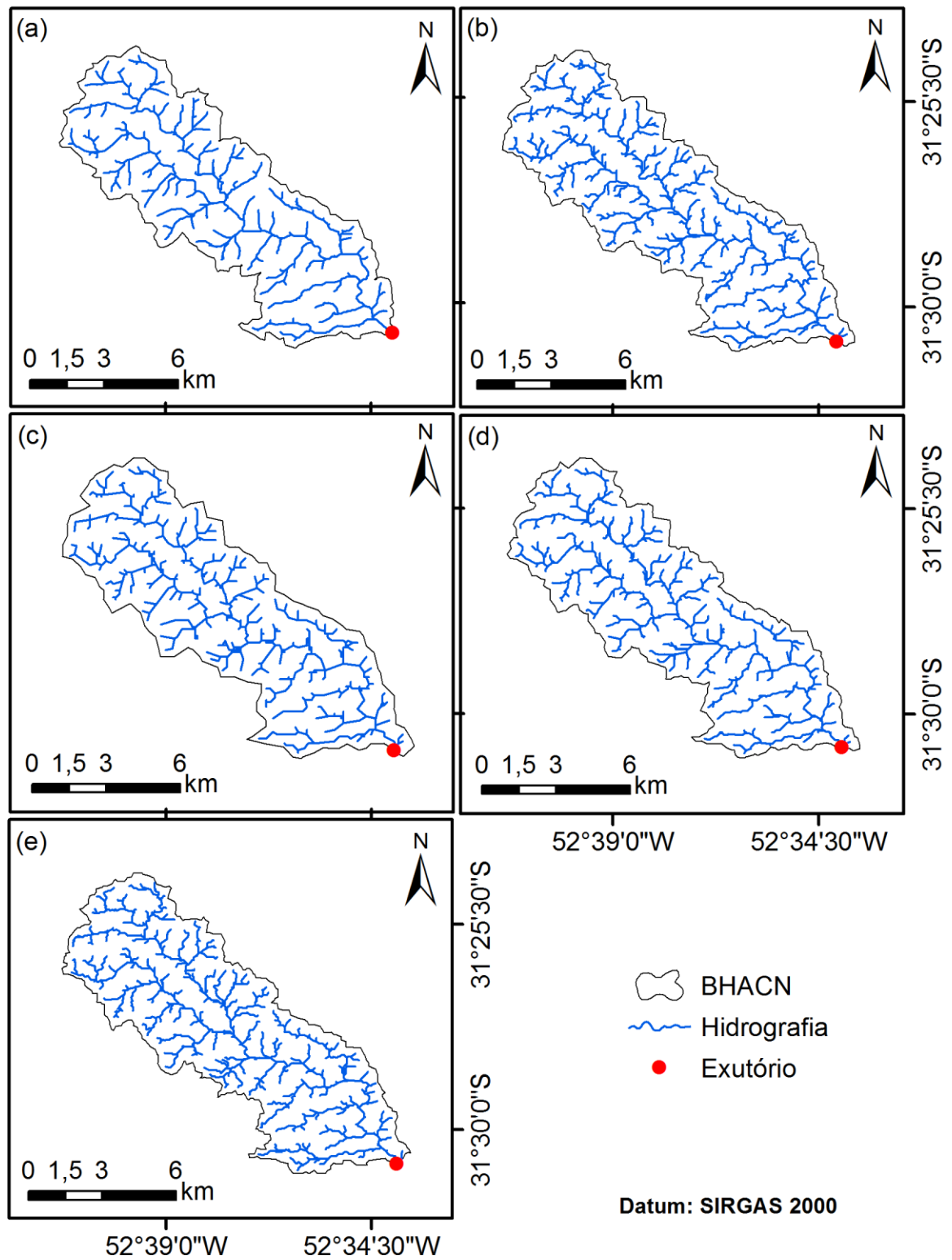


Figura A2 - Divisor de águas e rede de drenagem da BHACN derivados a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

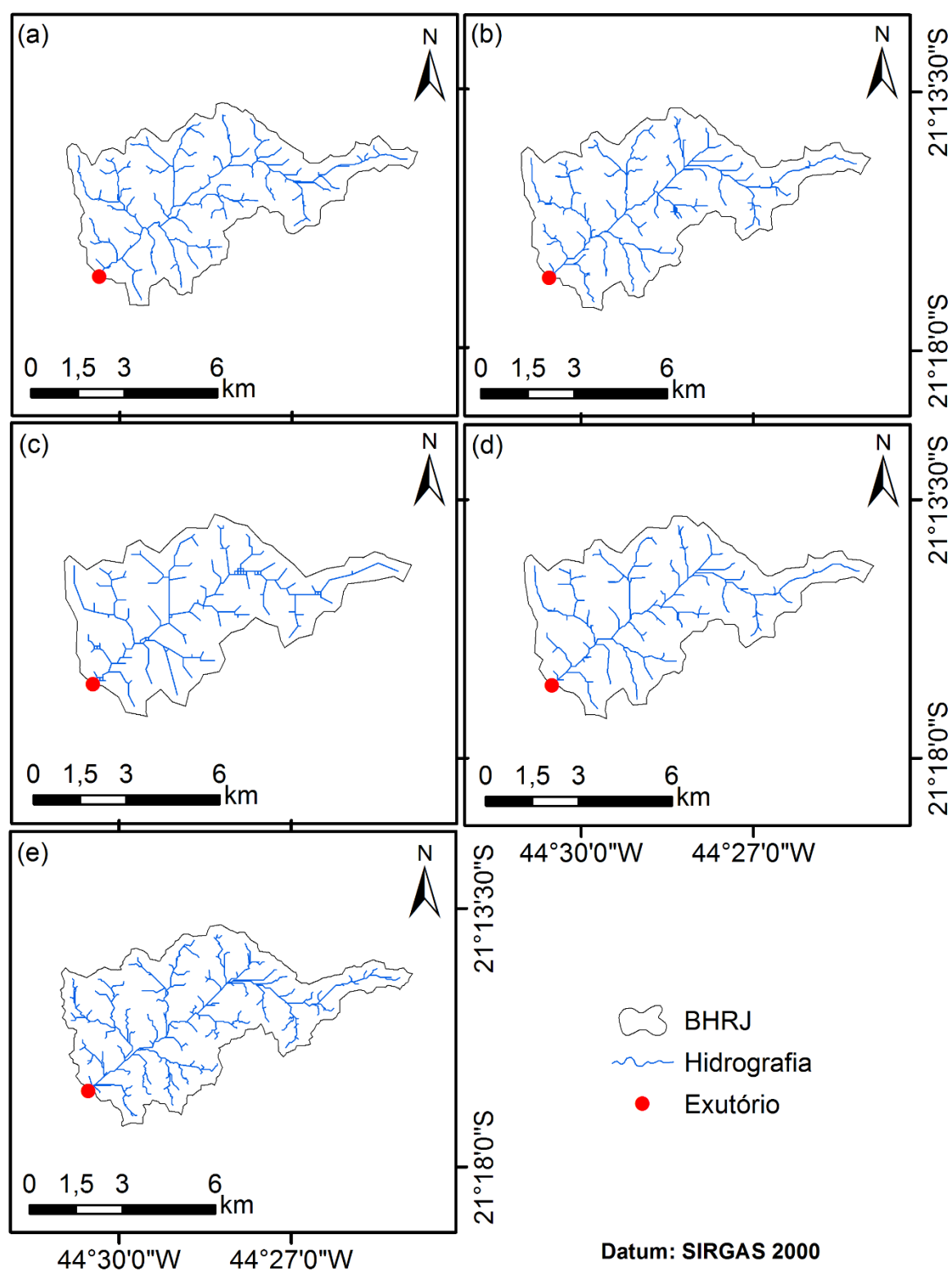


Figura A3 – Divisor de águas e rede de drenagem da BHRJ derivados a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

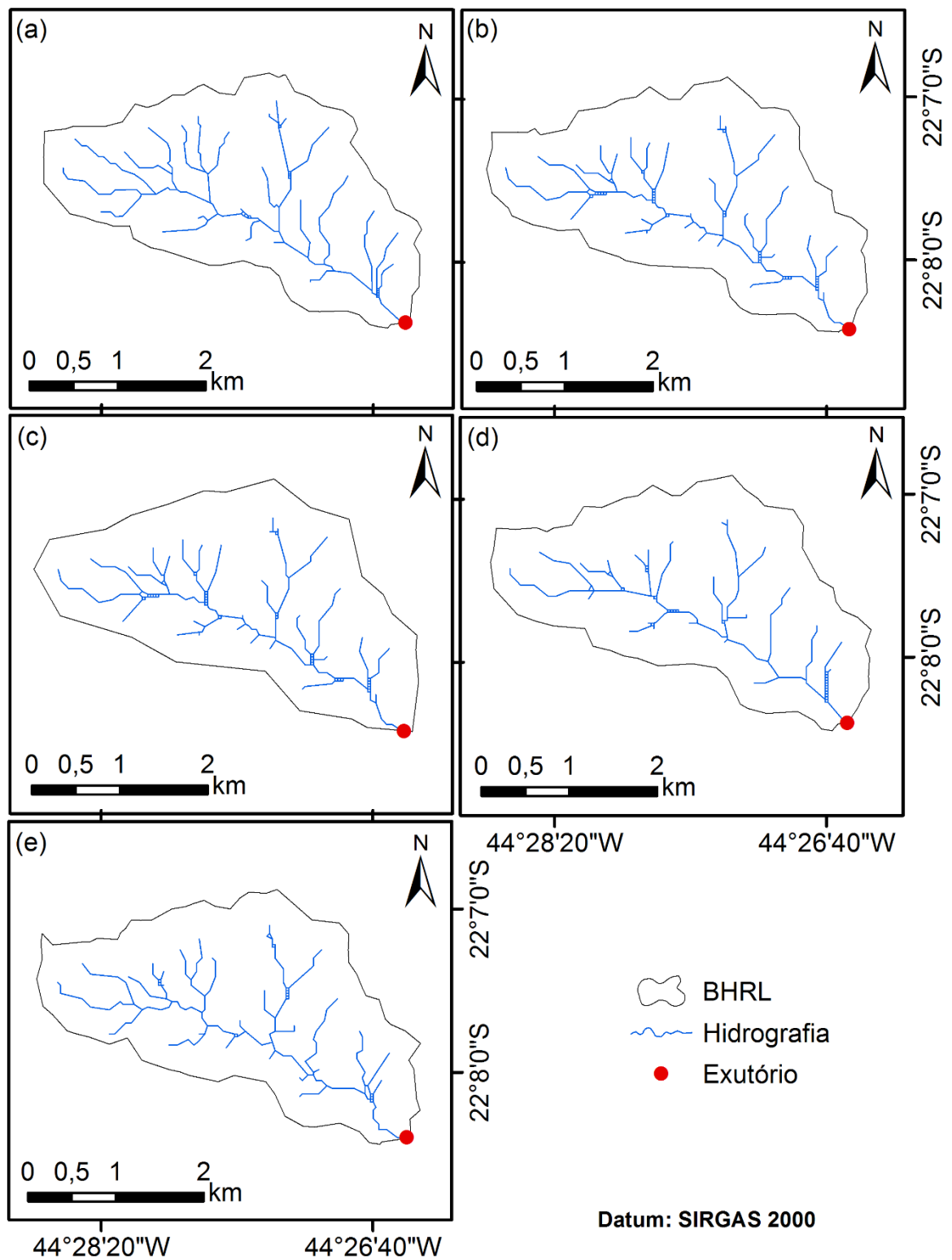


Figura A4 – Divisor de águas e rede de drenagem da BHRL derivados a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

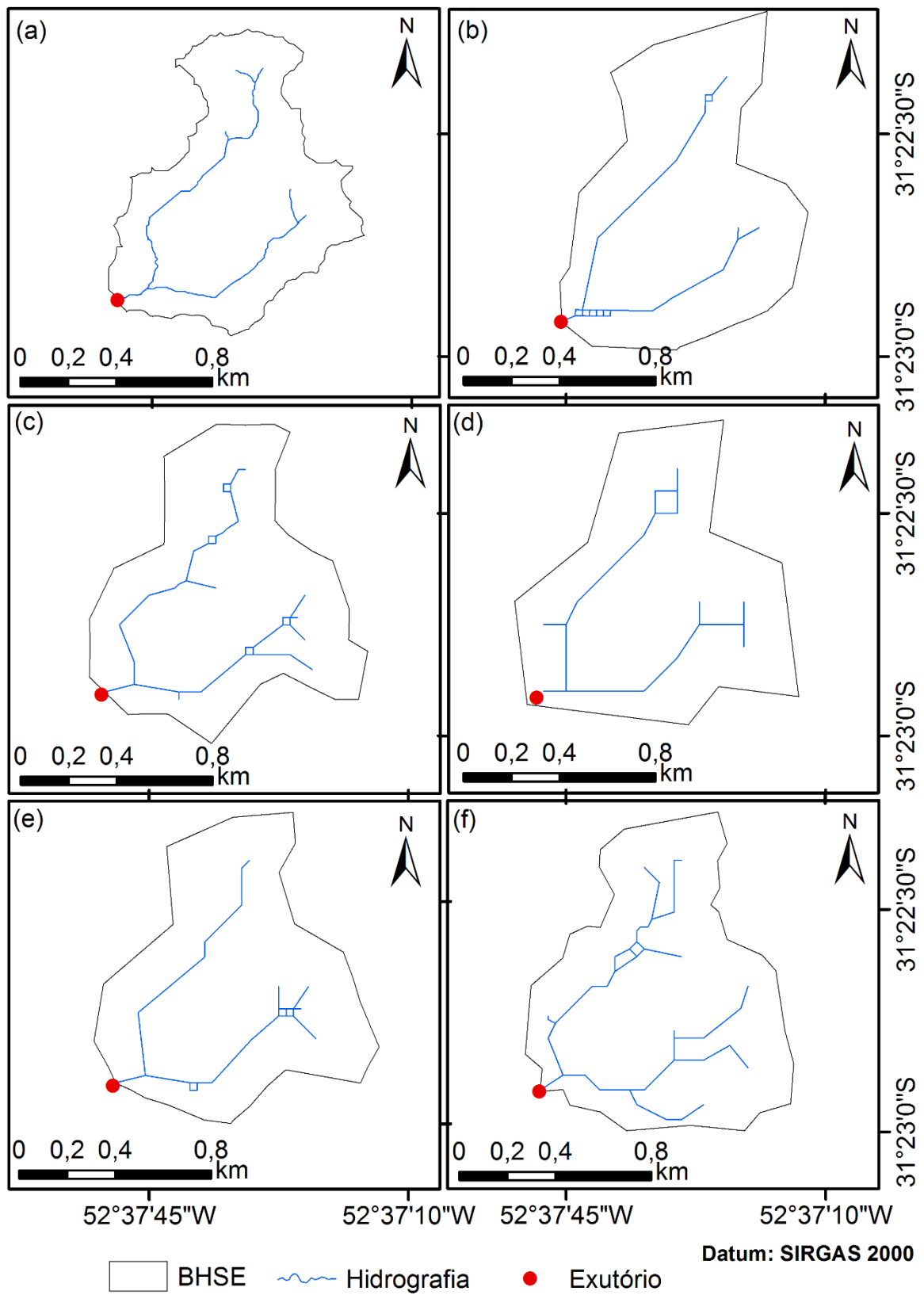


Figura A5 – Divisor de águas e rede de drenagem da BHSE derivados a partir dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

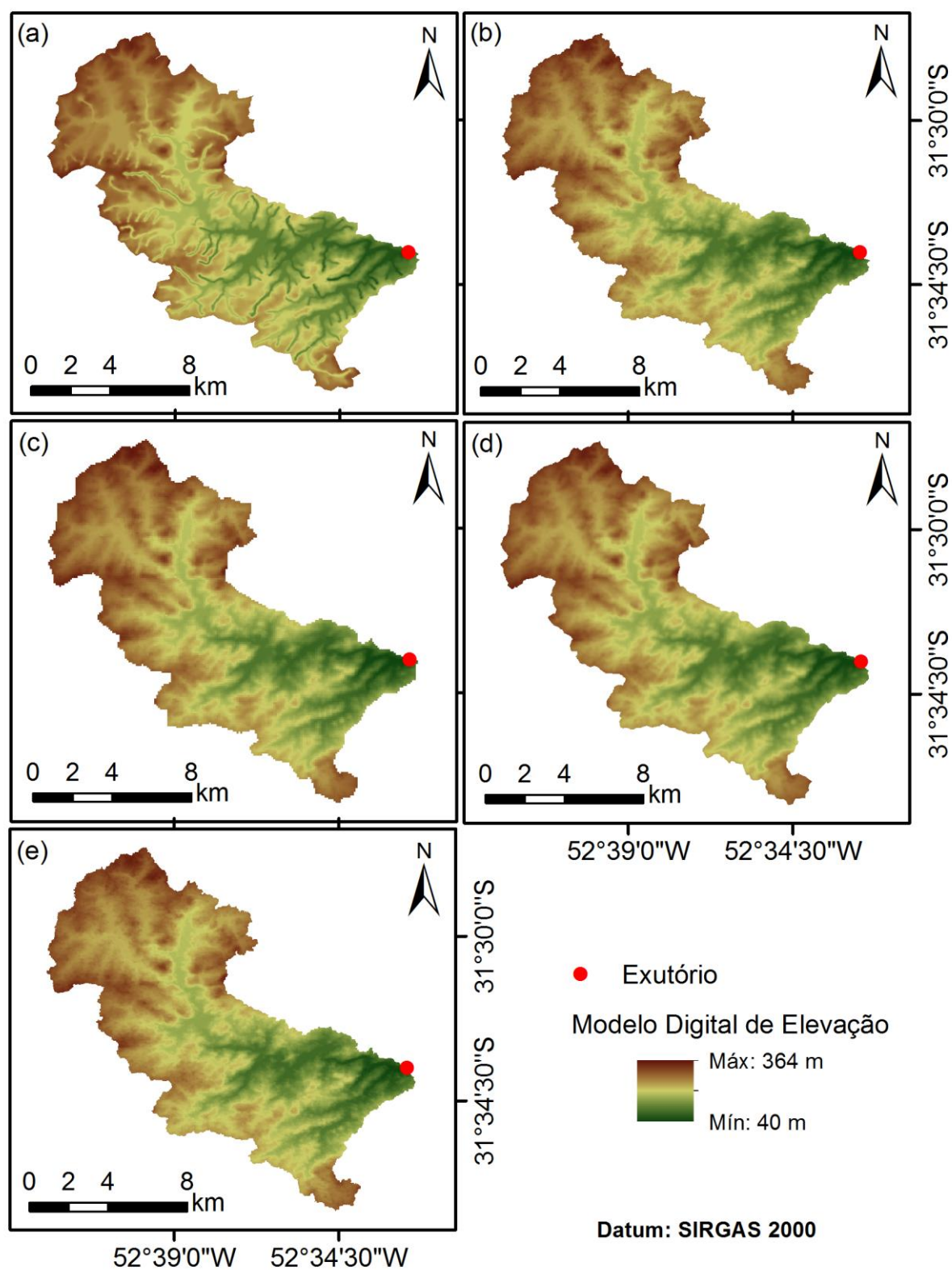


Figura A6 – Mapa de altitudes da BHAC obtido a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

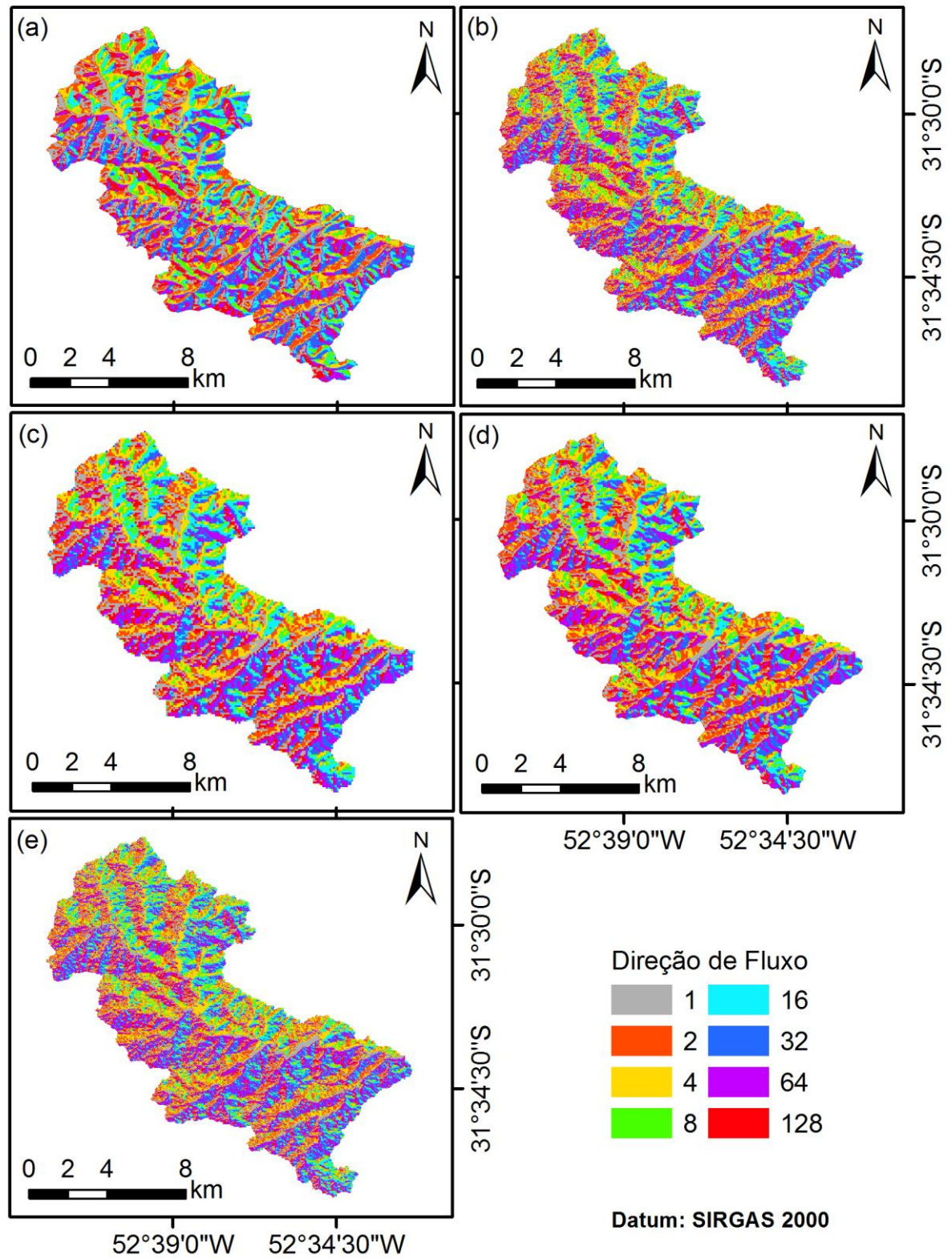


Figura A7 – Mapa de direção de fluxo da BHAC derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

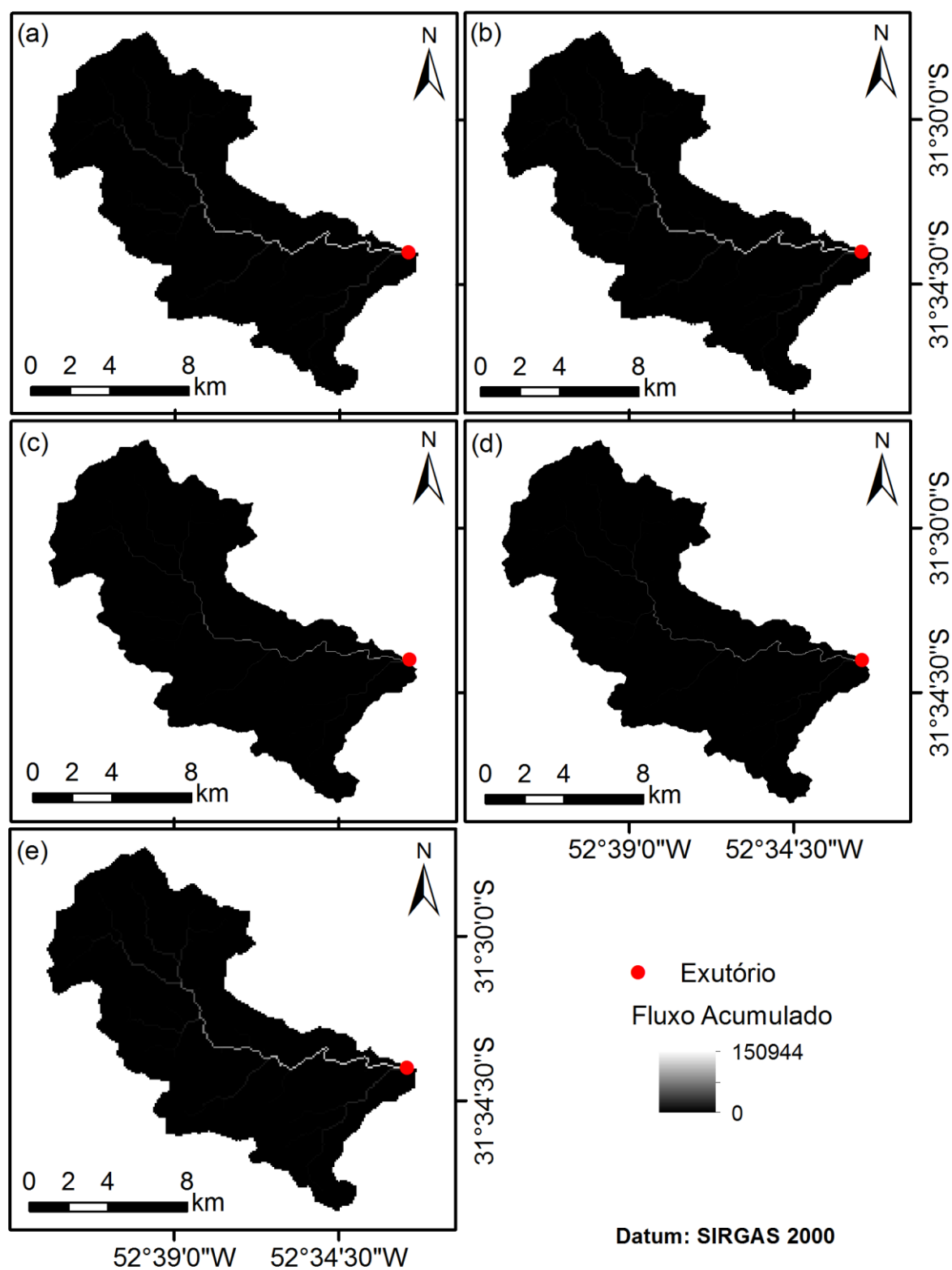


Figura A8 – Mapa de fluxo acumulado da BHAC derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

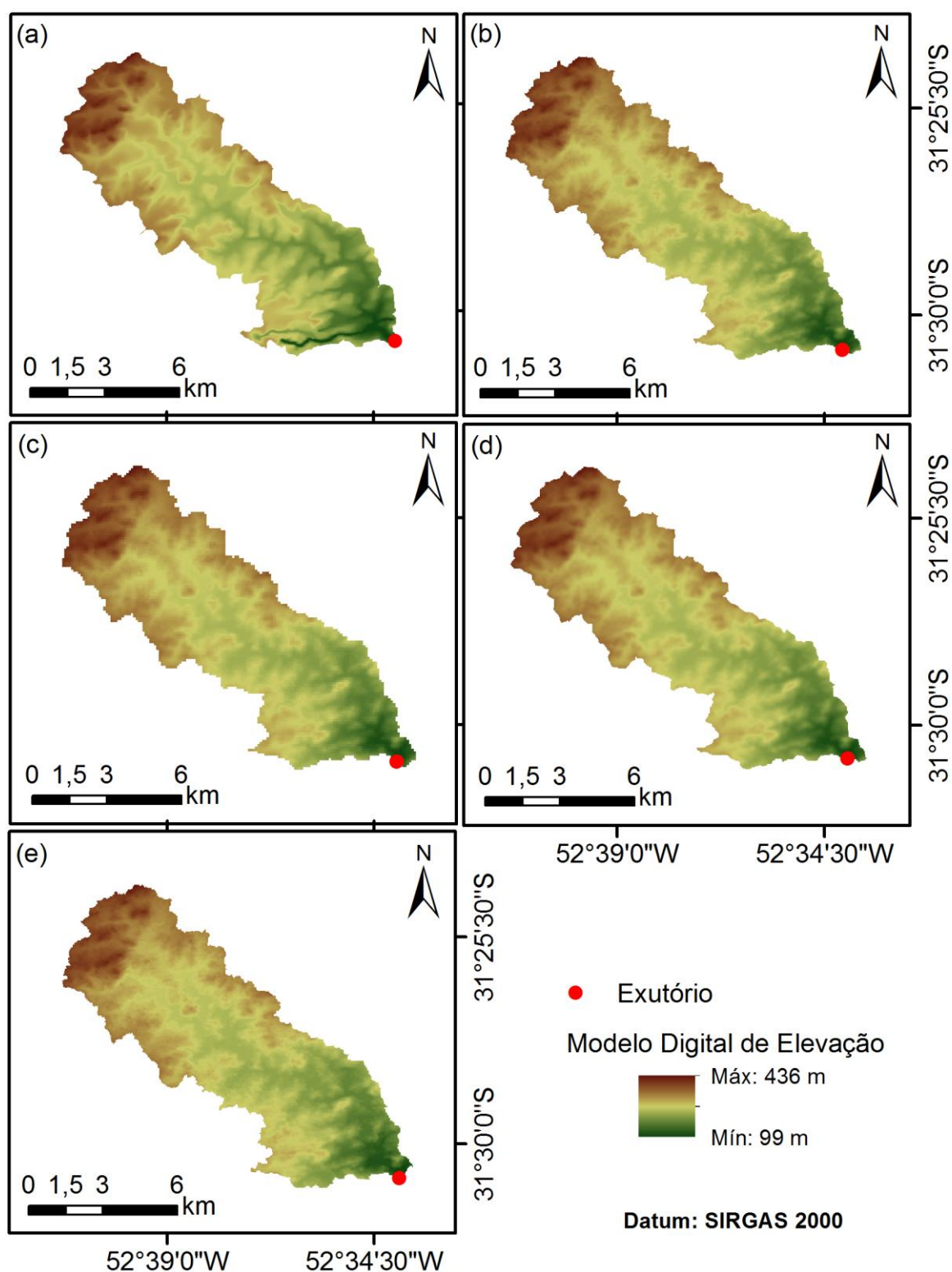


Figura A9 – Mapa de altitudes da BHACN obtido a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

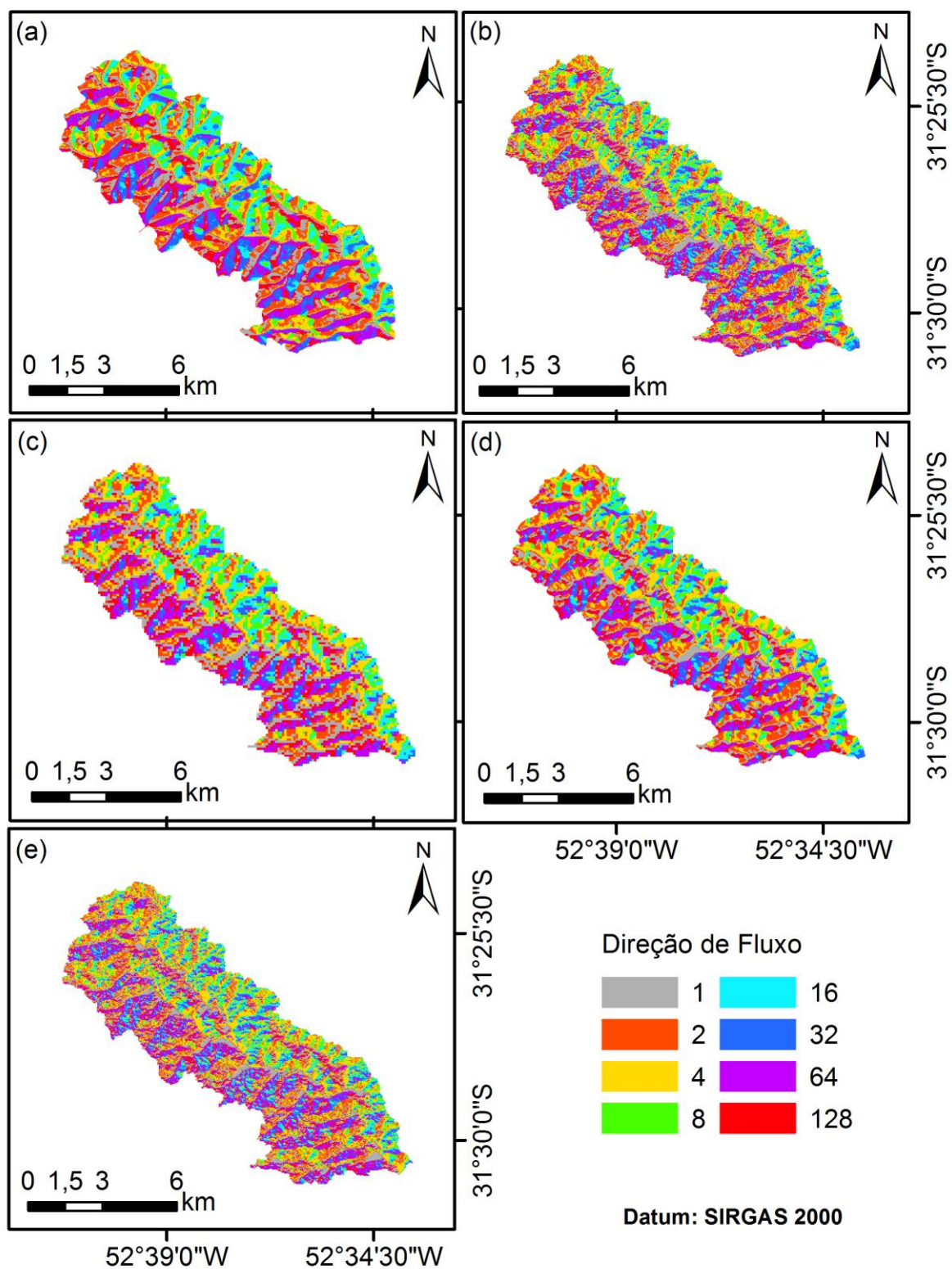


Figura A10 – Mapa de direção de fluxo da BHACN derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

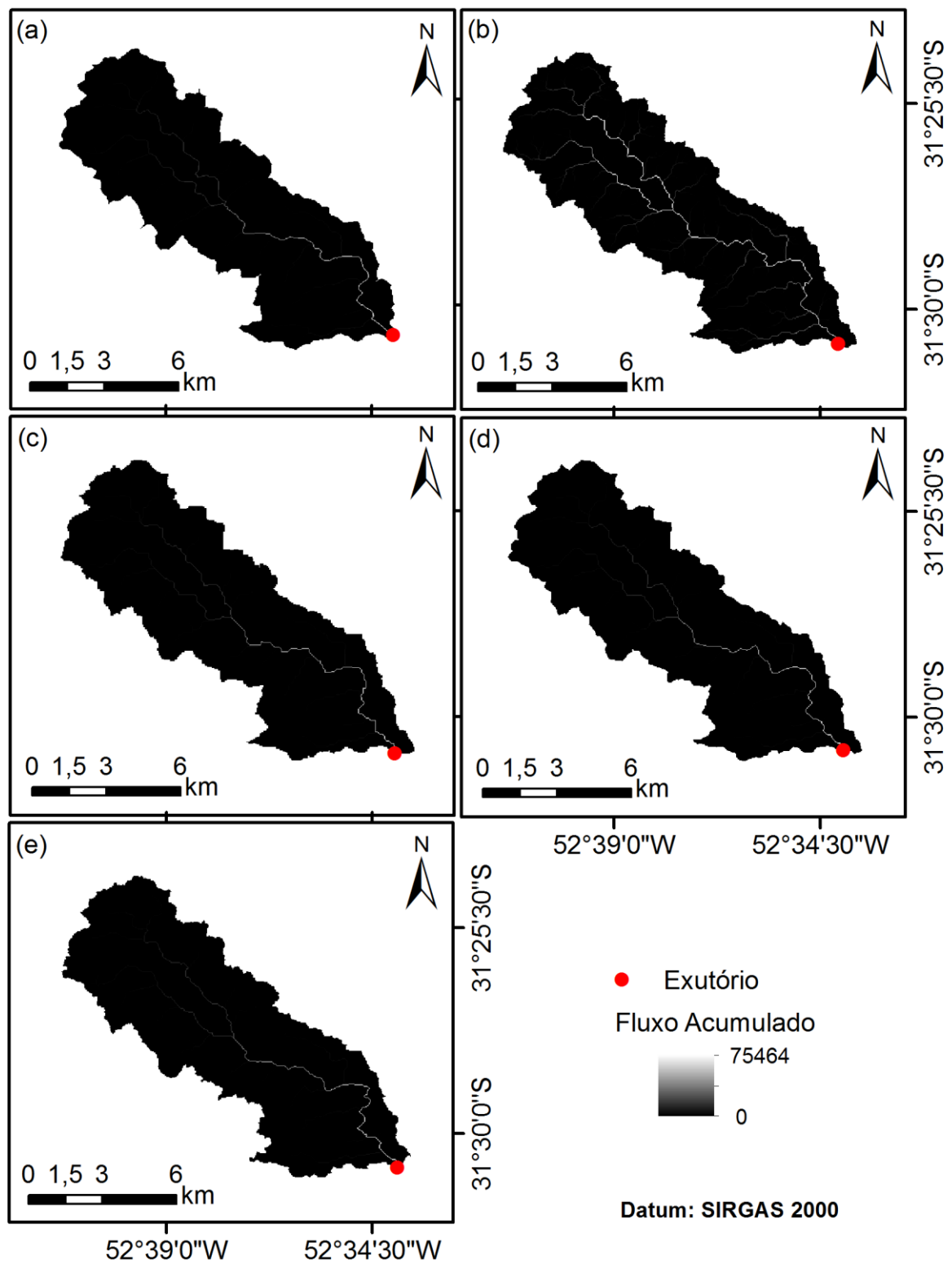


Figura A11 - Mapa de fluxo acumulado da BHACN derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

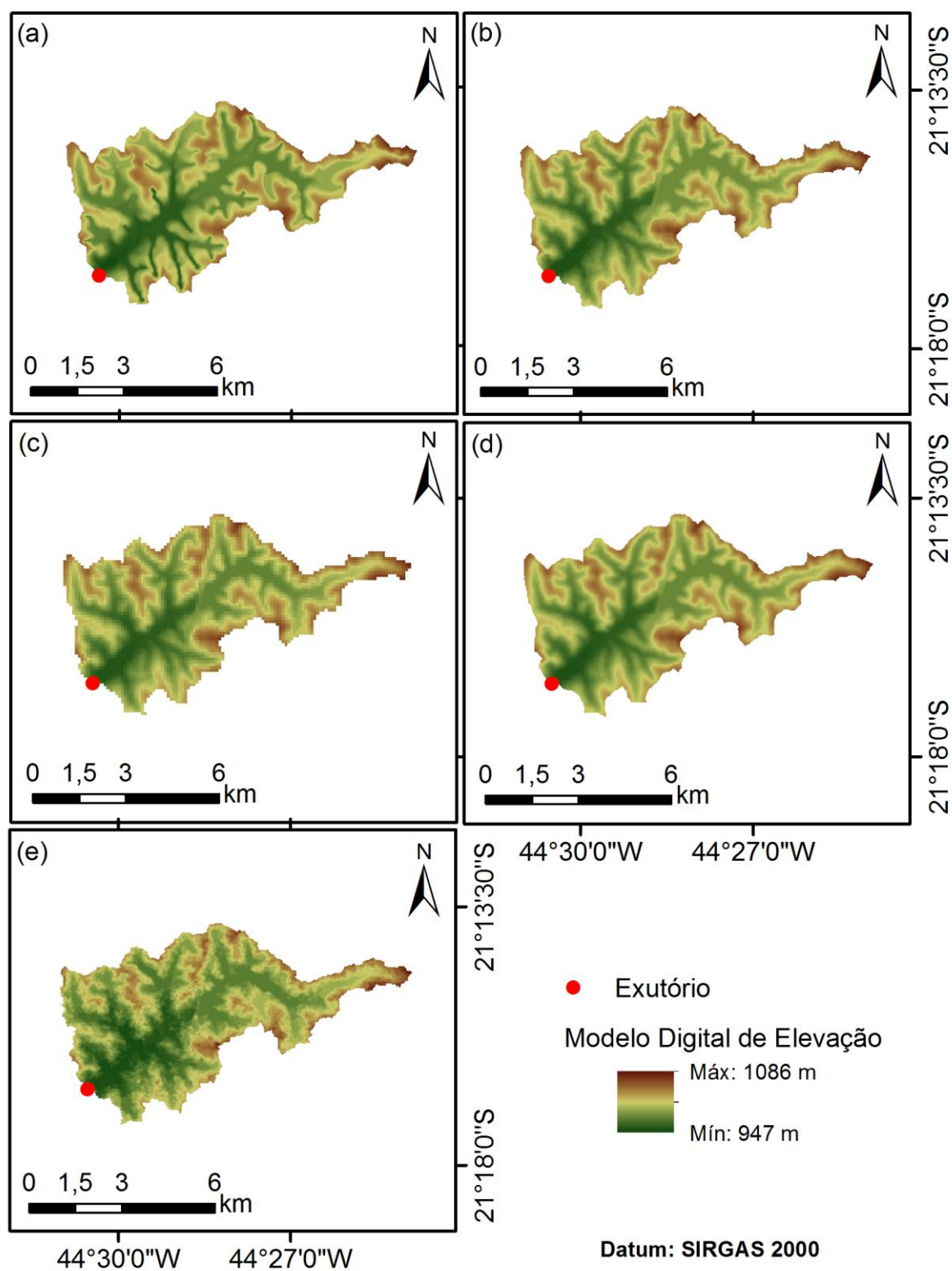


Figura A12 – Mapa de altitudes da BHRJ obtido a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

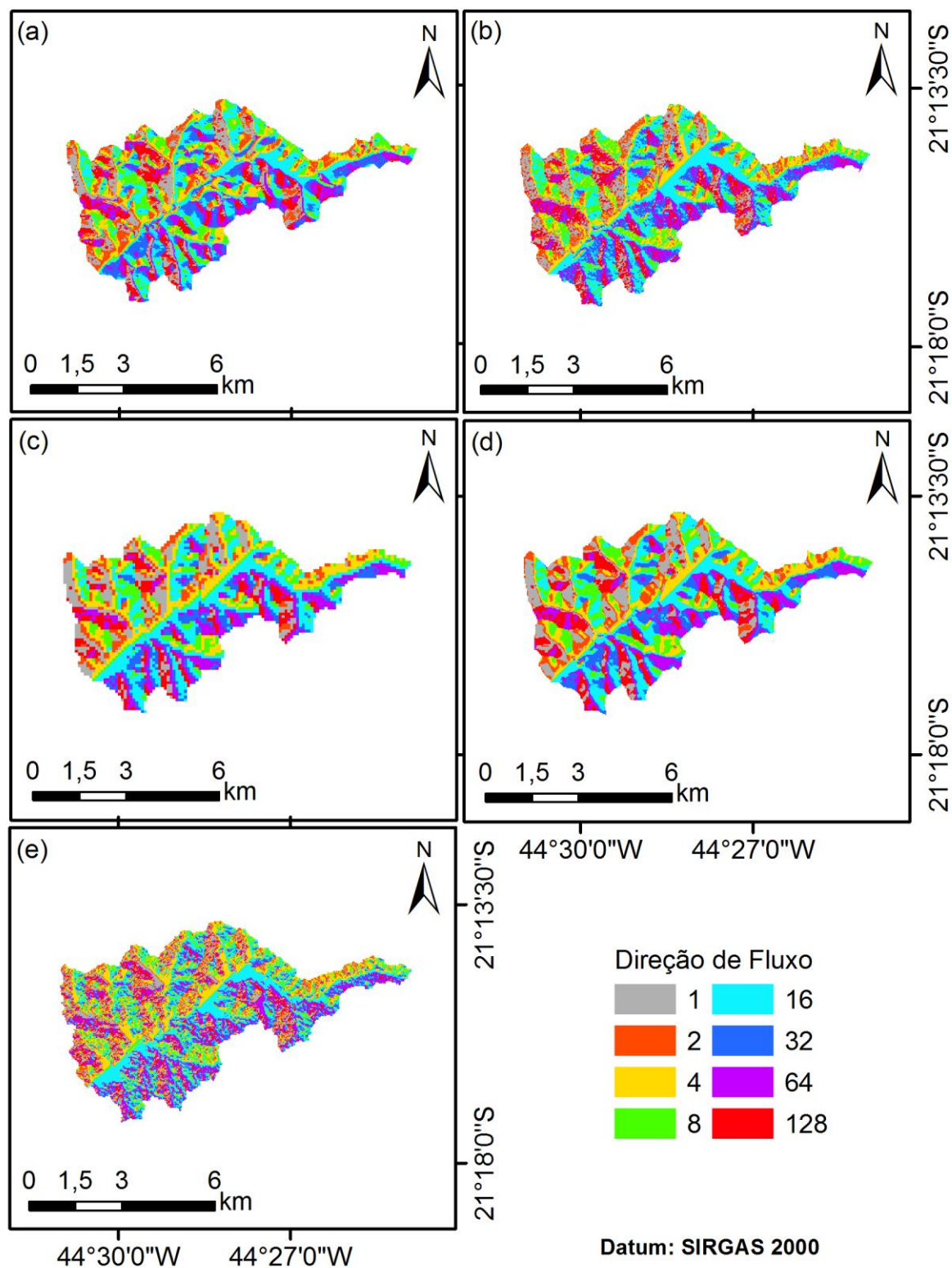


Figura A13 – Mapa de direção de fluxo da BHRJ derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

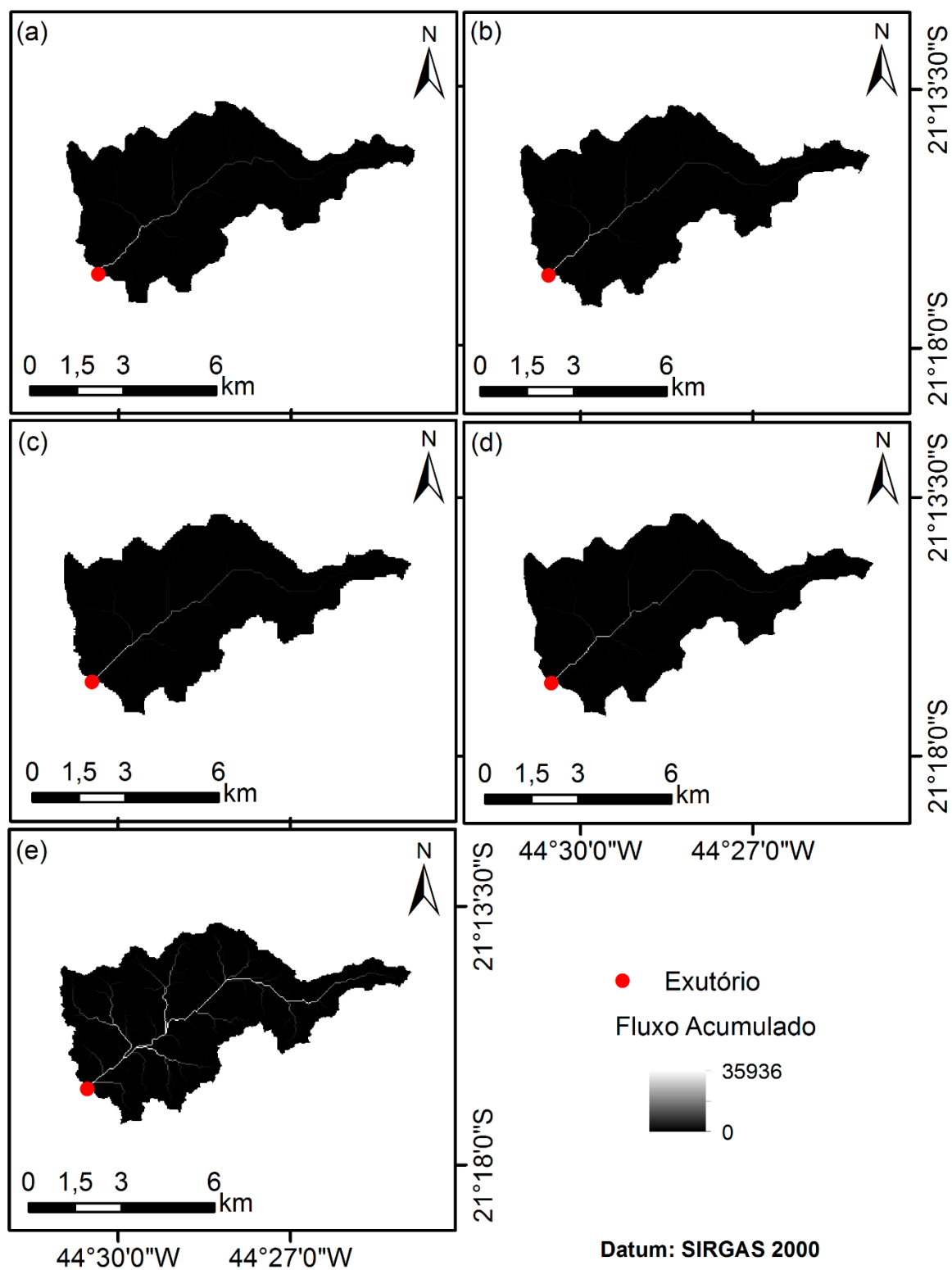


Figura A14 - Mapa de fluxo acumulado da BHRJ derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

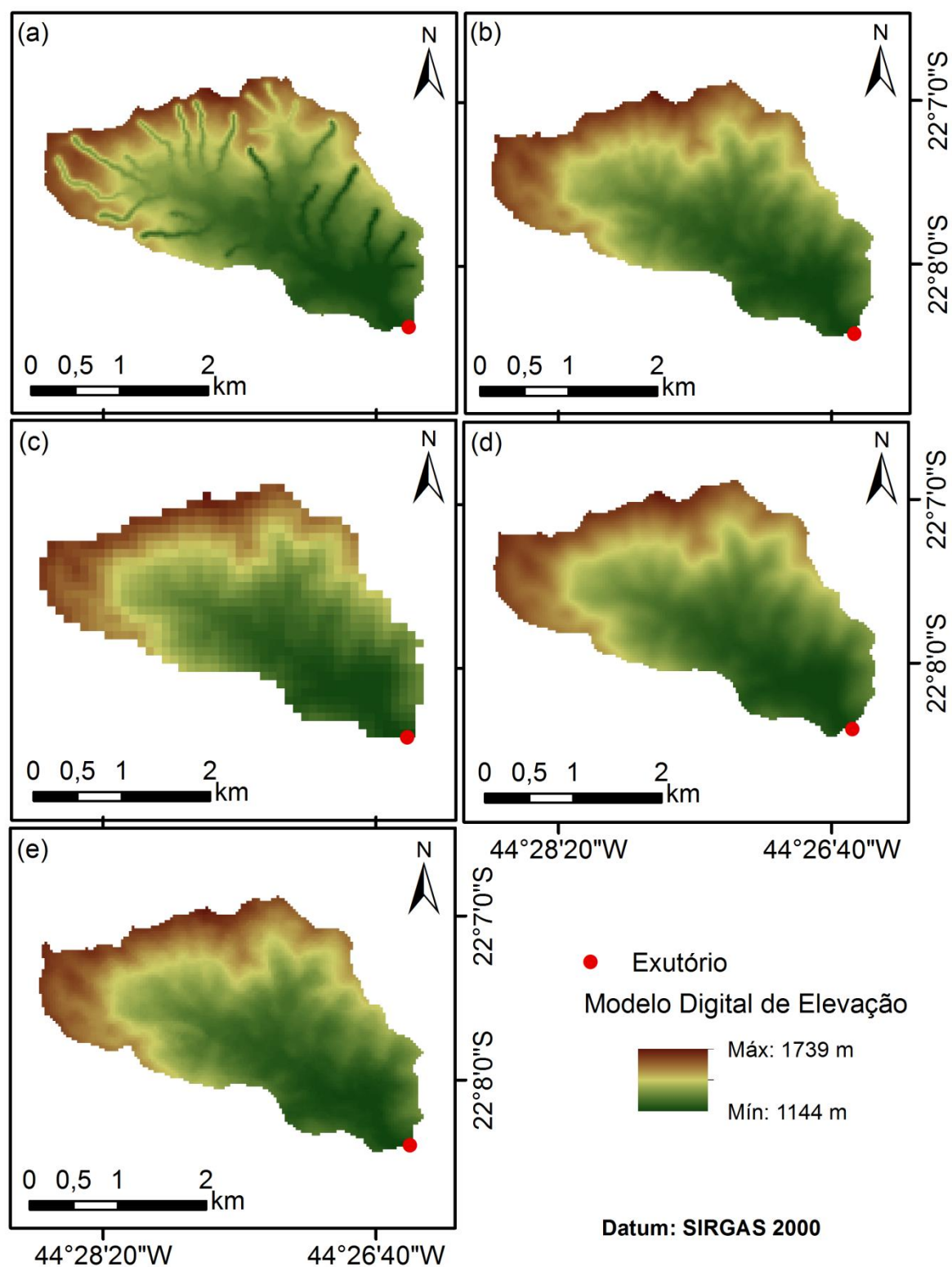


Figura A15 – Mapa de altitudes da BHRL derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

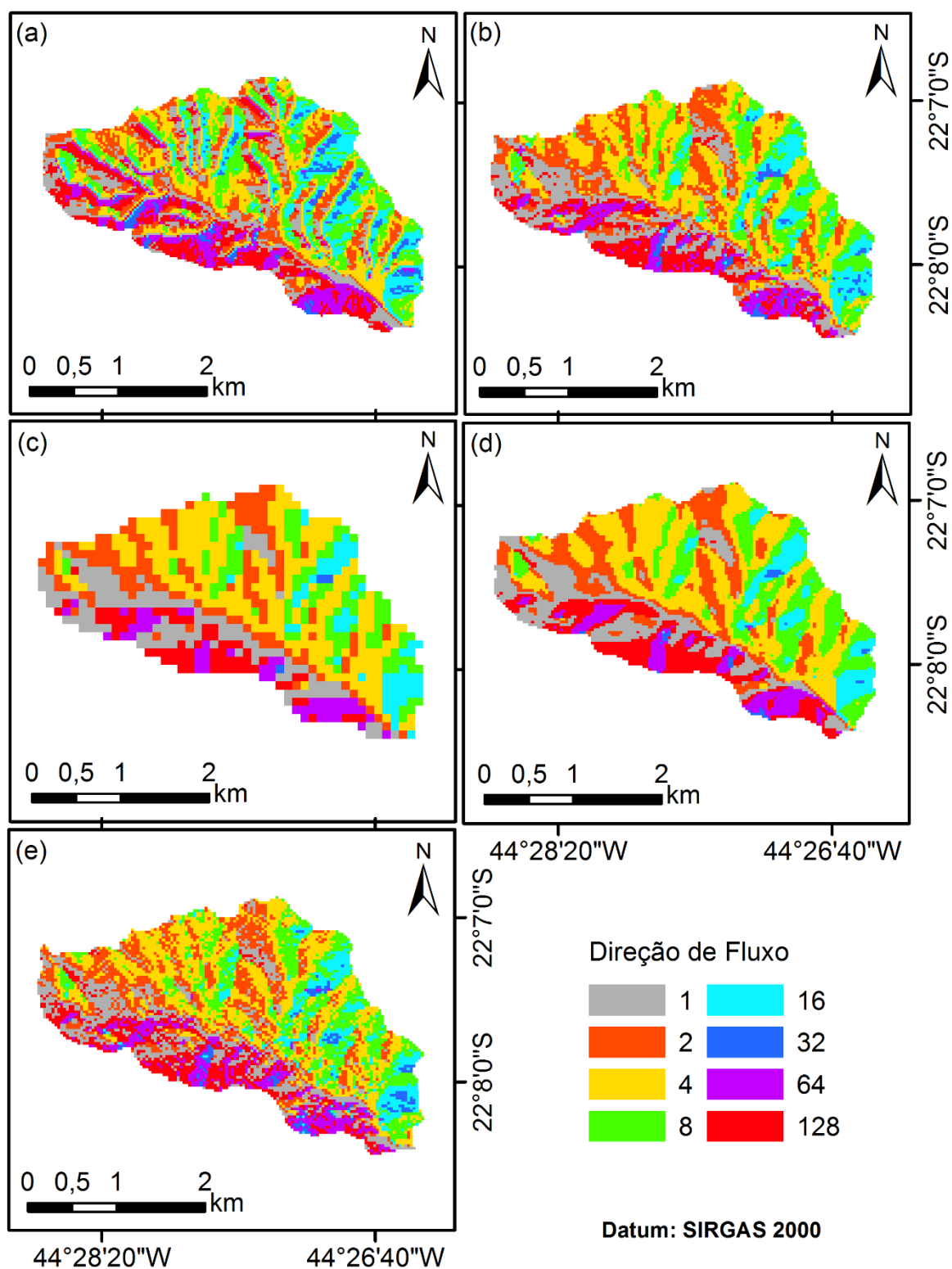


Figura A16 – Mapa de direção de fluxo da BHRL derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

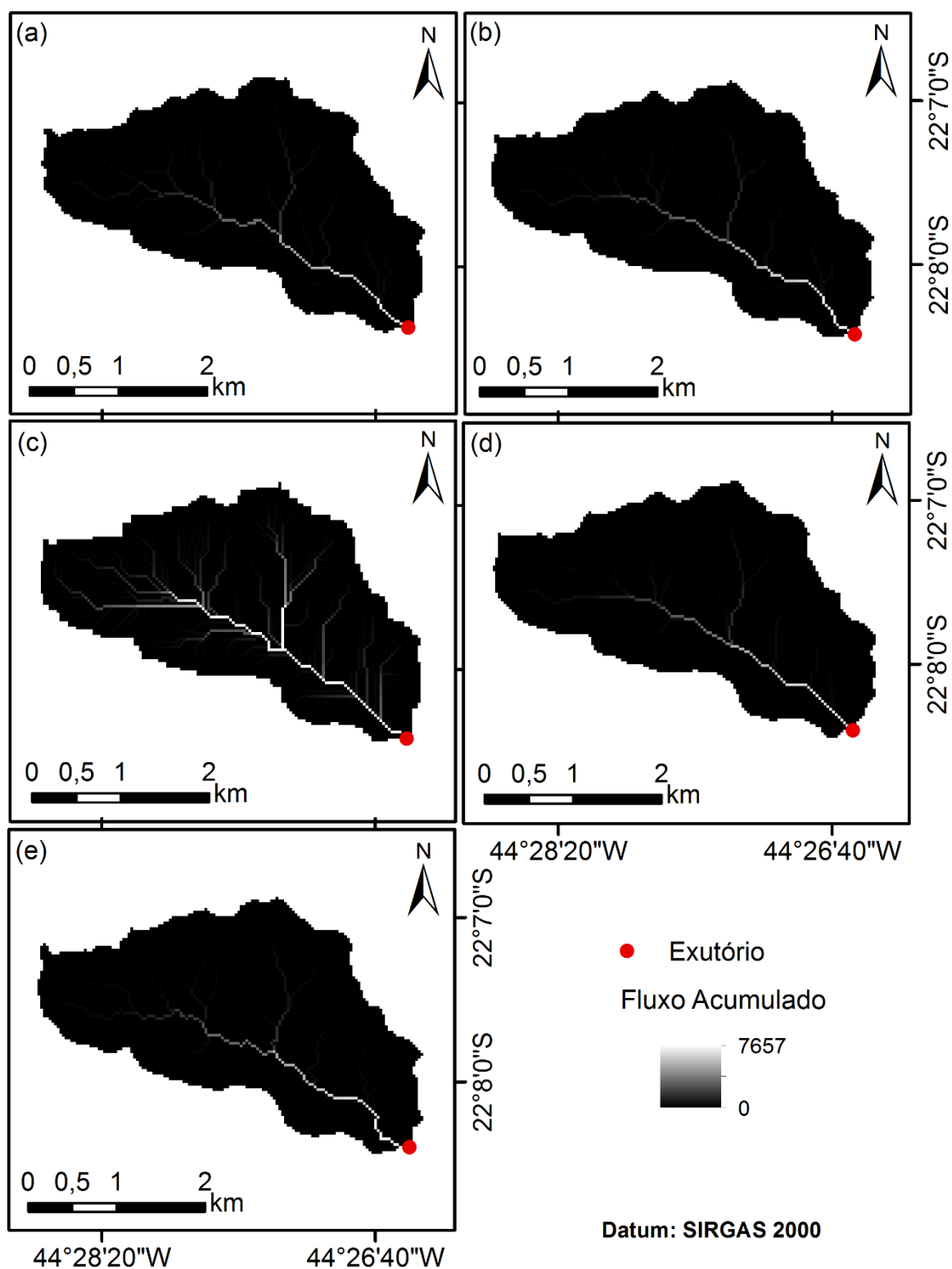


Figura A17 - Mapa de fluxo acumulado da BHRL derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

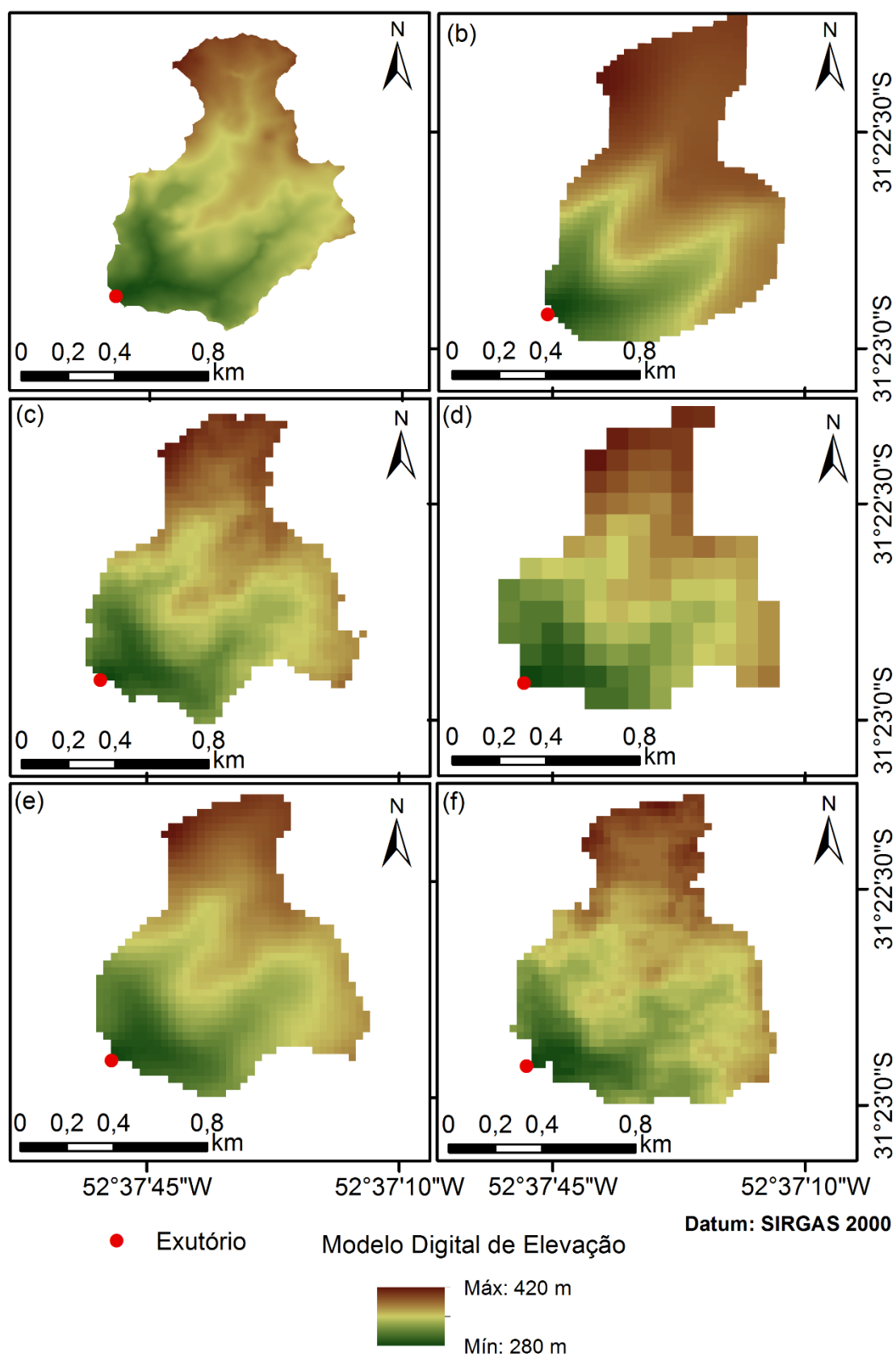


Figura A18 – Mapa de altitudes da BHSE derivado dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

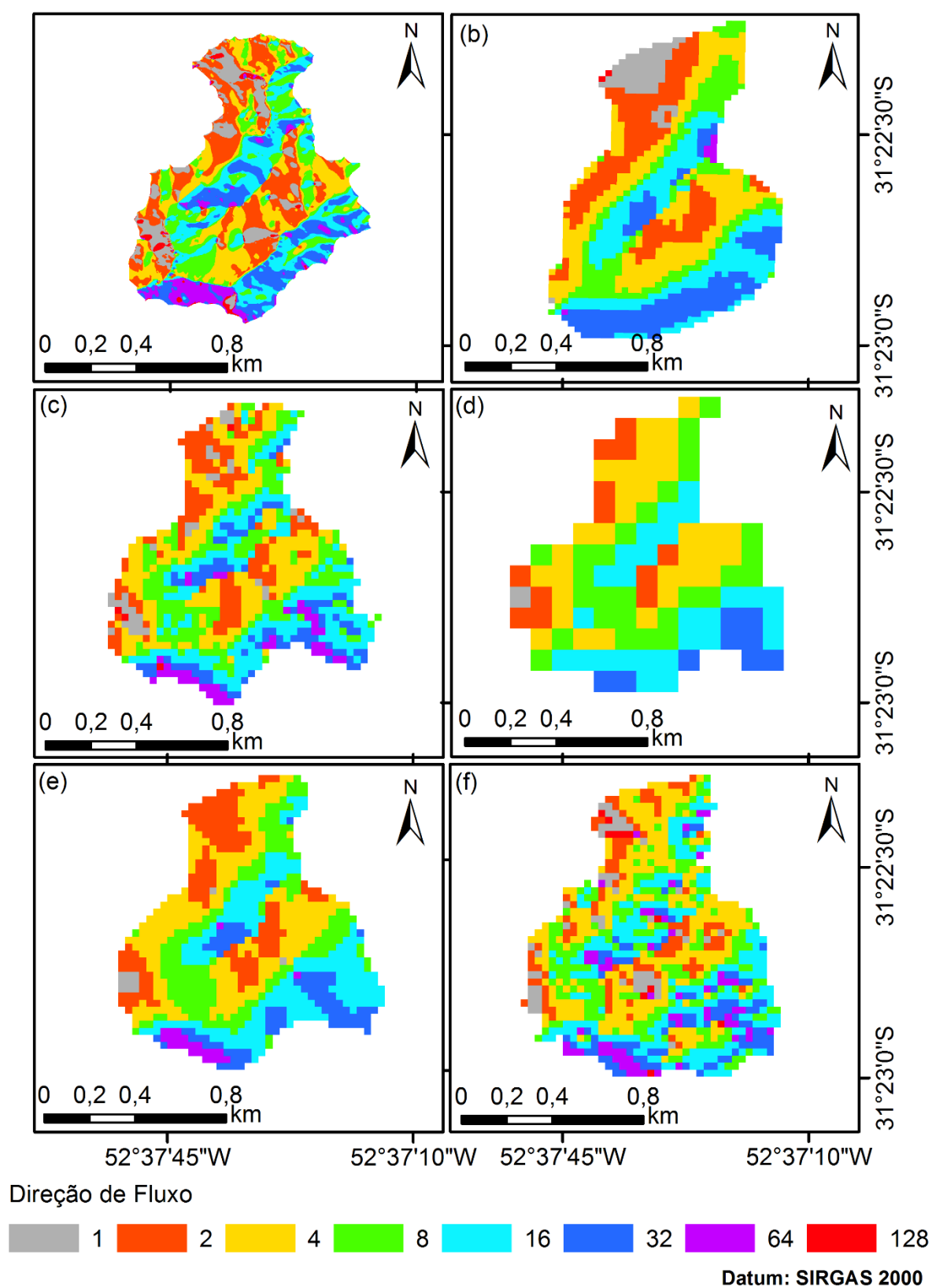


Figura A19 – Mapa de direção de fluxo da BHSE derivado dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

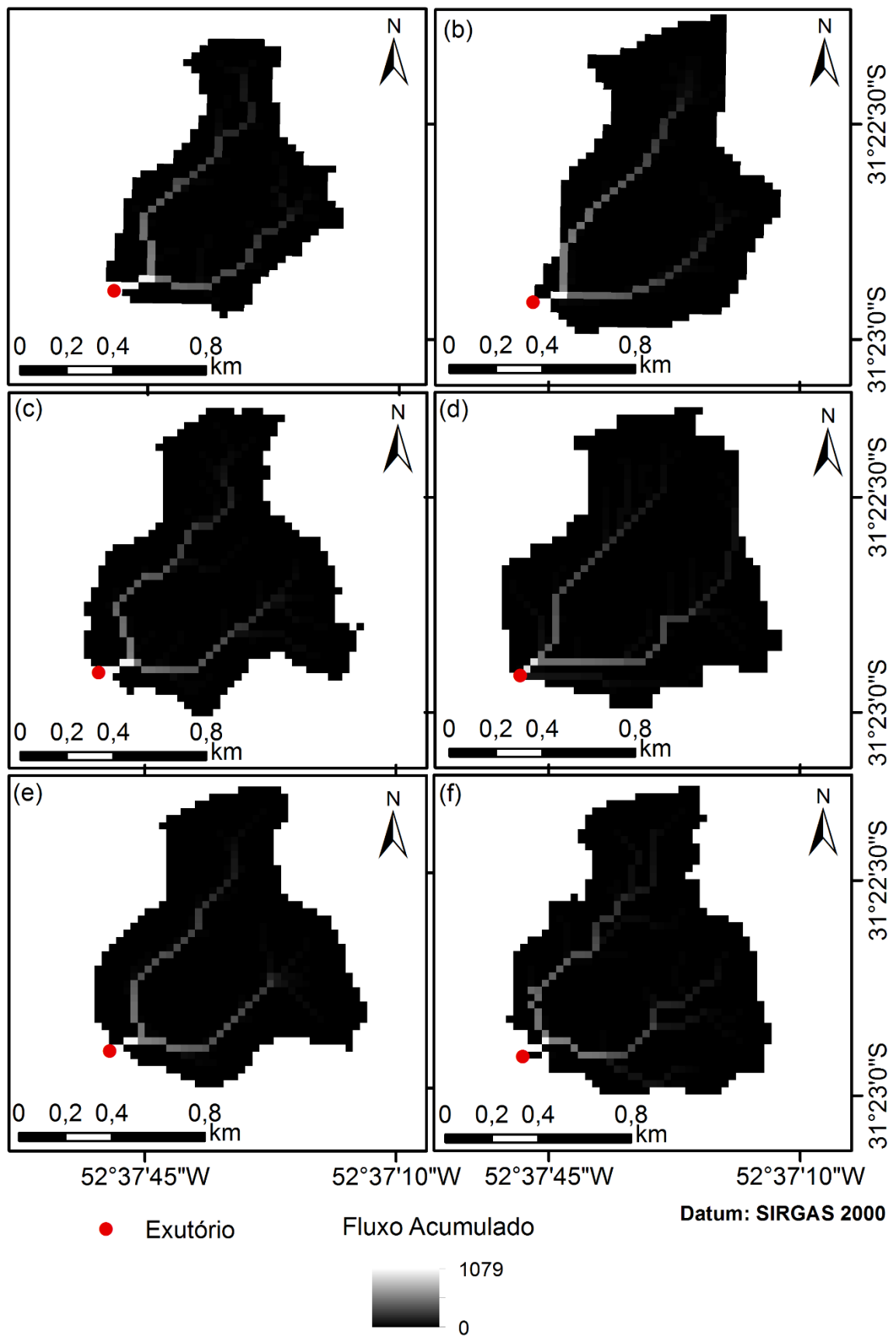


Figura A20 – Mapa de fluxo acumulado da BHSE derivado dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

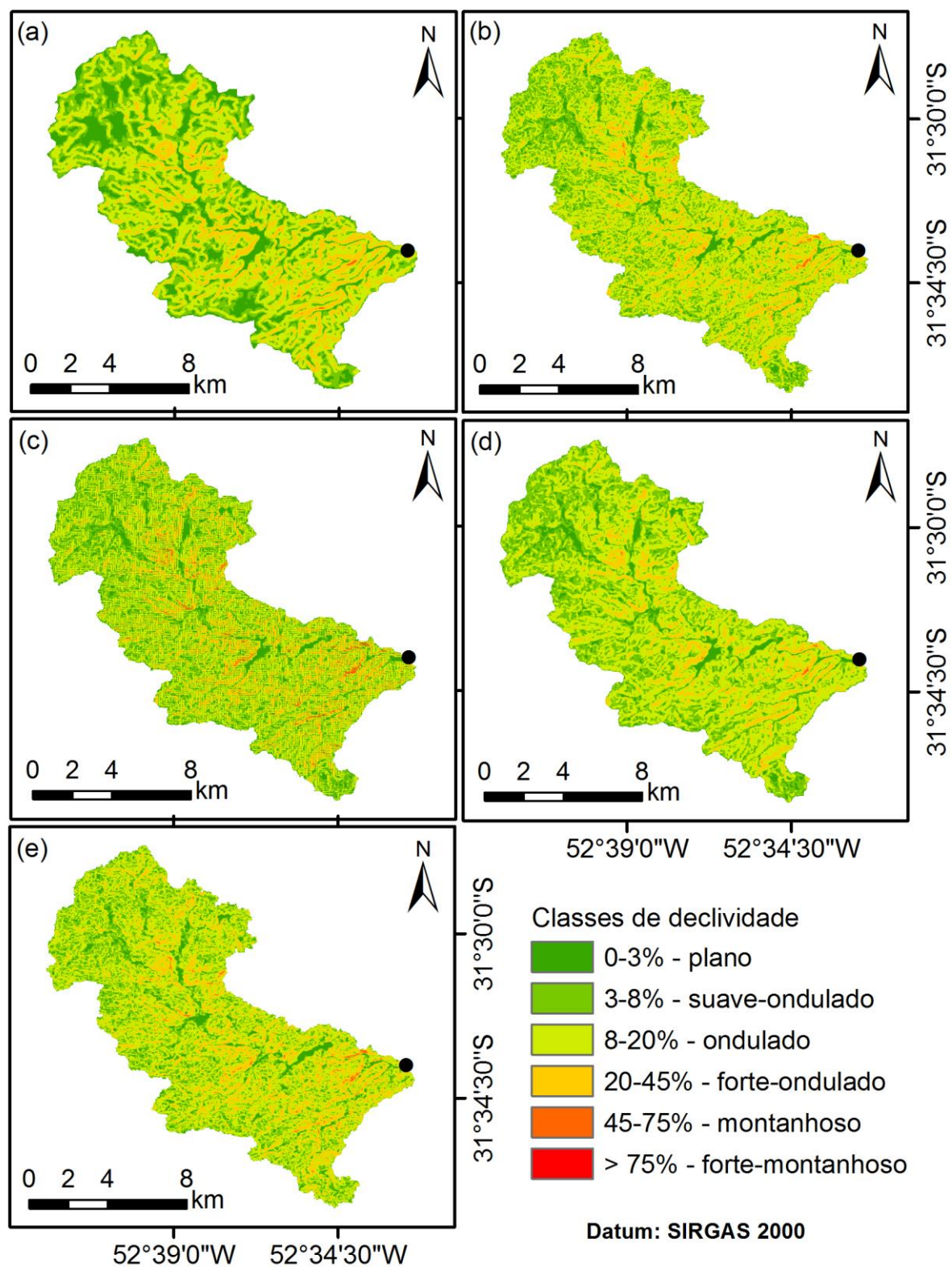


Figura A21 – Mapa de declividade da BHAC, segundo classificação de EMBRAPA (1979), derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

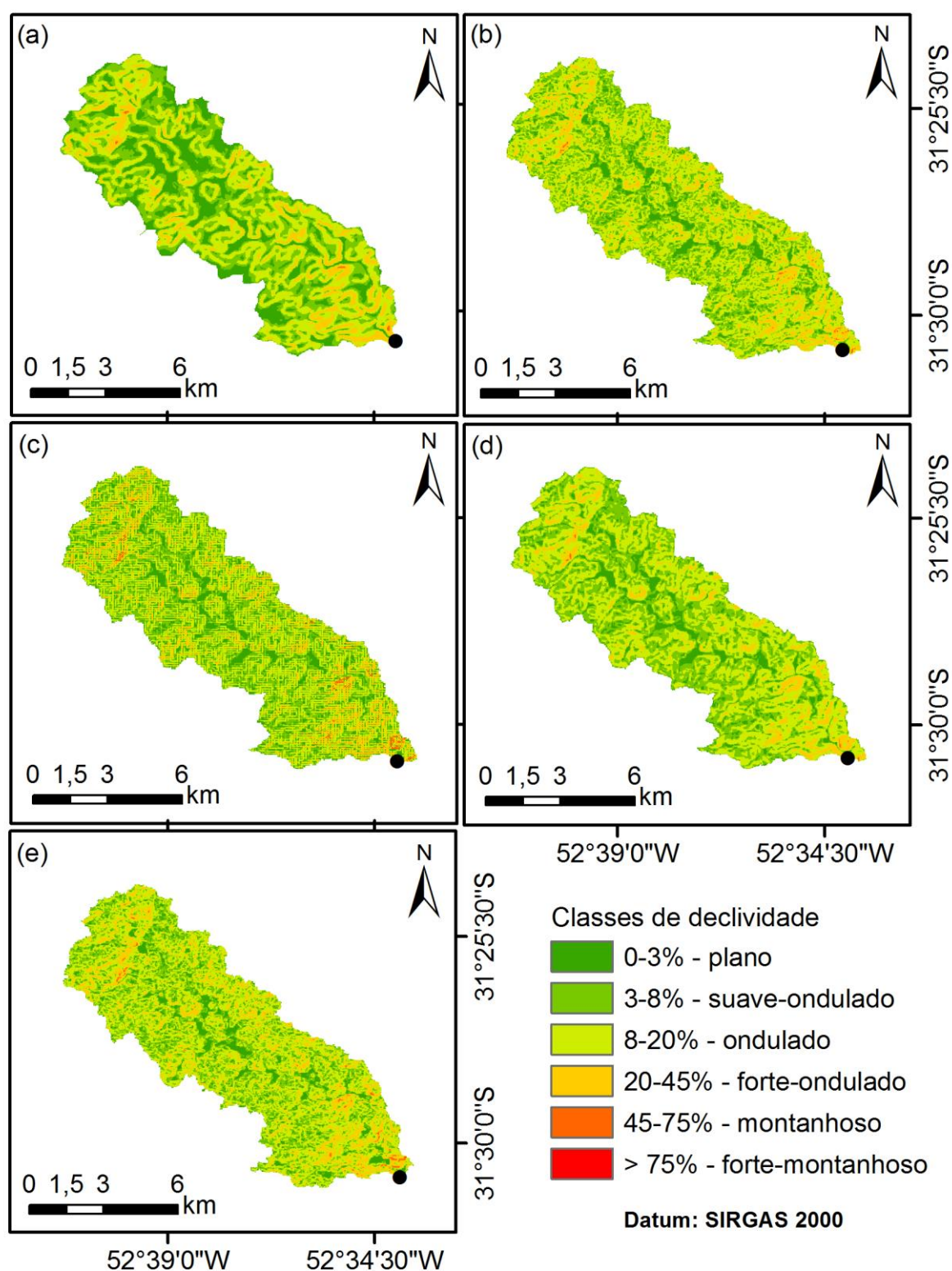


Figura A22 – Mapa de declividade da BHACN, segundo classificação de EMBRAPA (1979), derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

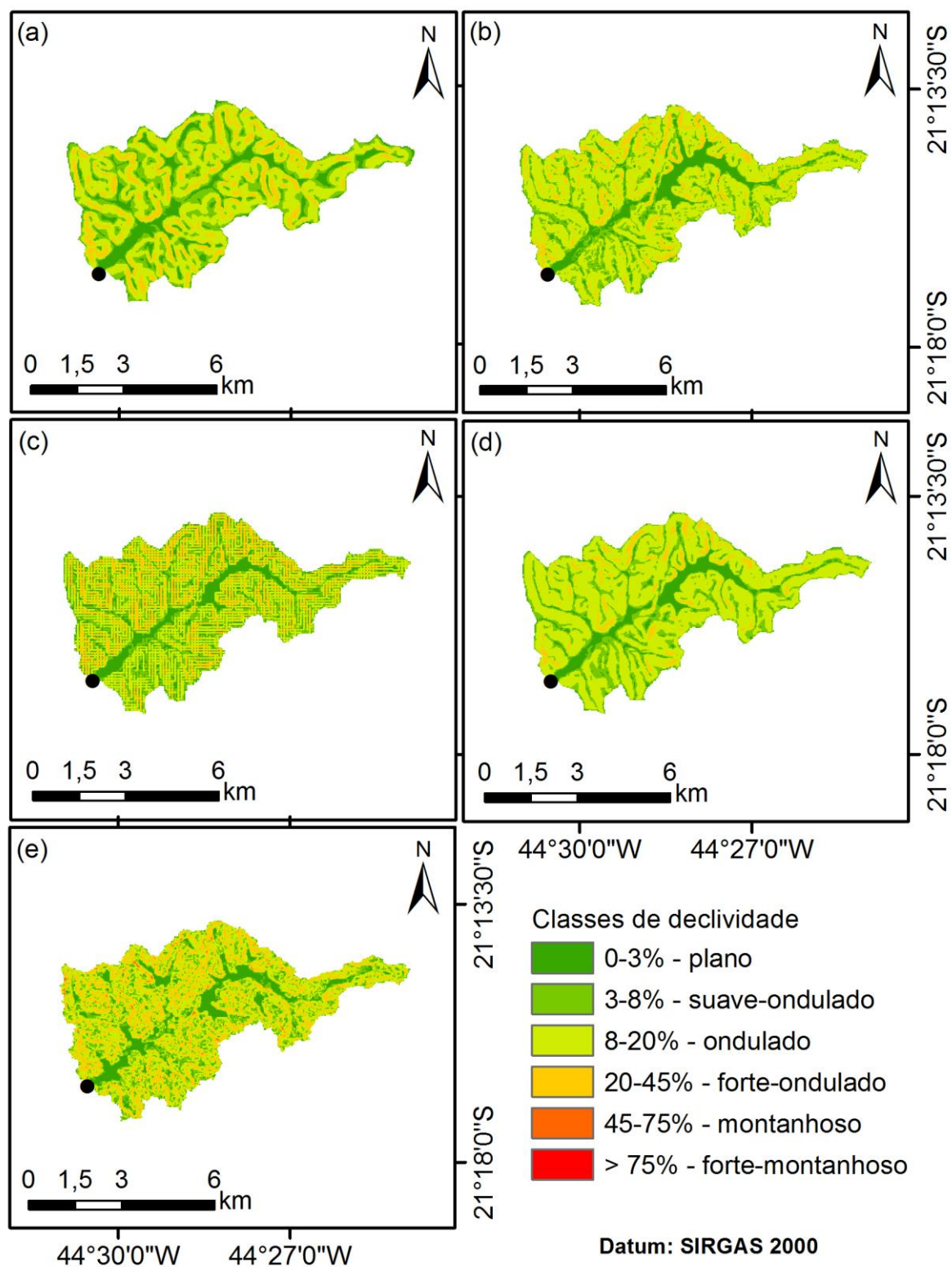


Figura A23 – Mapa de declividade da BHRJ, segundo classificação de EMBRAPA (1979), derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

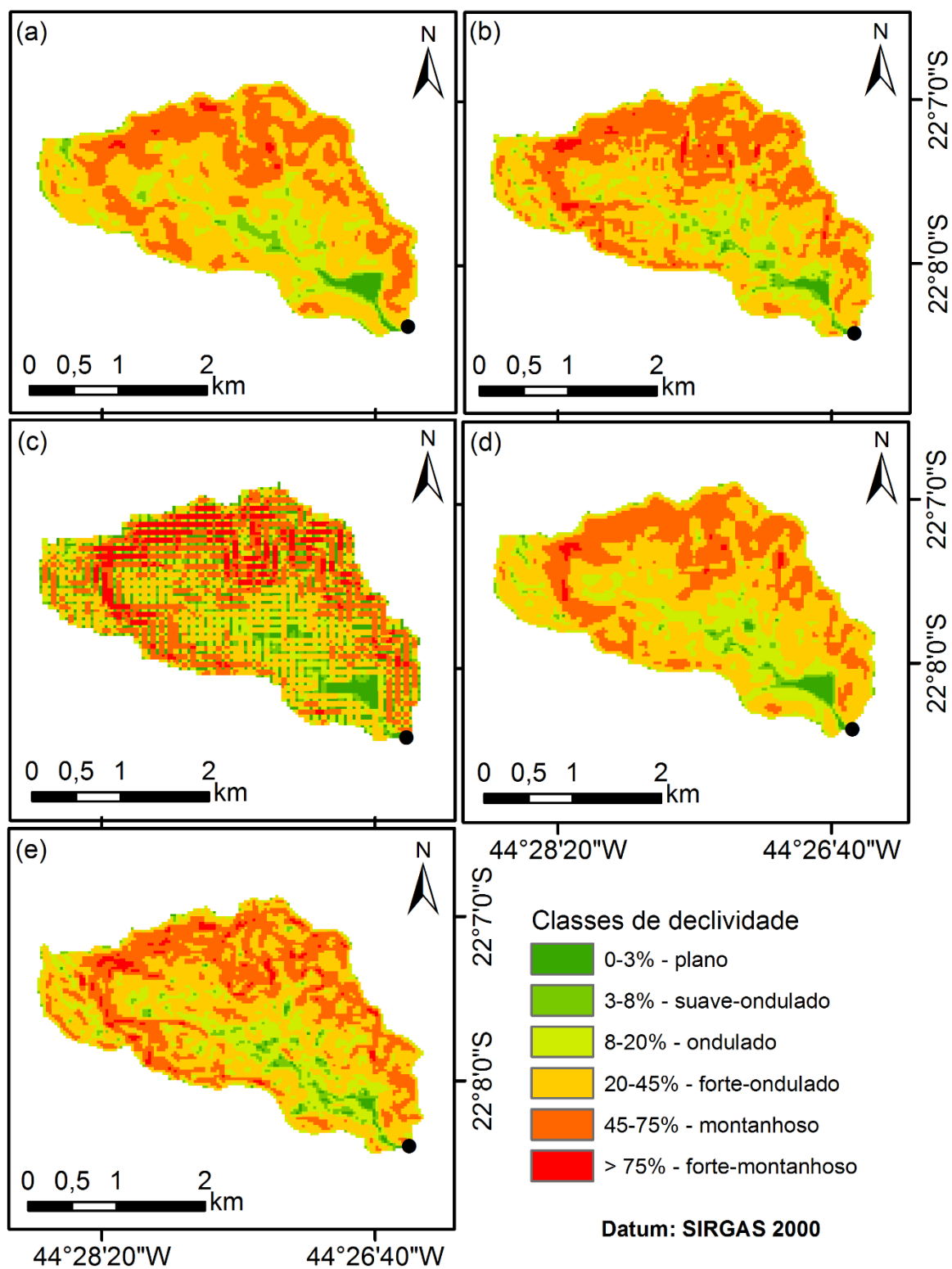
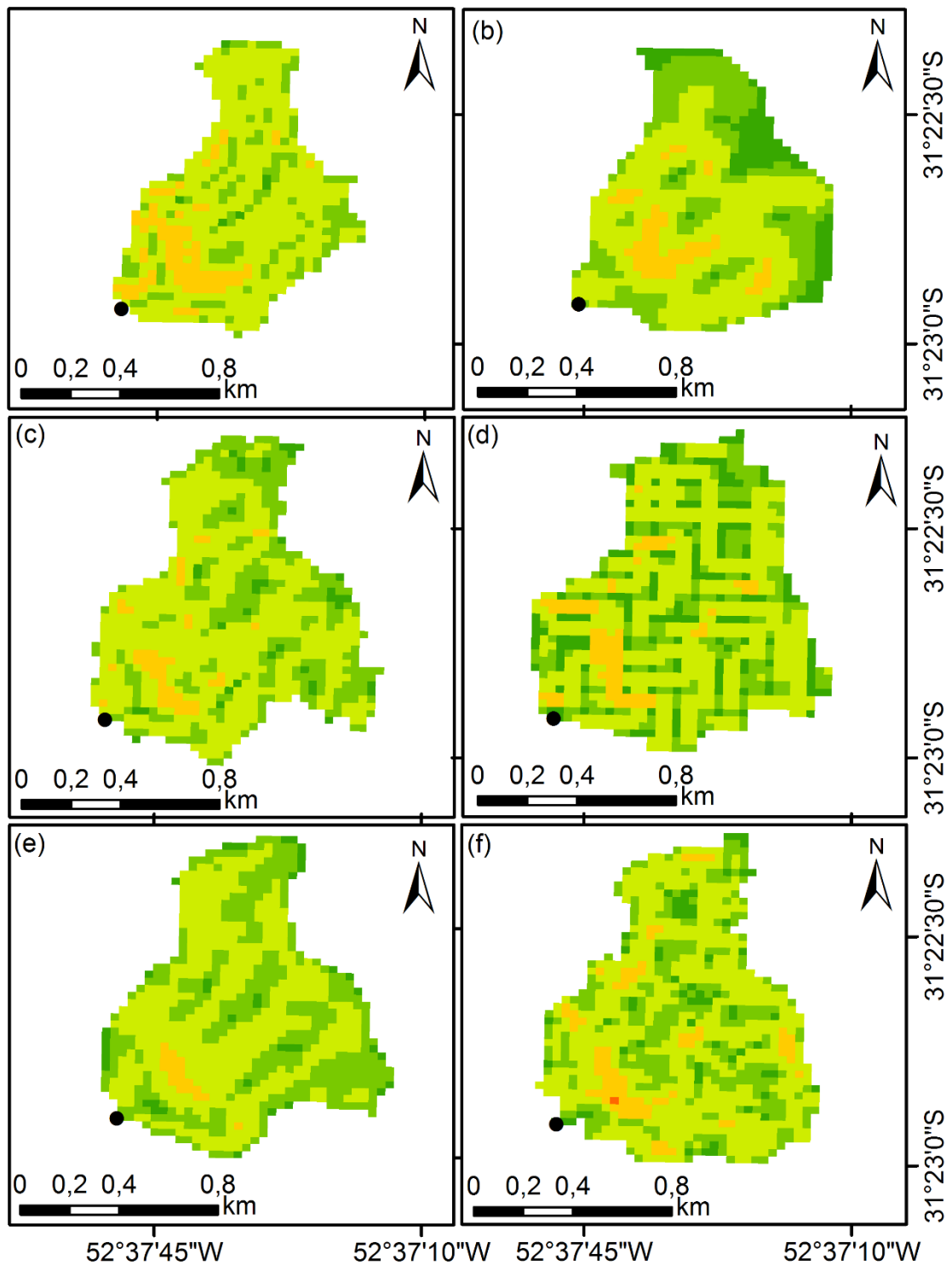


Figura A24 – Mapa de declividade da BHRL, segundo classificação de EMBRAPA (1979), derivado dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).



Classes de declividade



Datum: SIRGAS 2000

Figura A25 – Mapa de declividade da BHSE, segundo classificação de EMBRAPA (1979), derivado dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

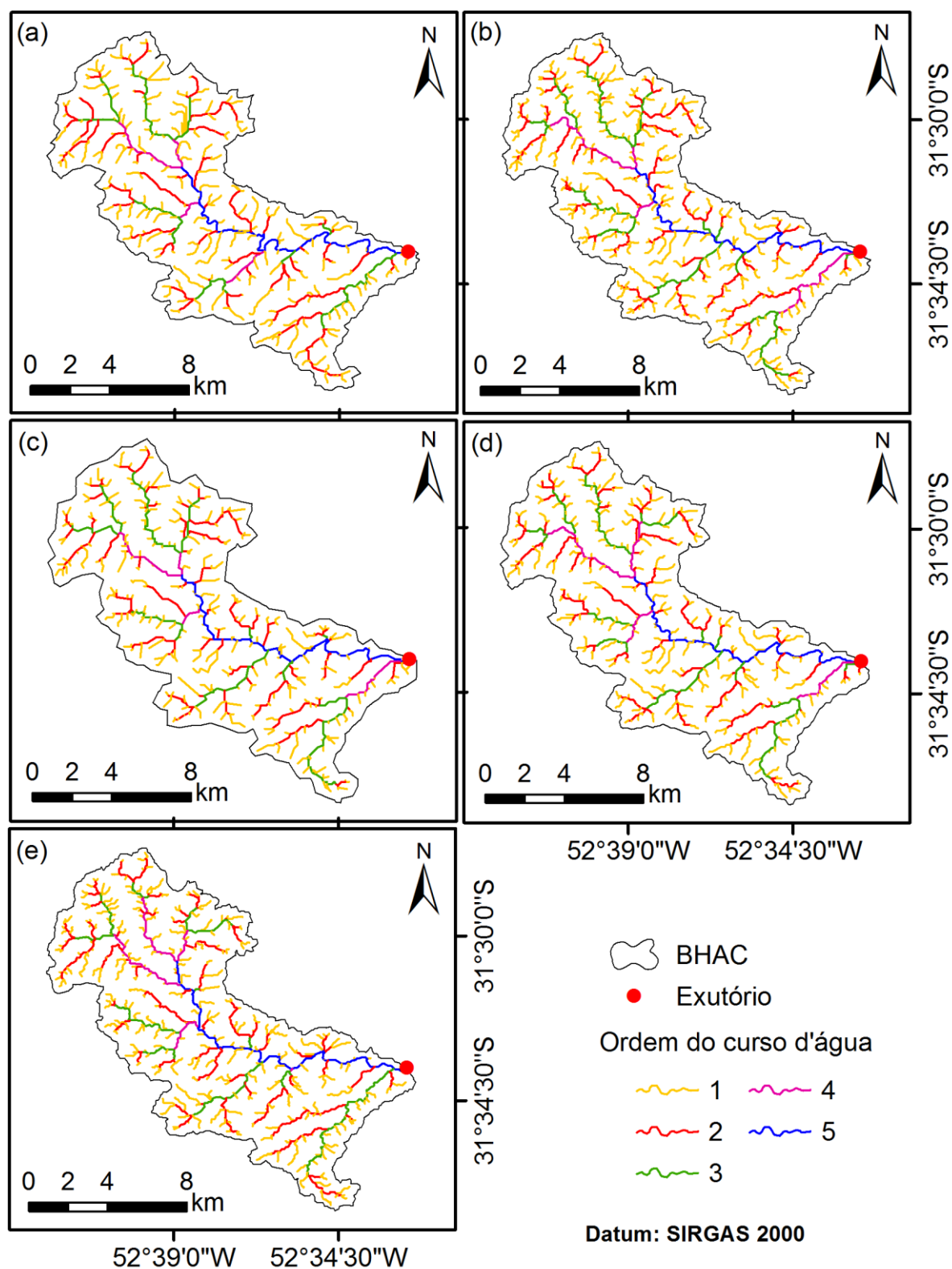


Figura A26 – Ordem dos cursos d'água da BHAC, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

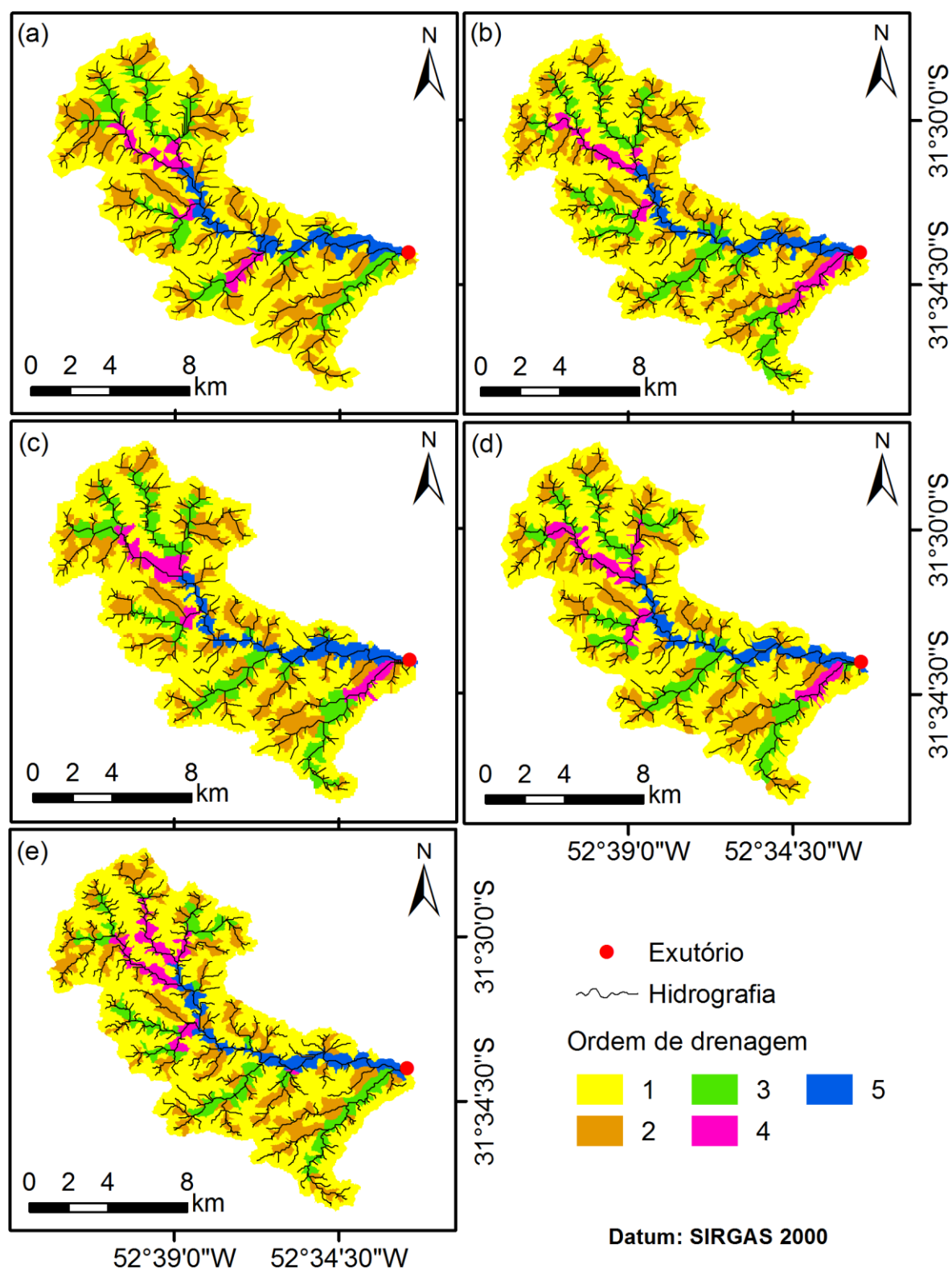


Figura A27 – Área de drenagem por ordem dos cursos d'água para a BHAC, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

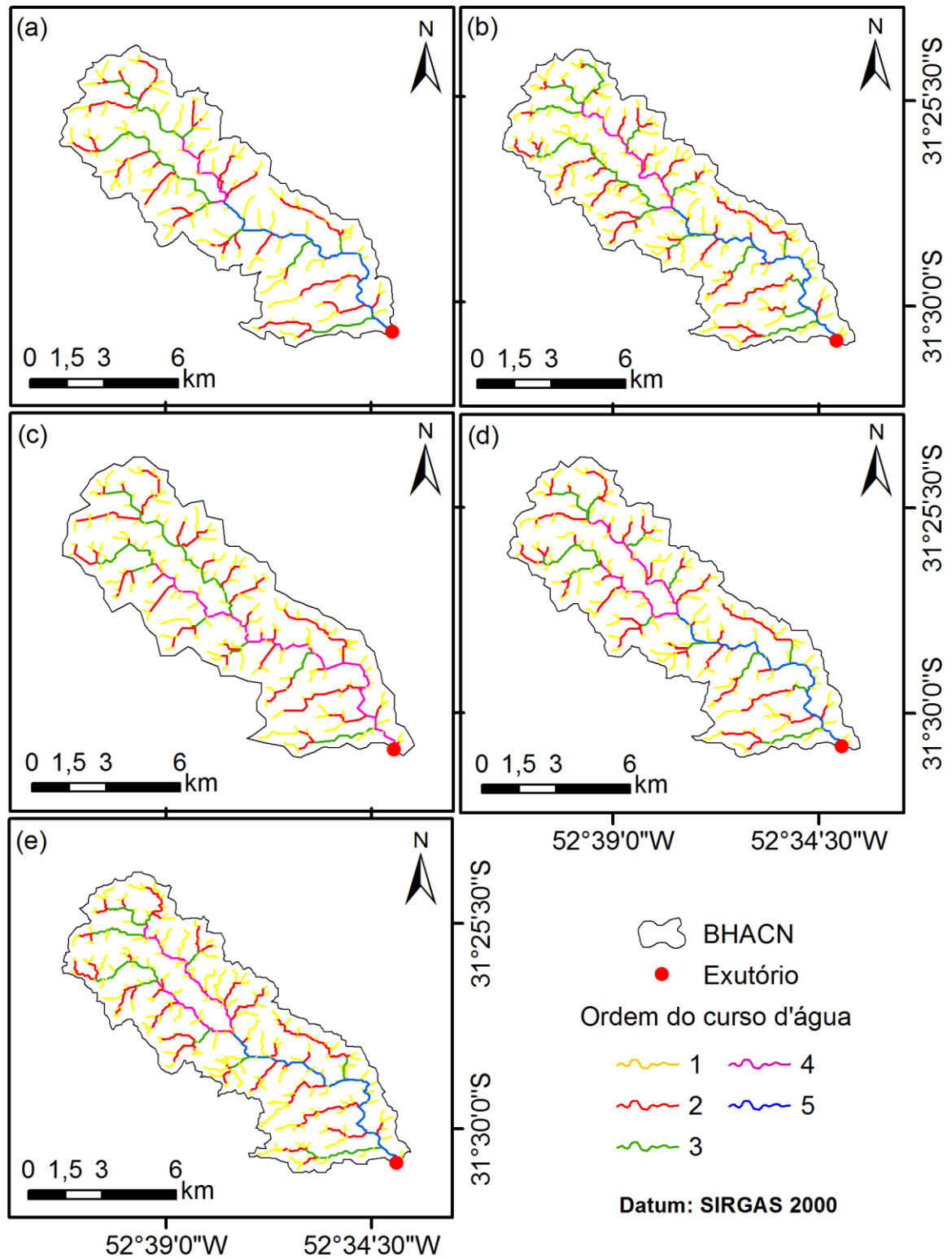


Figura A28 - Ordem dos cursos d'água da BHACN, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

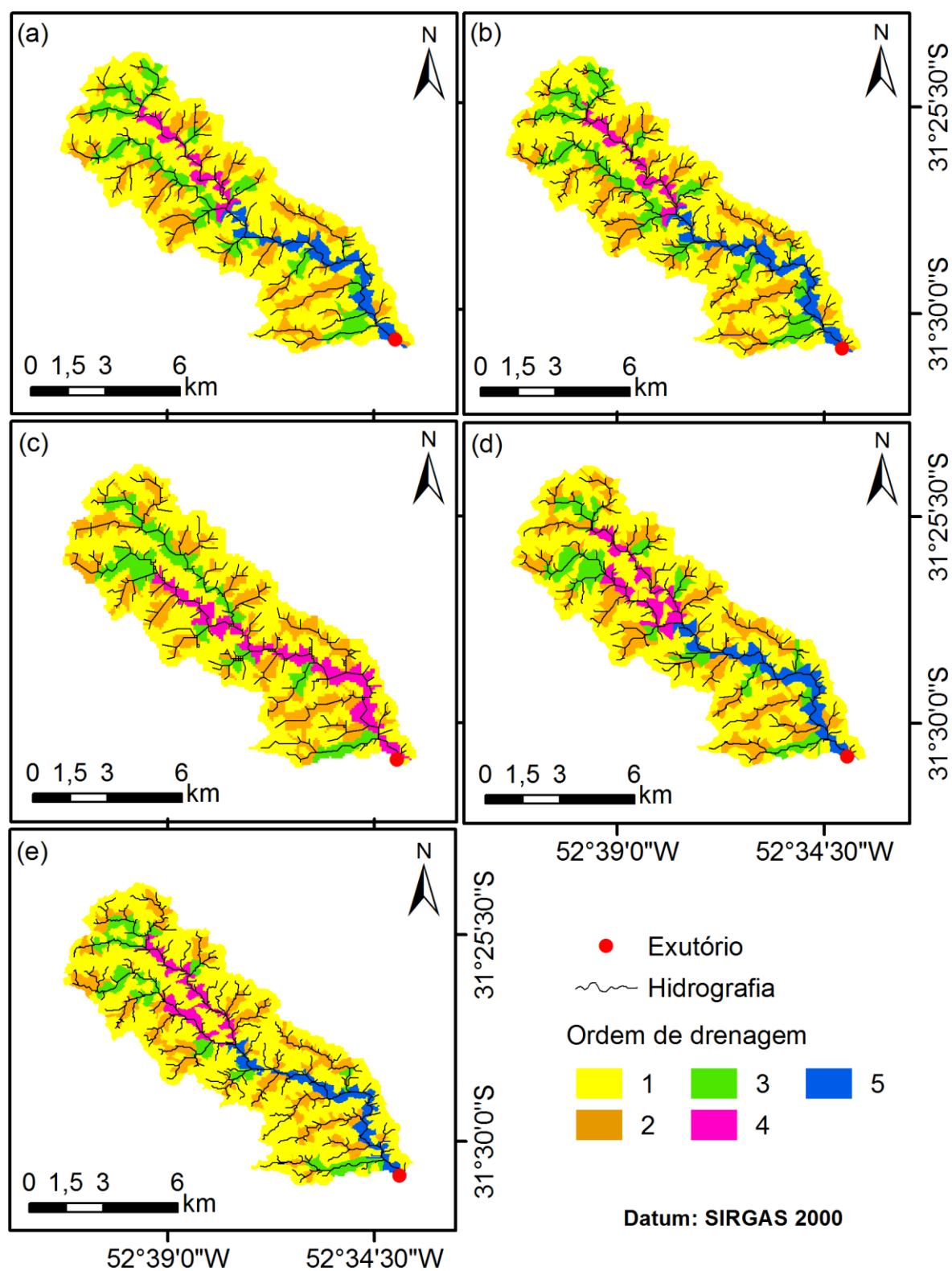


Figura A29 - Área de drenagem por ordem dos cursos d'água para a BHACN, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

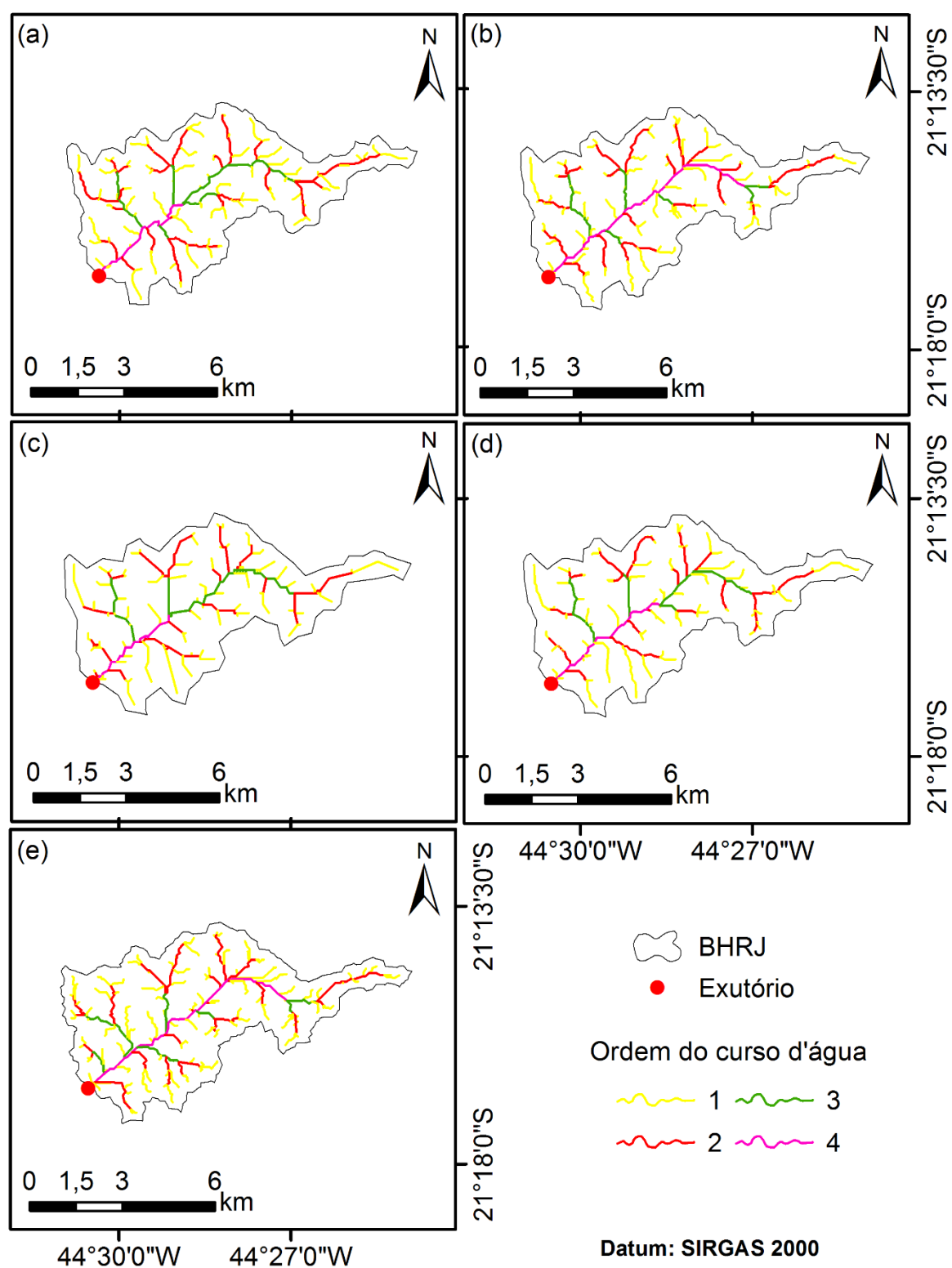


Figura A30 - Ordem dos cursos d'água da BHRJ, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

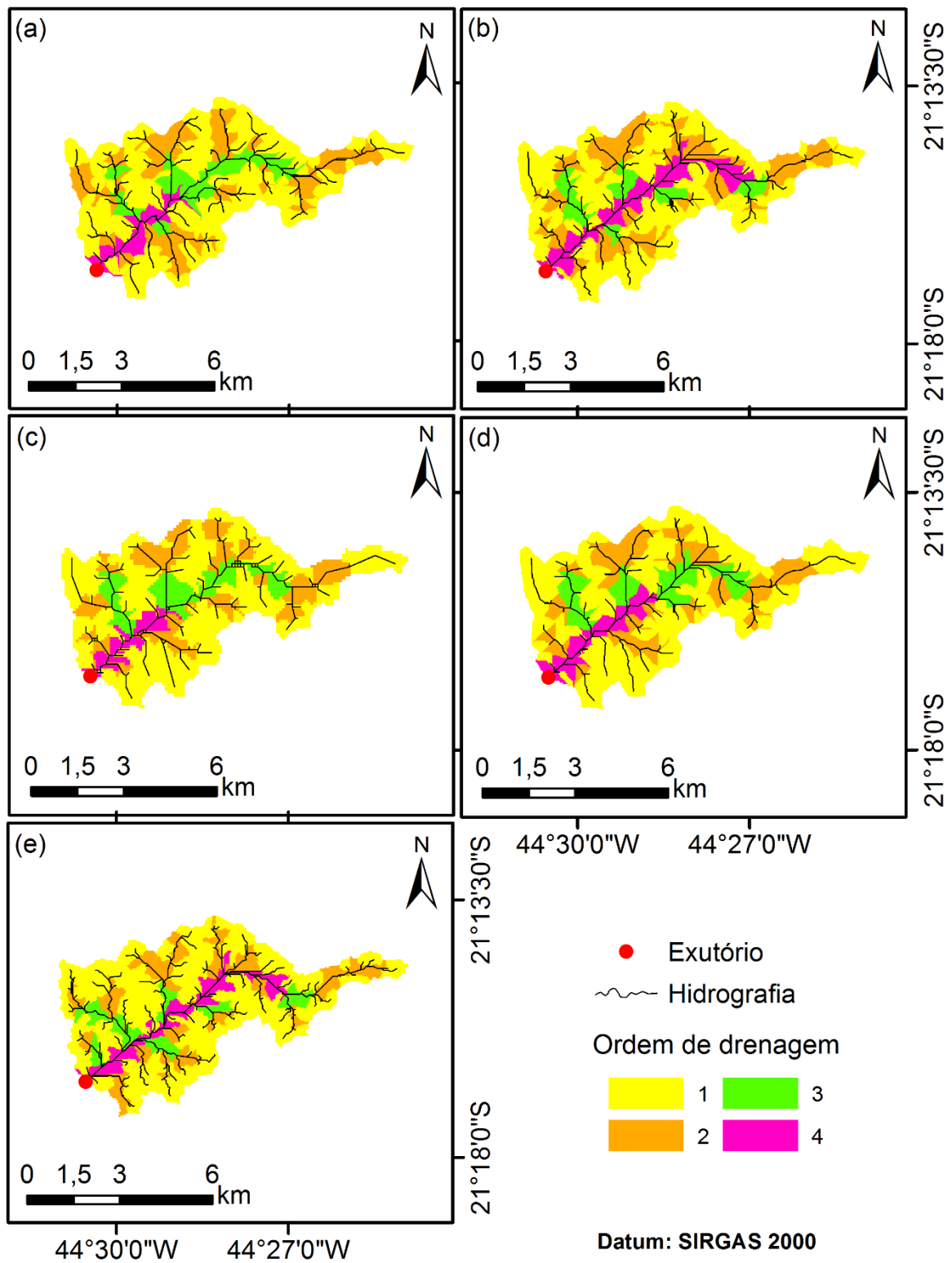


Figura A31 - Área de drenagem por ordem dos cursos d'água para a BHARJ, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

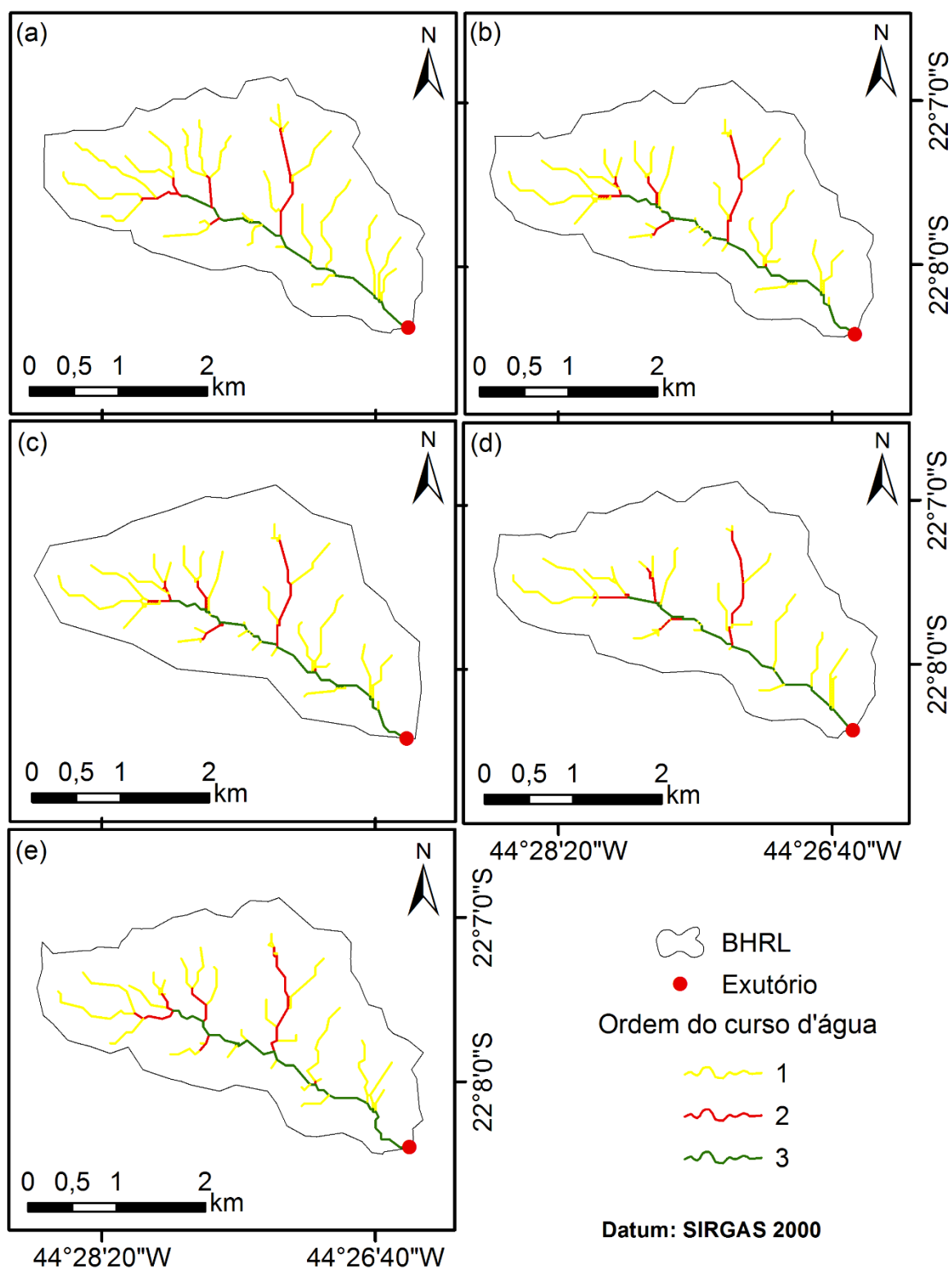


Figura A32 - Ordem dos cursos d'água da BHRL, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

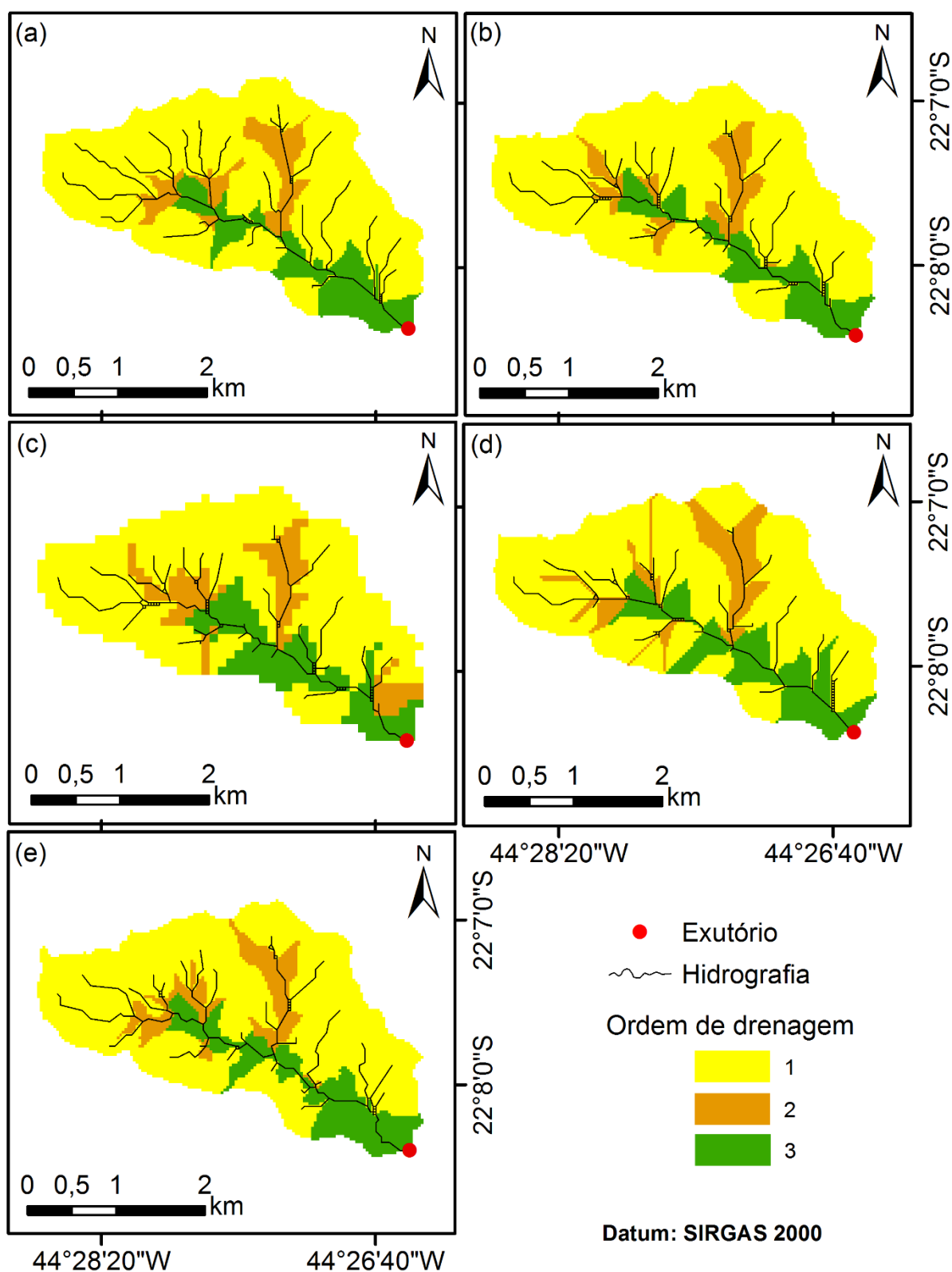


Figura A33 - Área de drenagem por ordem dos cursos d'água para a BHARL, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs CARTAS (a), SRTM 30 (b), SRTM 90 (c), TOPODATA (d) e ASTER (e).

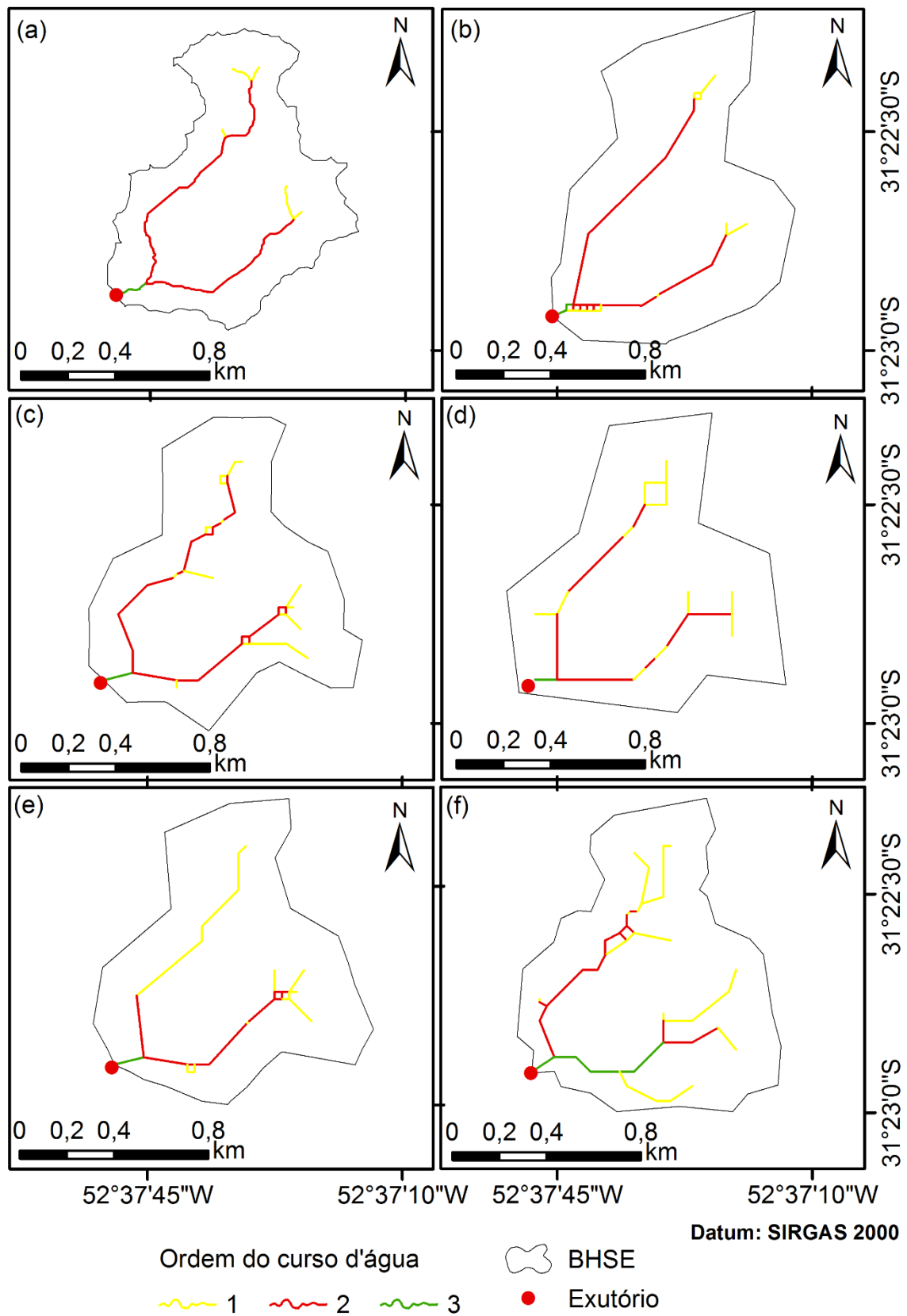


Figura A34 – Ordem dos cursos d'água da BHSE, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

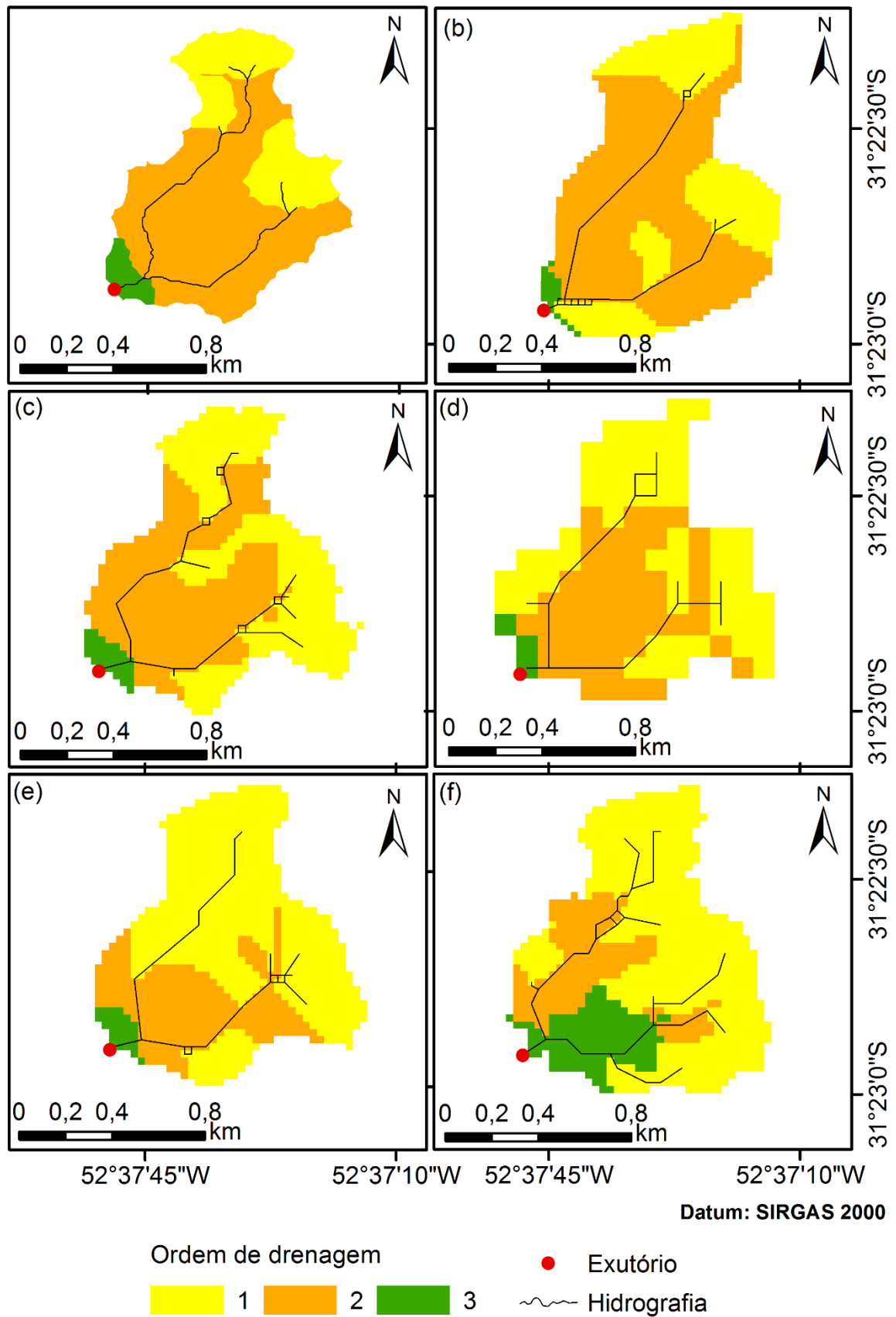


Figura A35 - Área de drenagem por ordem dos cursos d'água para a BHSE, segundo classificação de Strahler (1952), obtida a partir dos MDEs do Levantamento topográfico (a), CARTAS (b), SRTM 30 (c), SRTM 90 (d), TOPODATA (e) e ASTER (f).

Apêndice B – Eventos chuva-vazão analisados

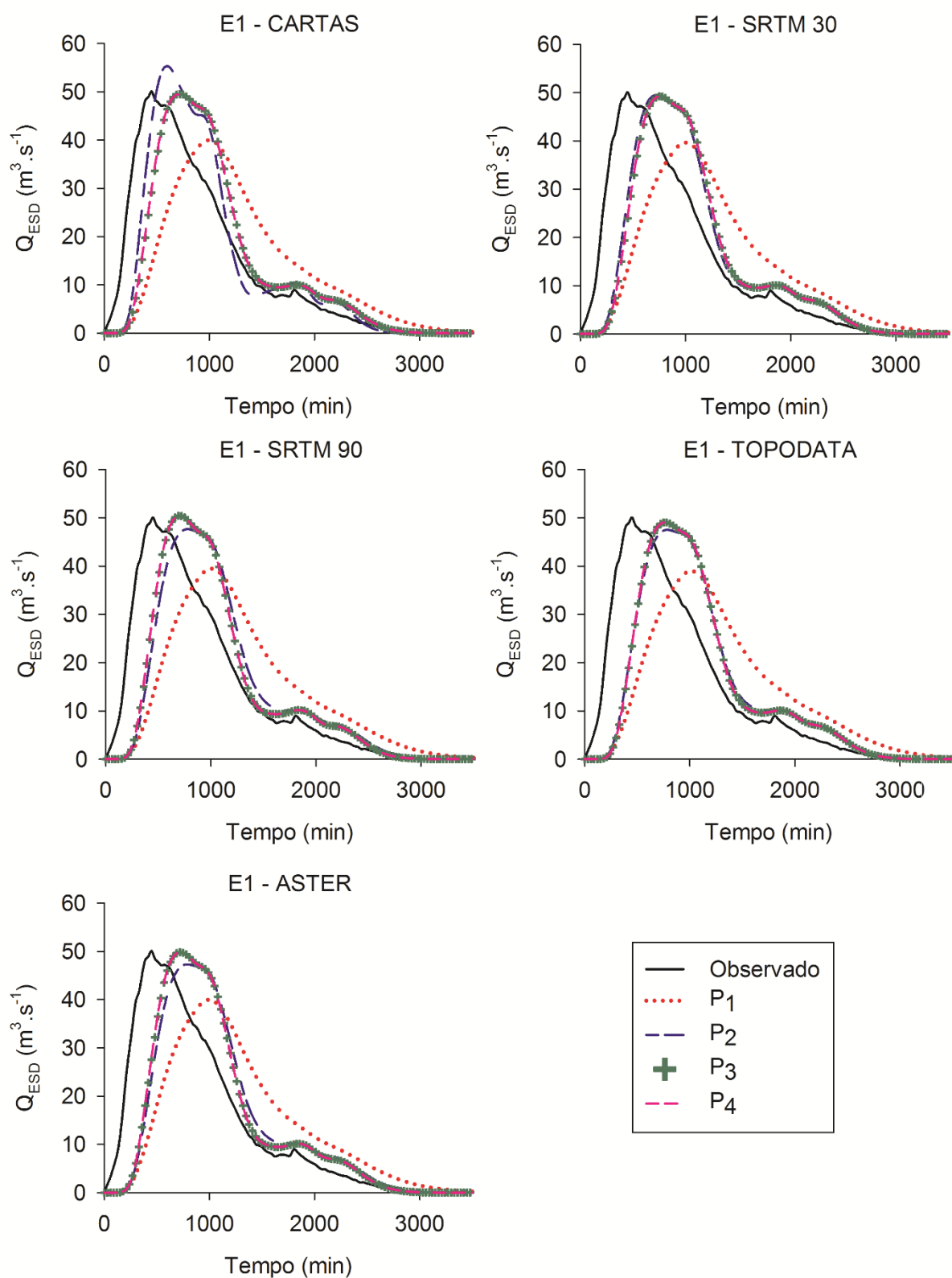


Figura B1 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

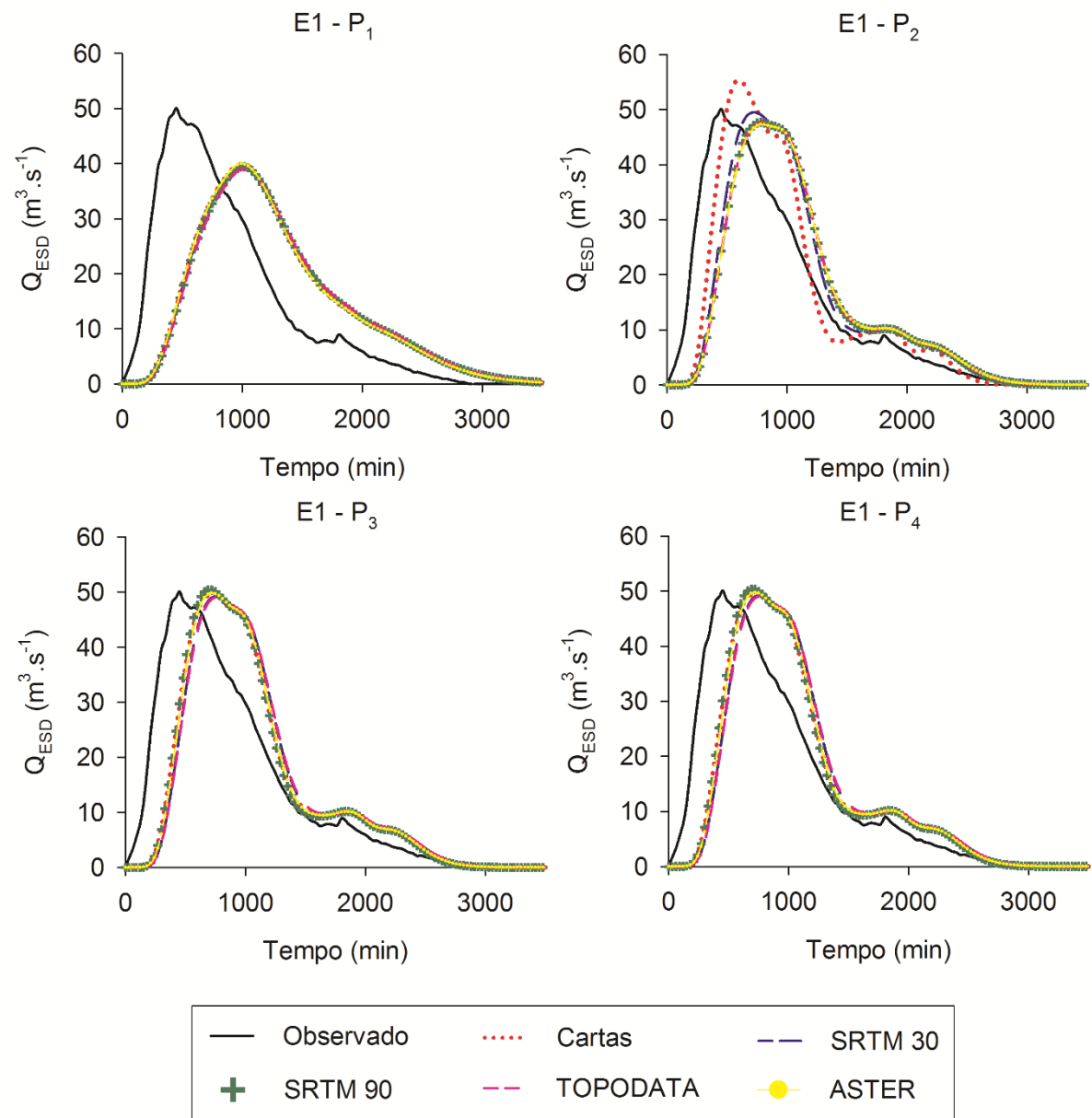


Figura B2 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

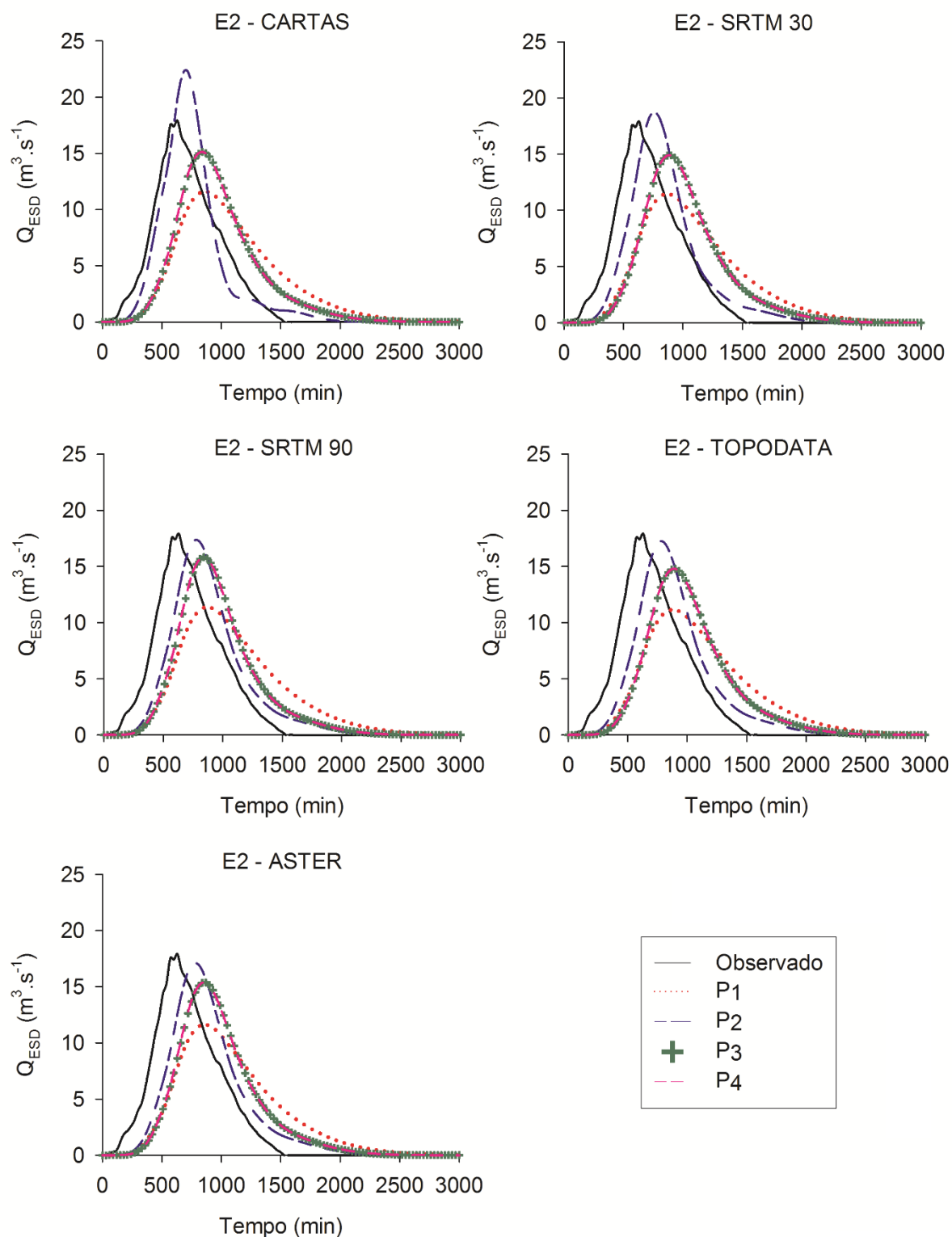


Figura B3 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

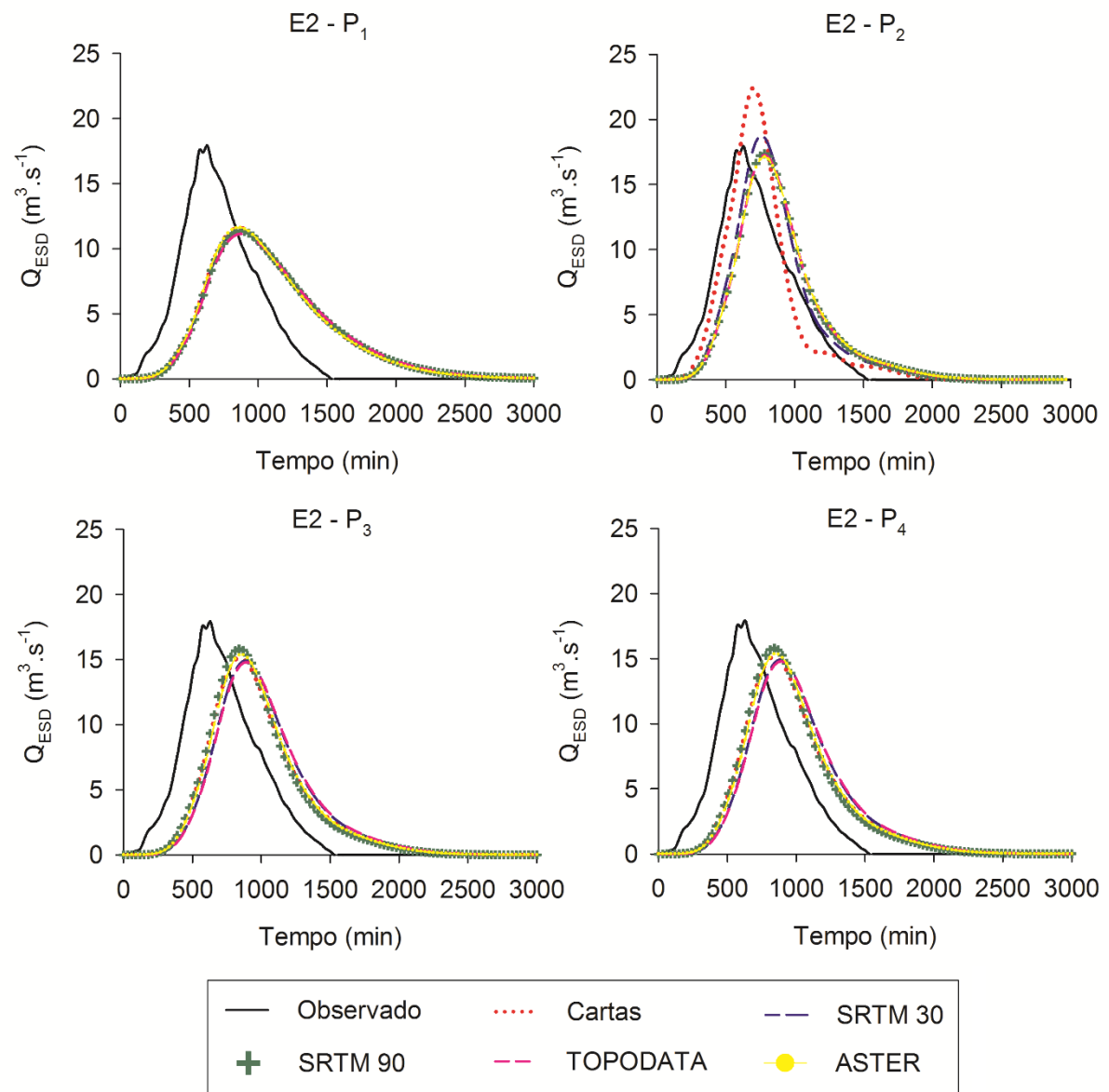


Figura B4 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

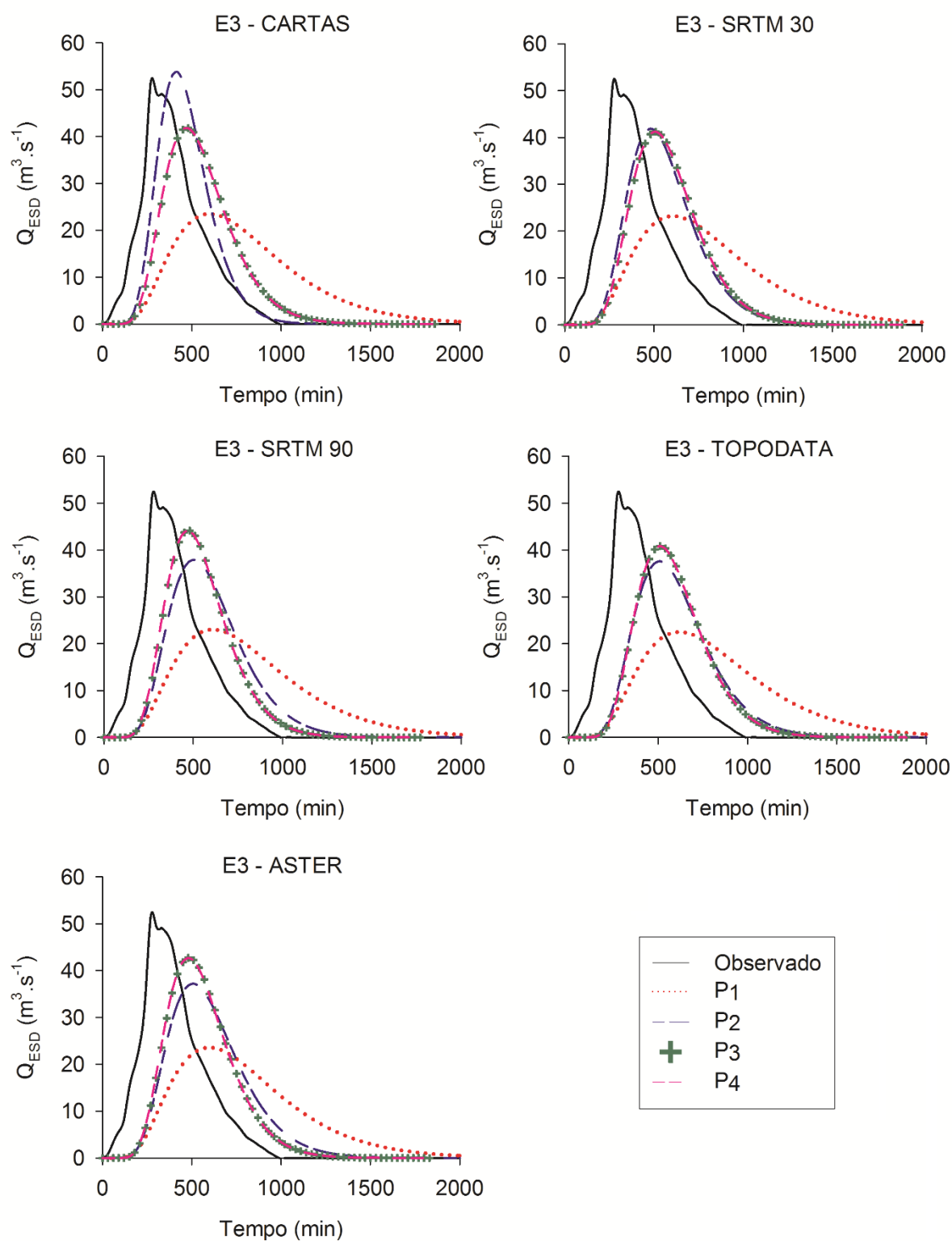


Figura B5 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

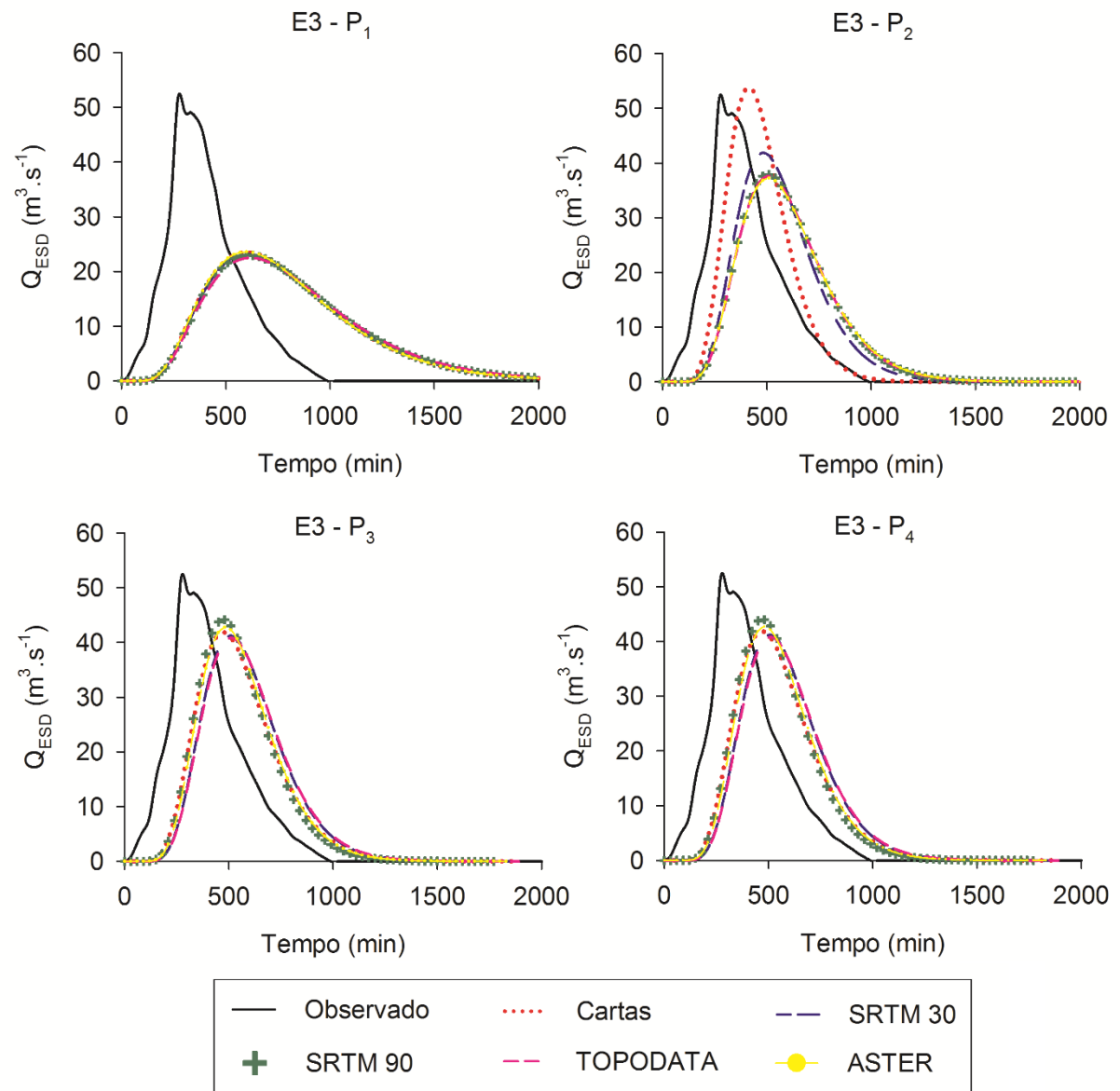


Figura B6 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

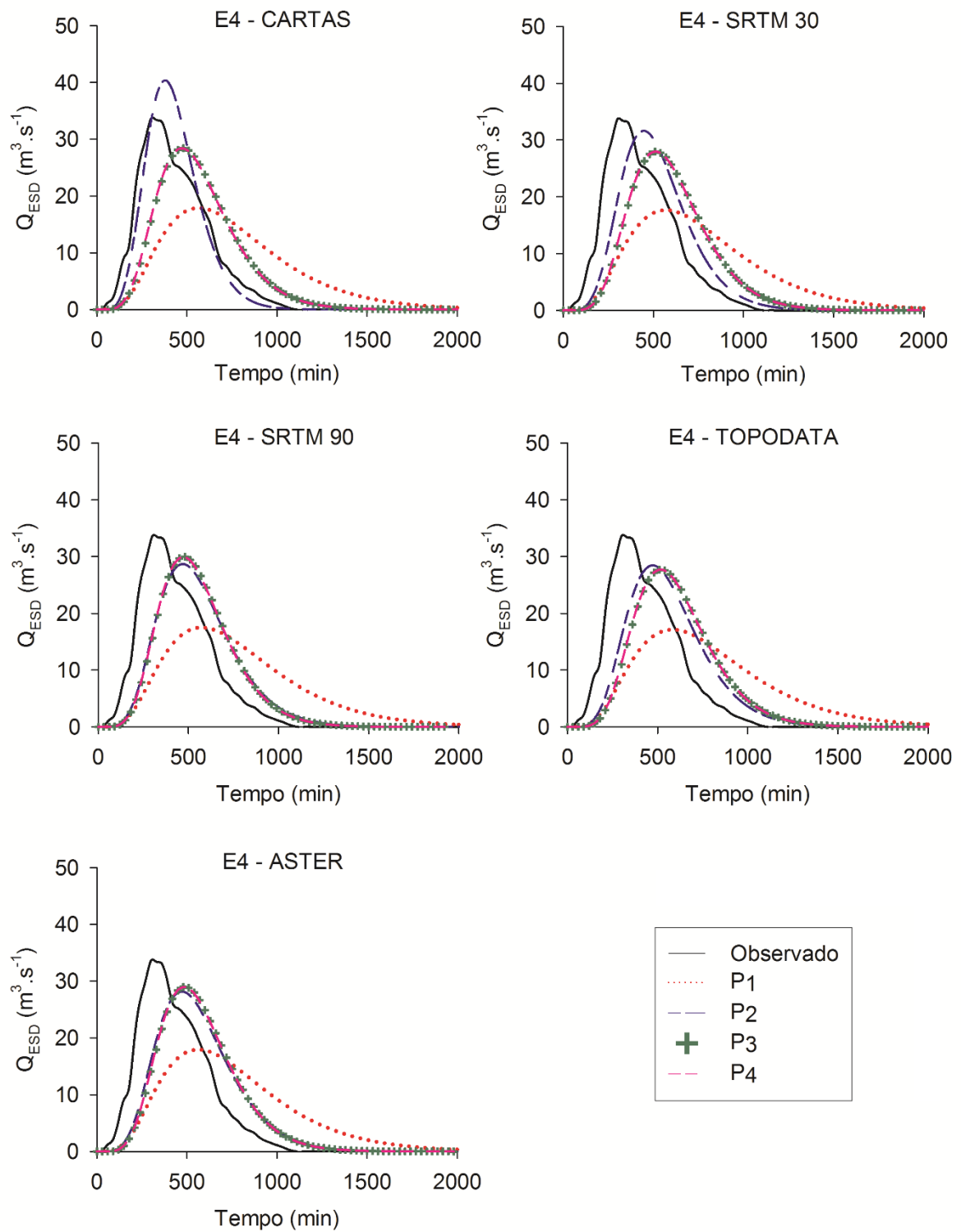


Figura B7 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

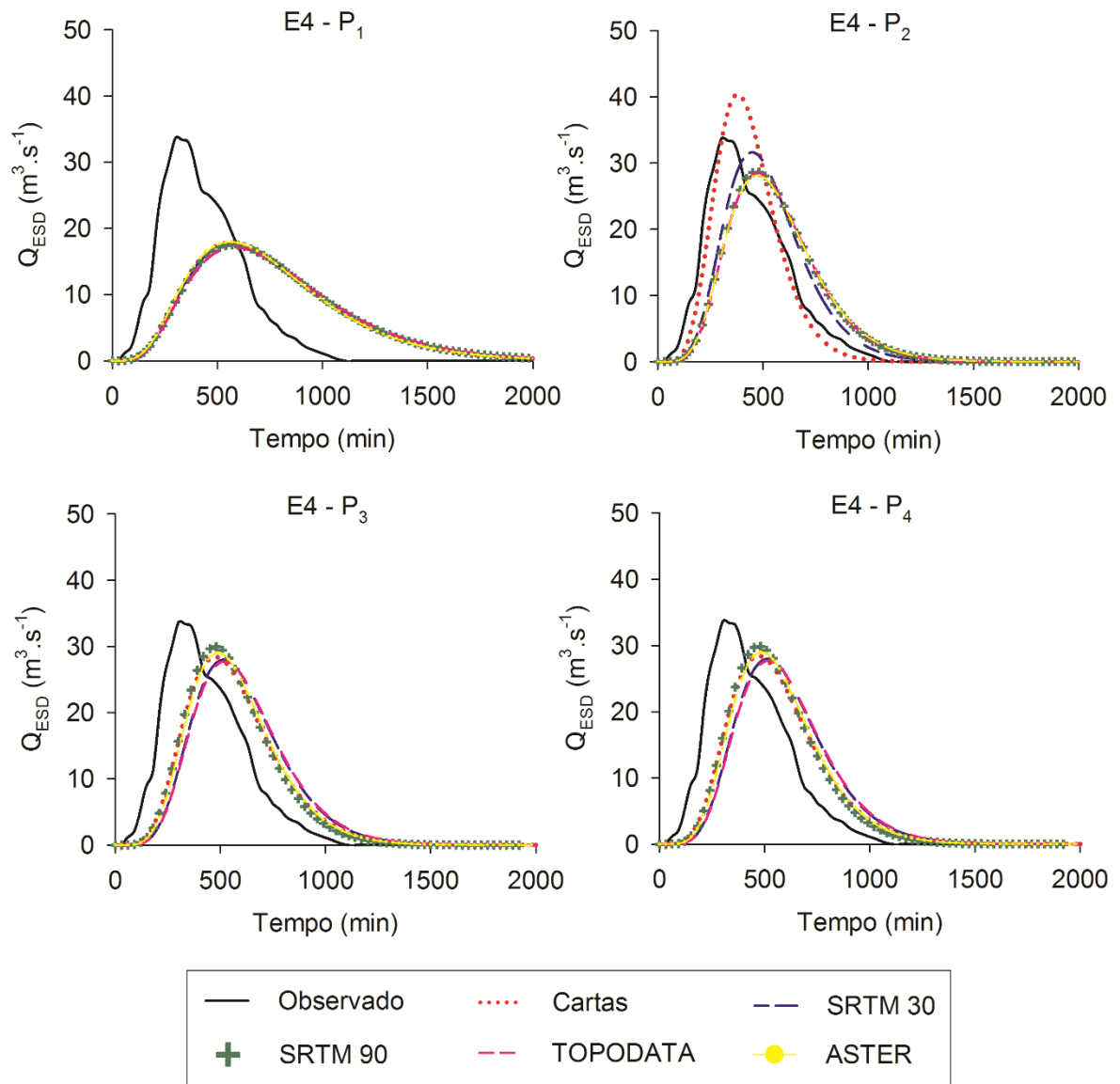


Figura B8 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

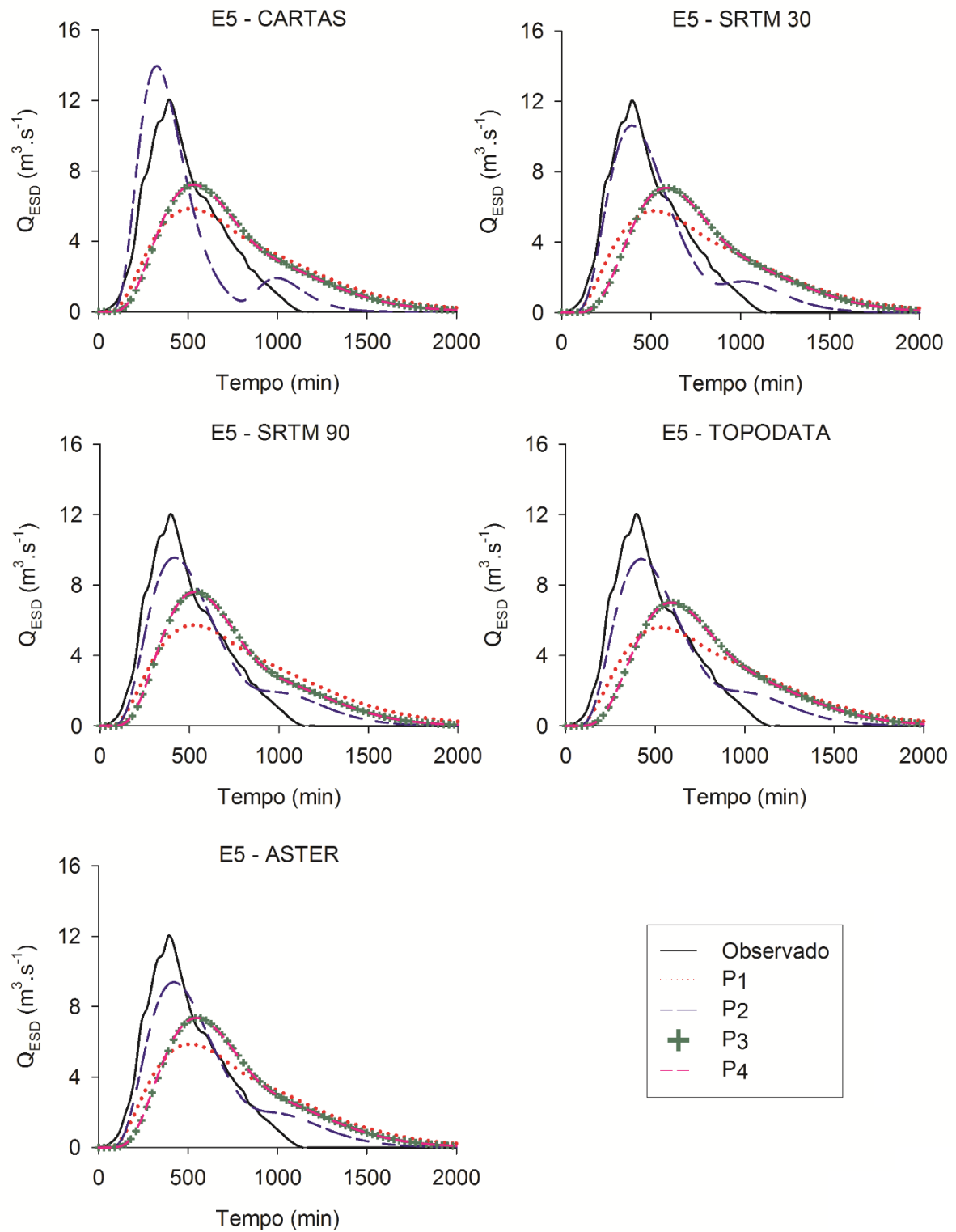


Figura B9 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

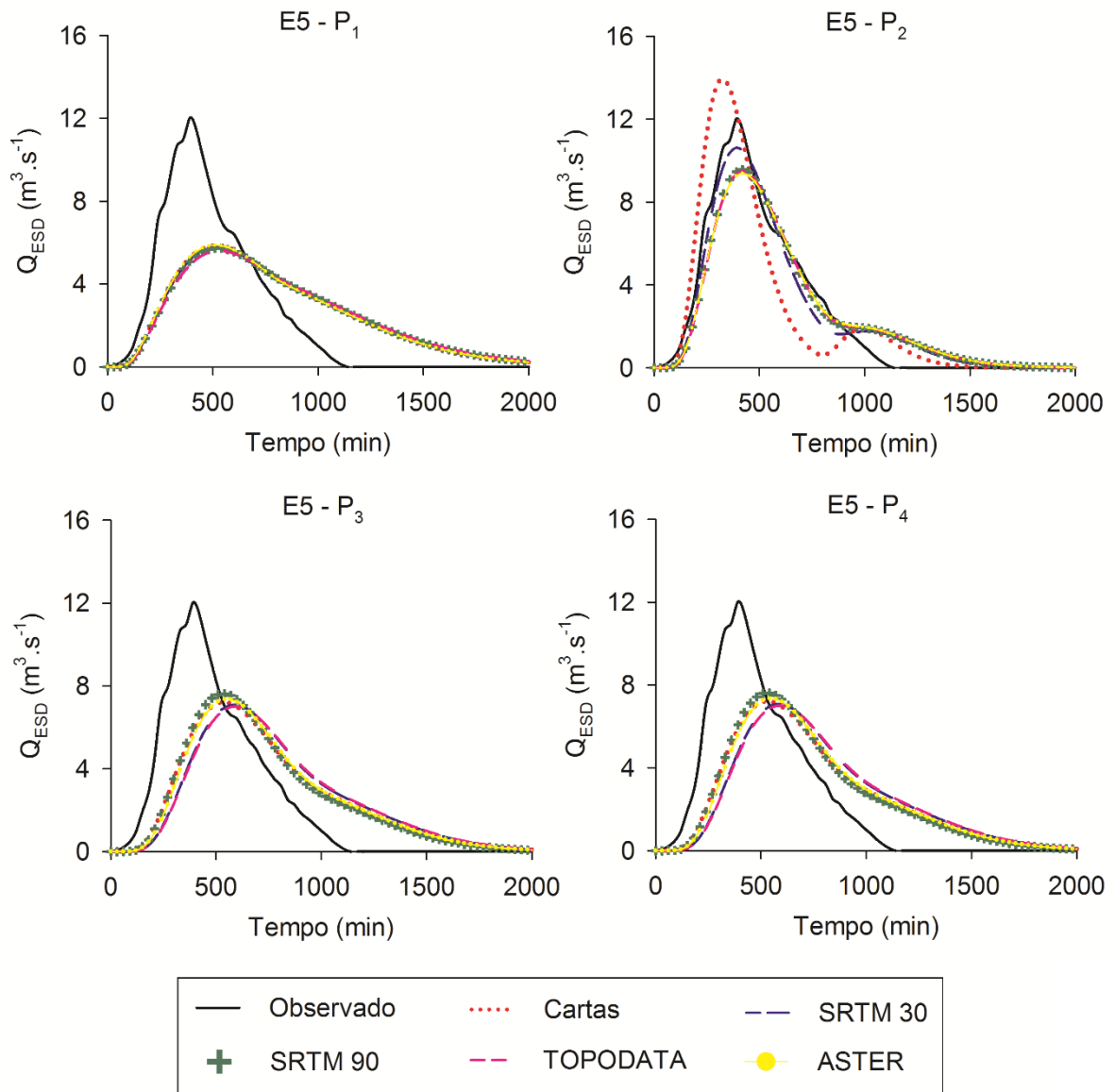


Figura B10 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

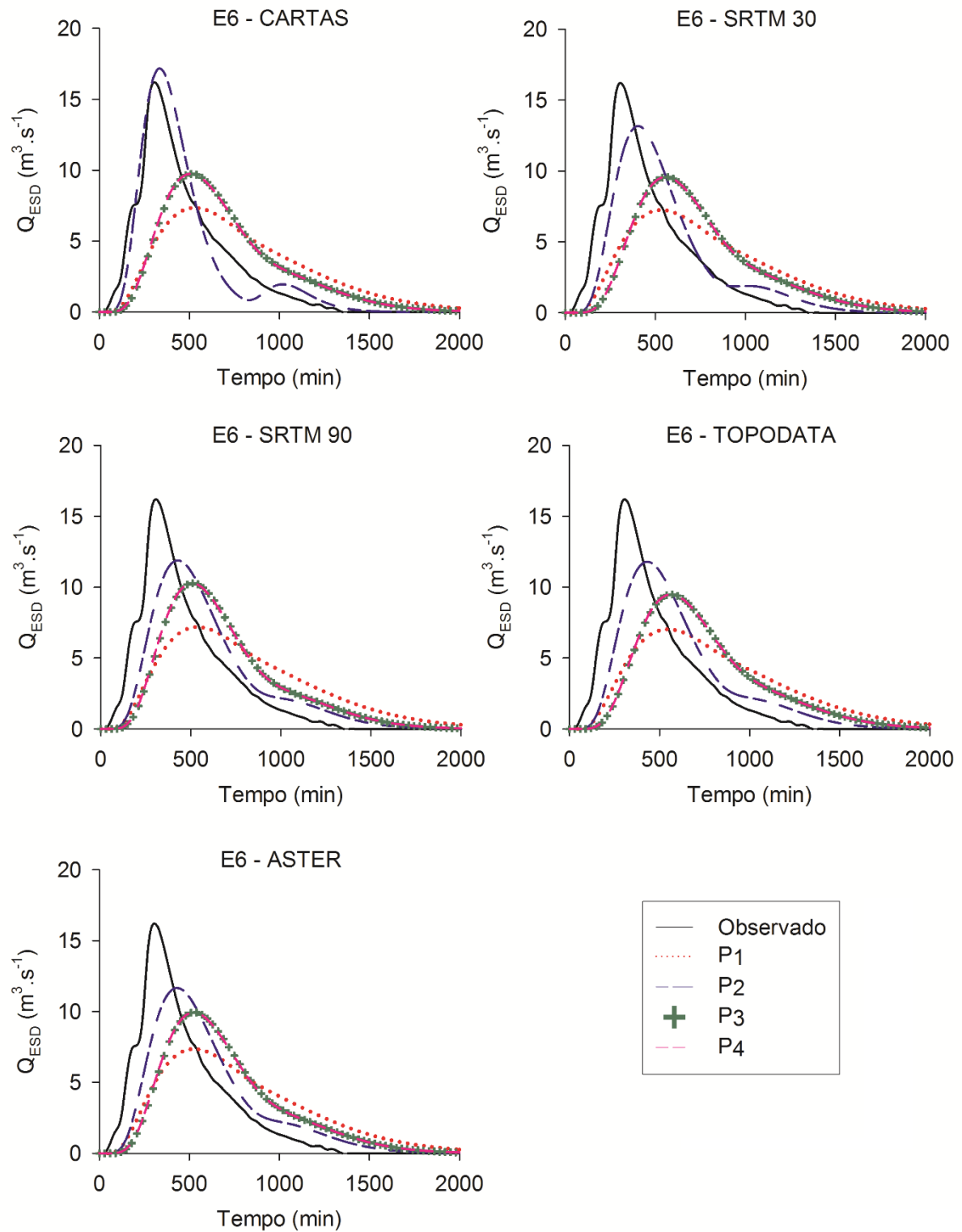


Figura B11 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

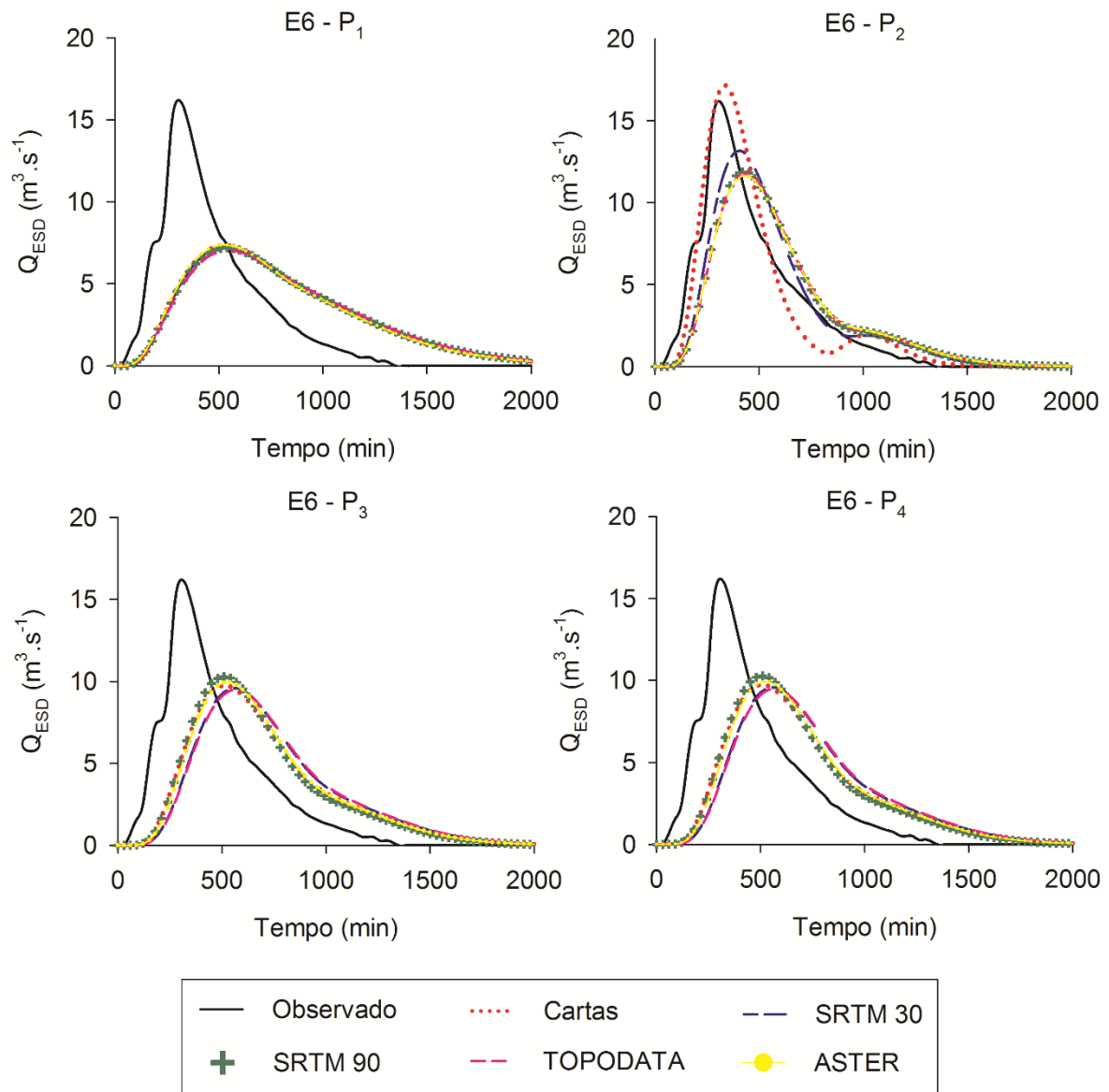


Figura B12 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

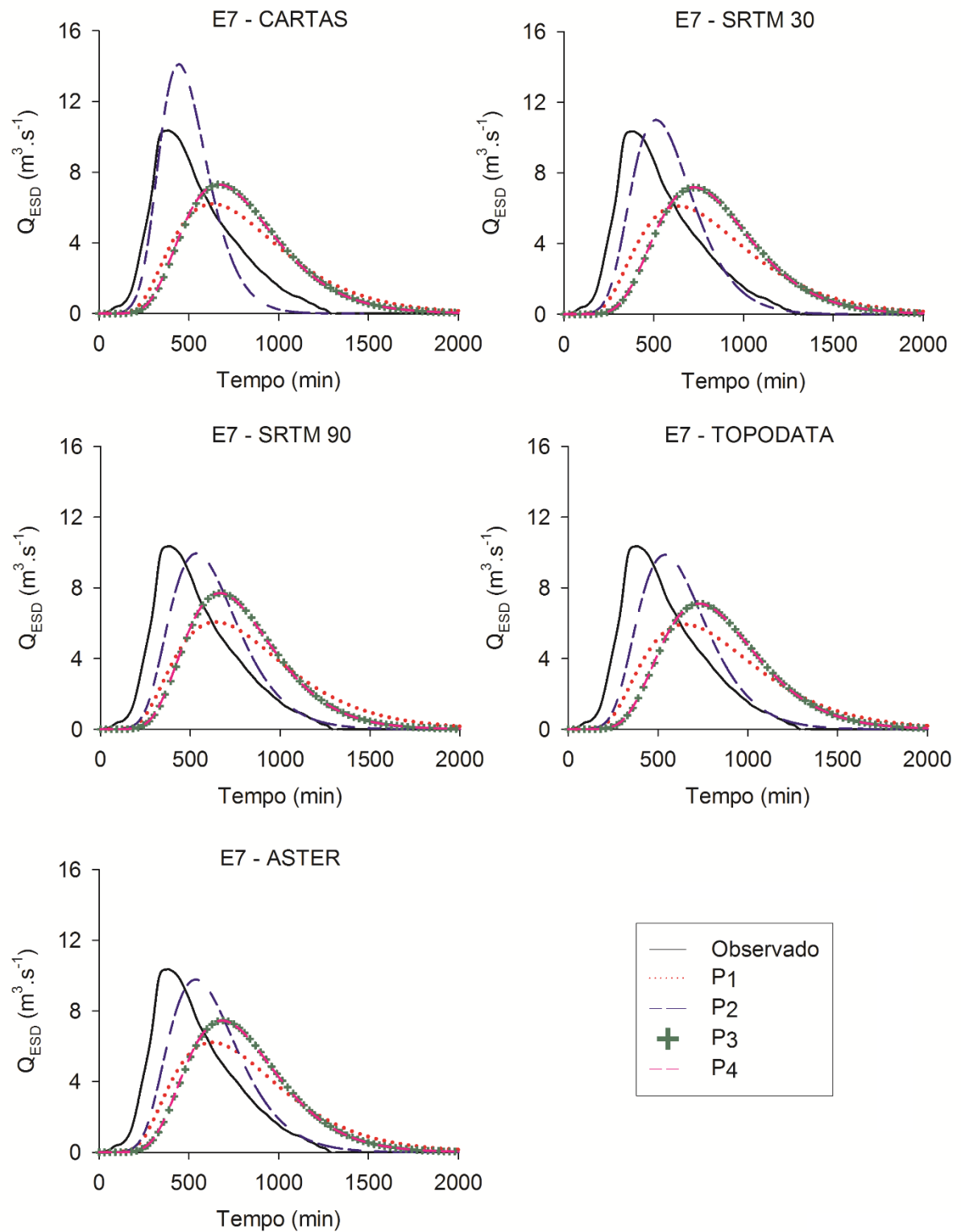


Figura B13 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

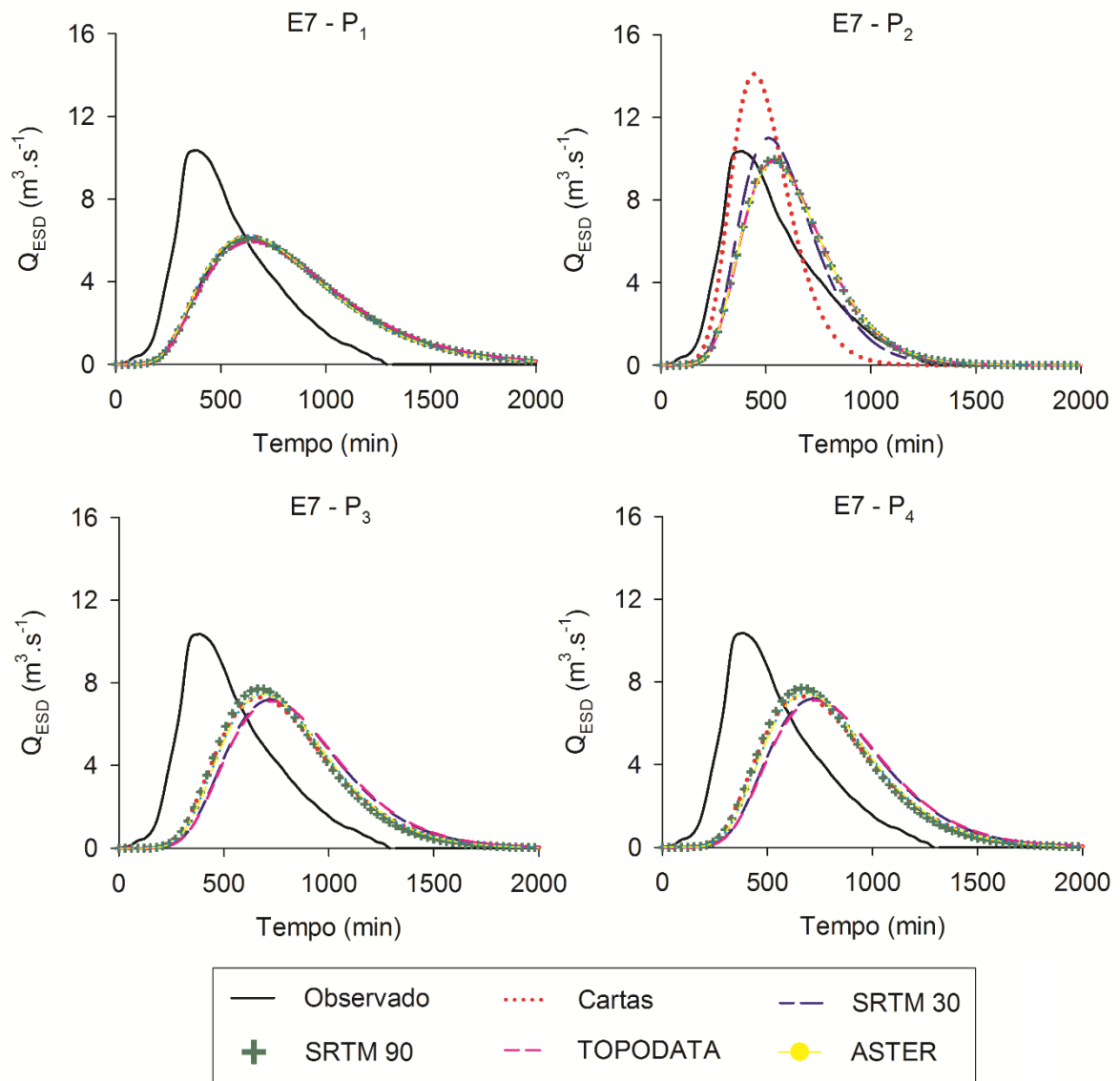


Figura B14 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

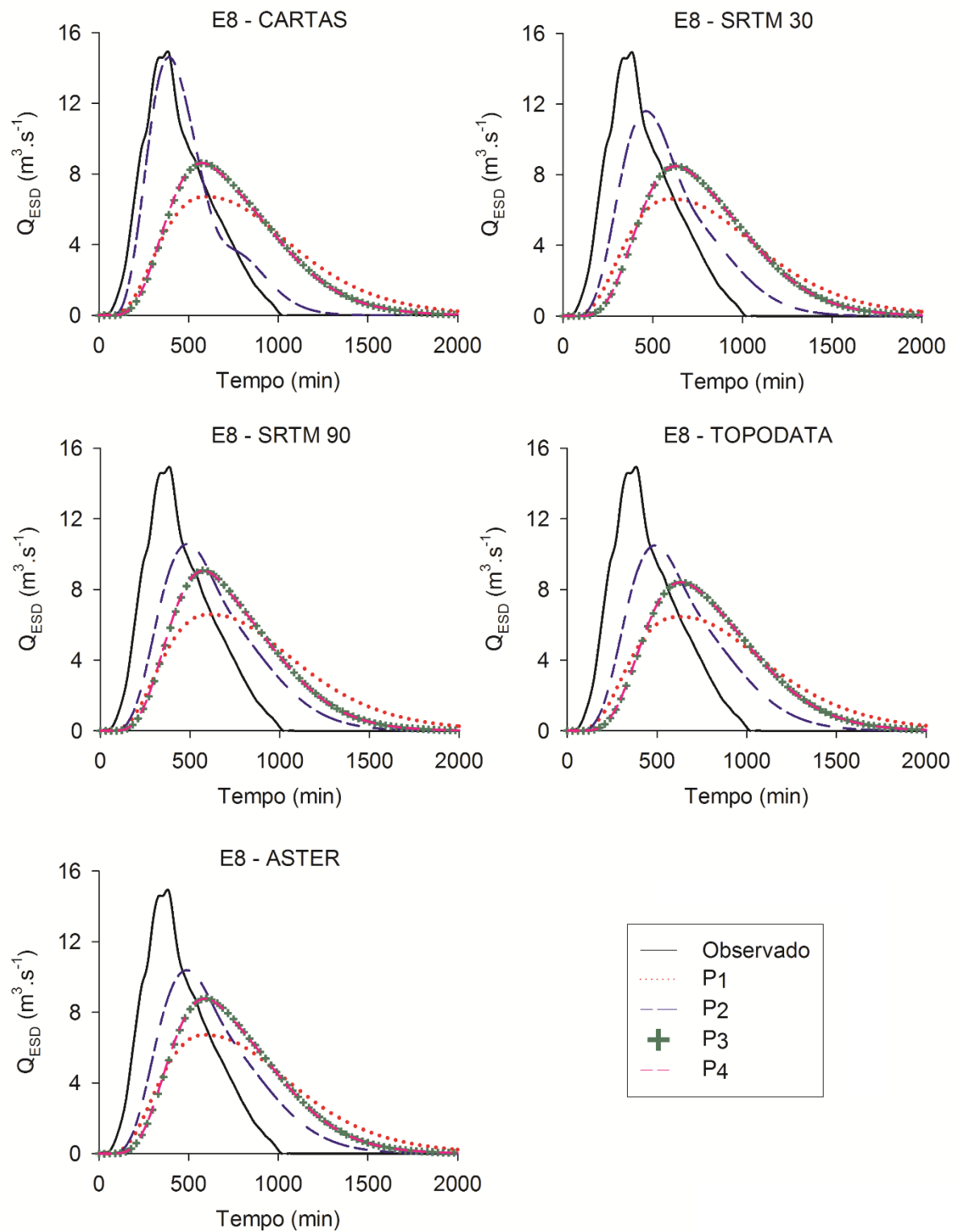


Figura B15 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

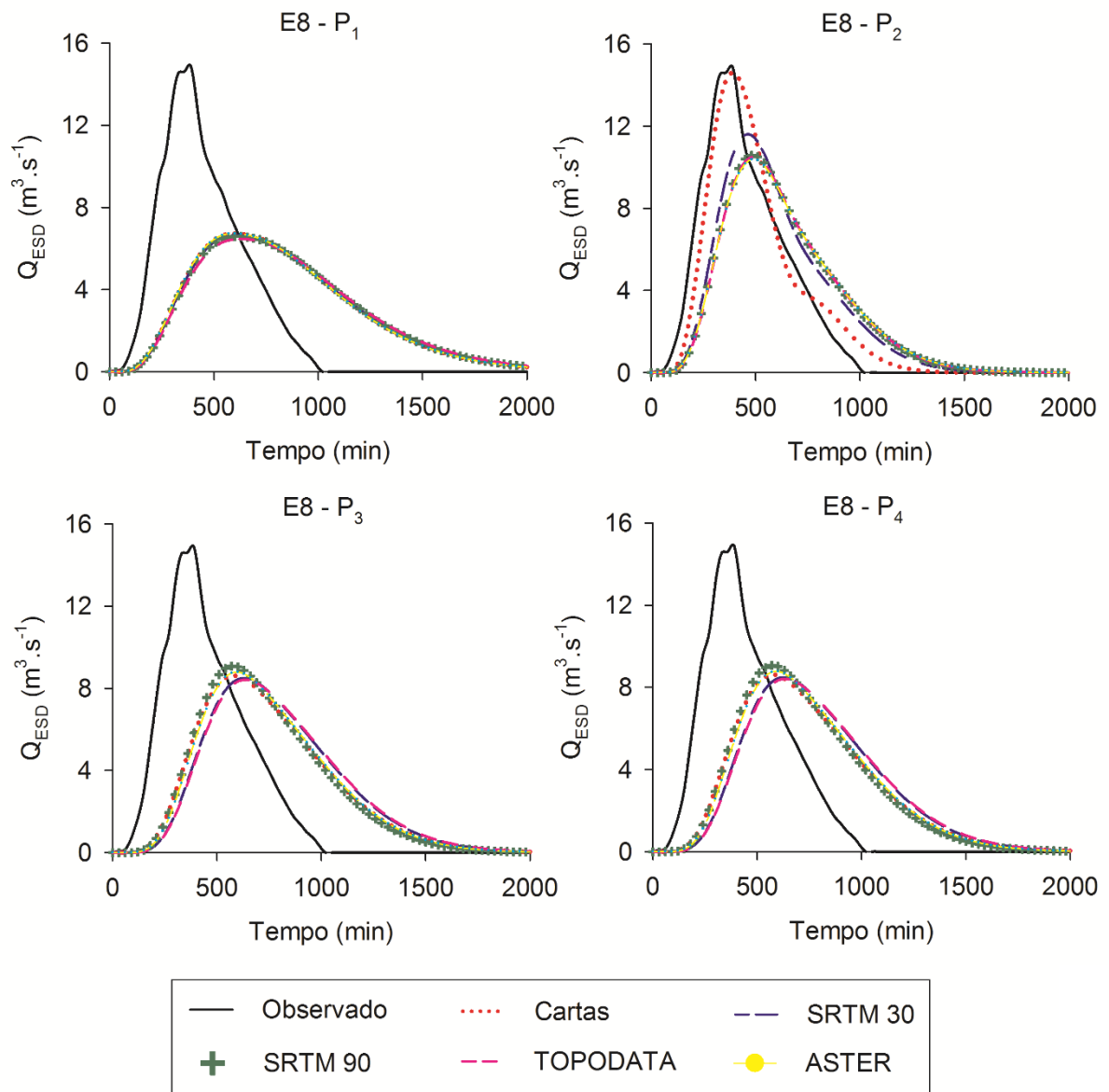


Figura B16 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

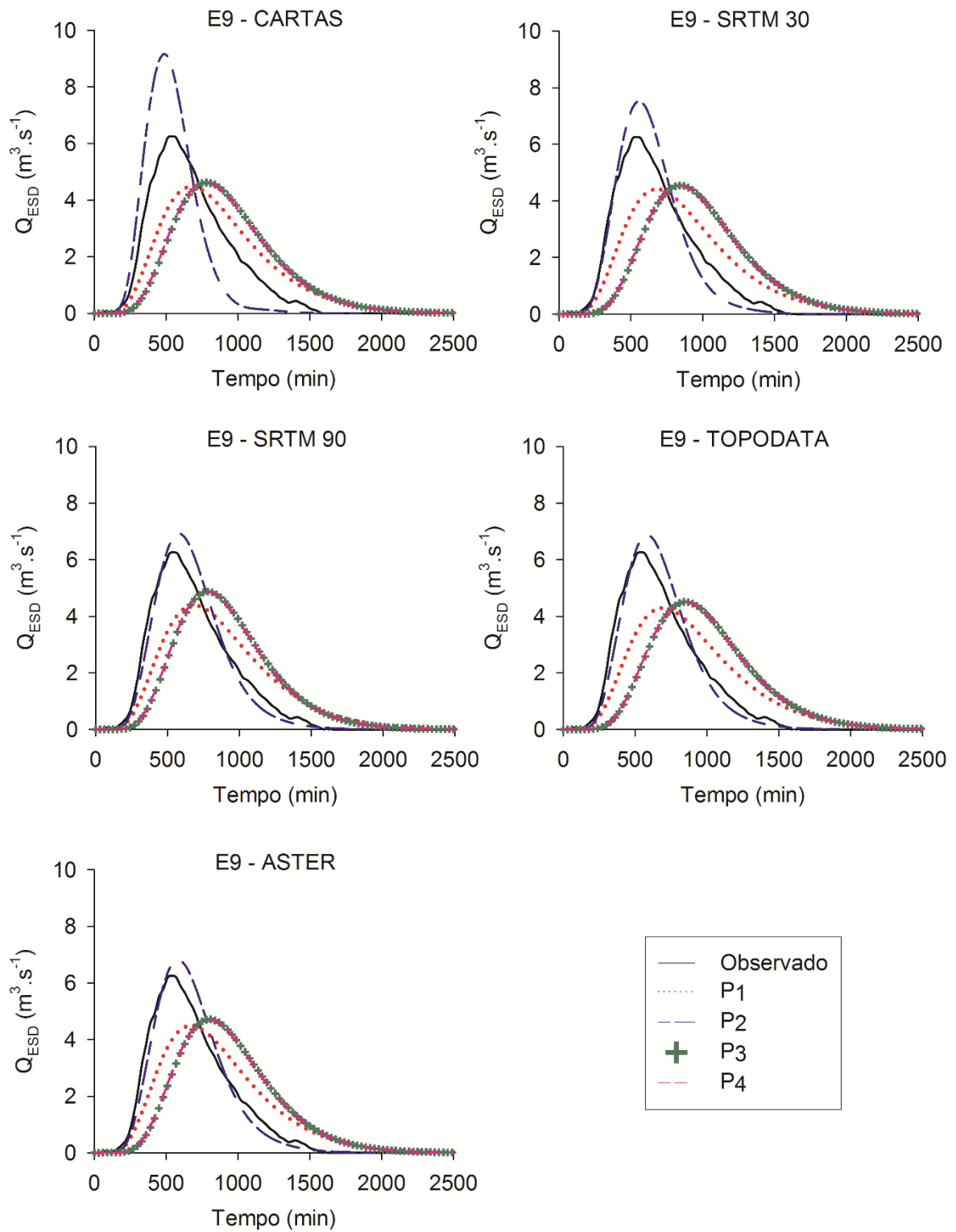


Figura B17 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

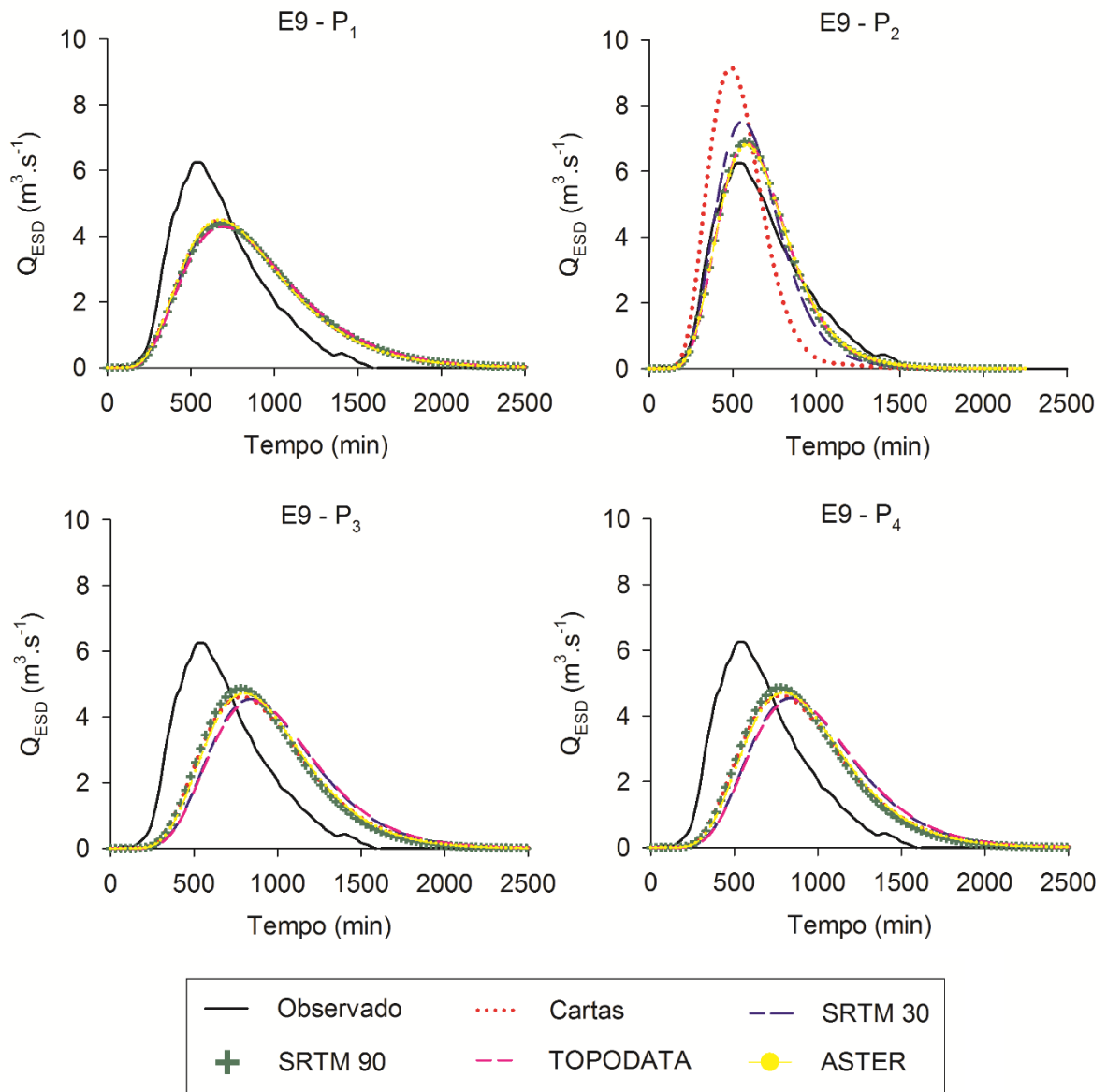


Figura B18 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

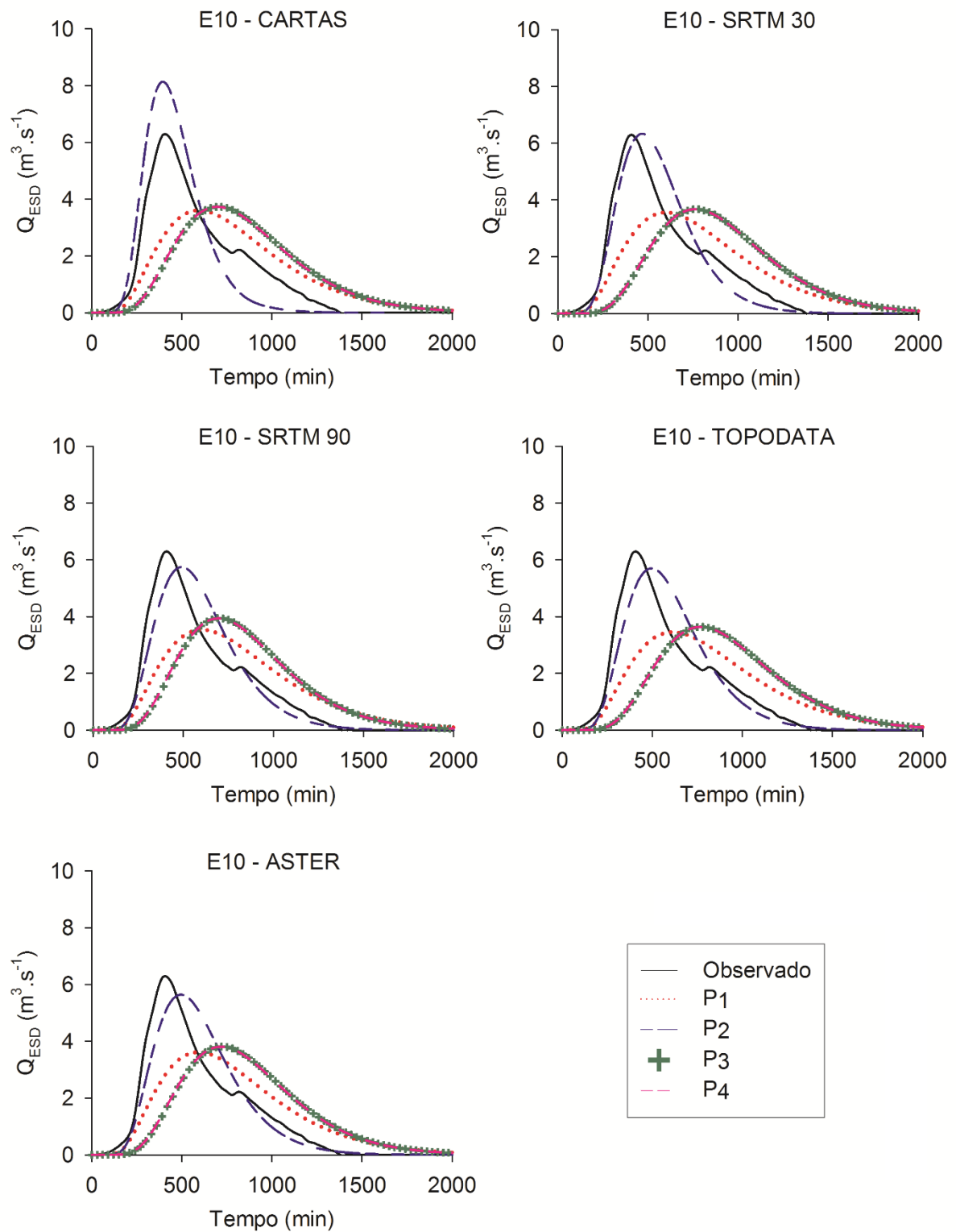


Figura B19 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHAC, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

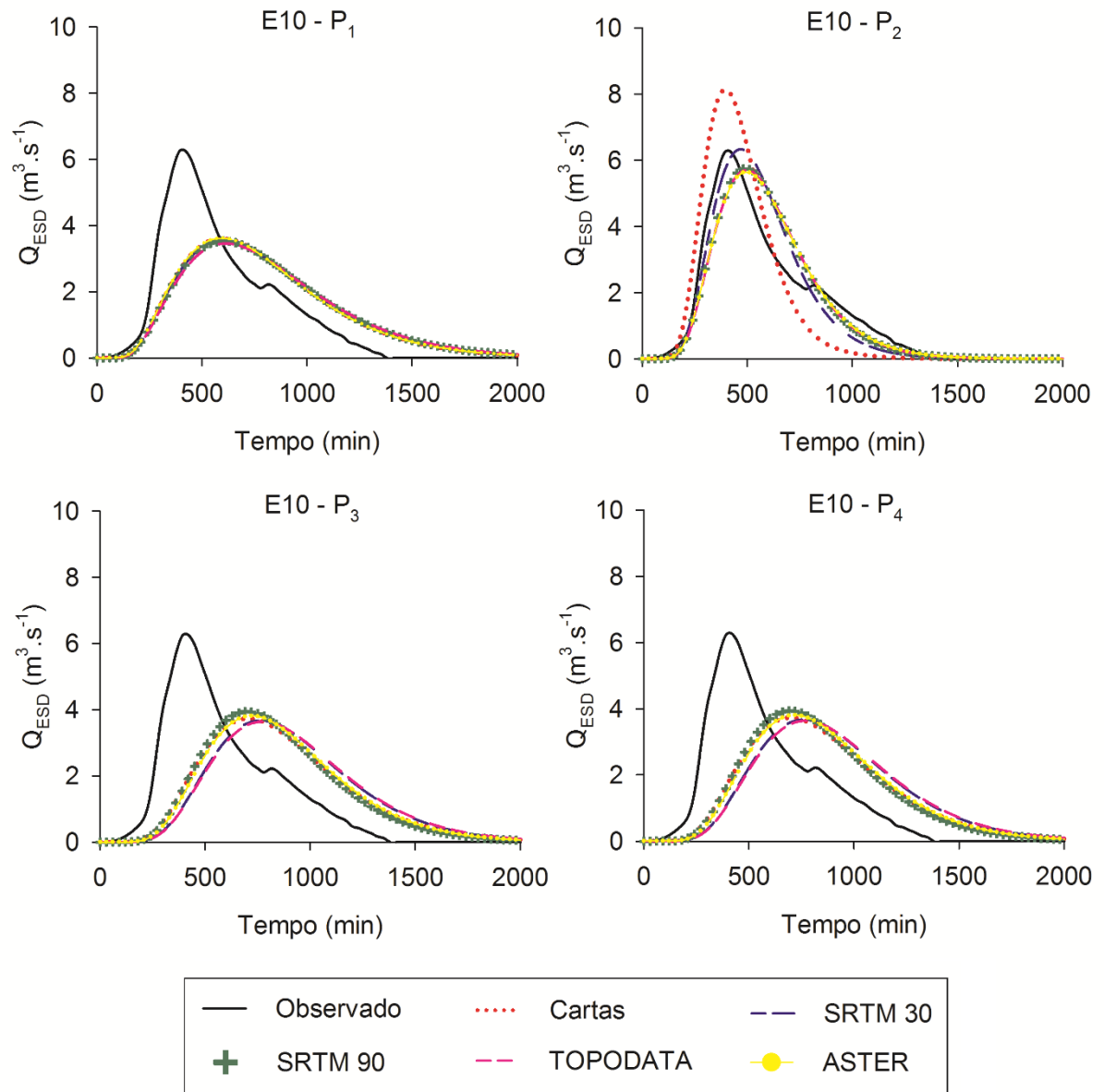


Figura B20 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHAC, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

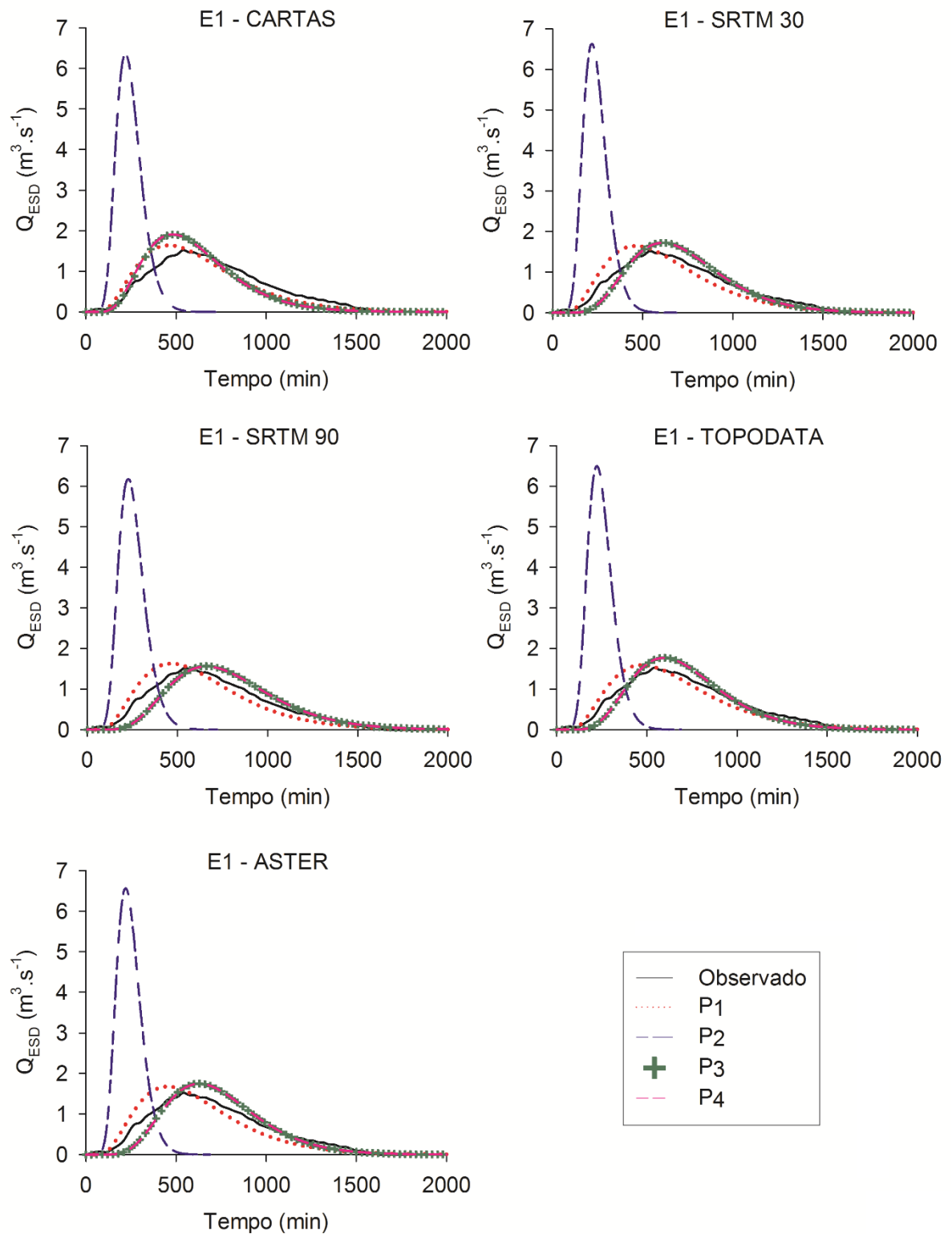


Figura B21 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

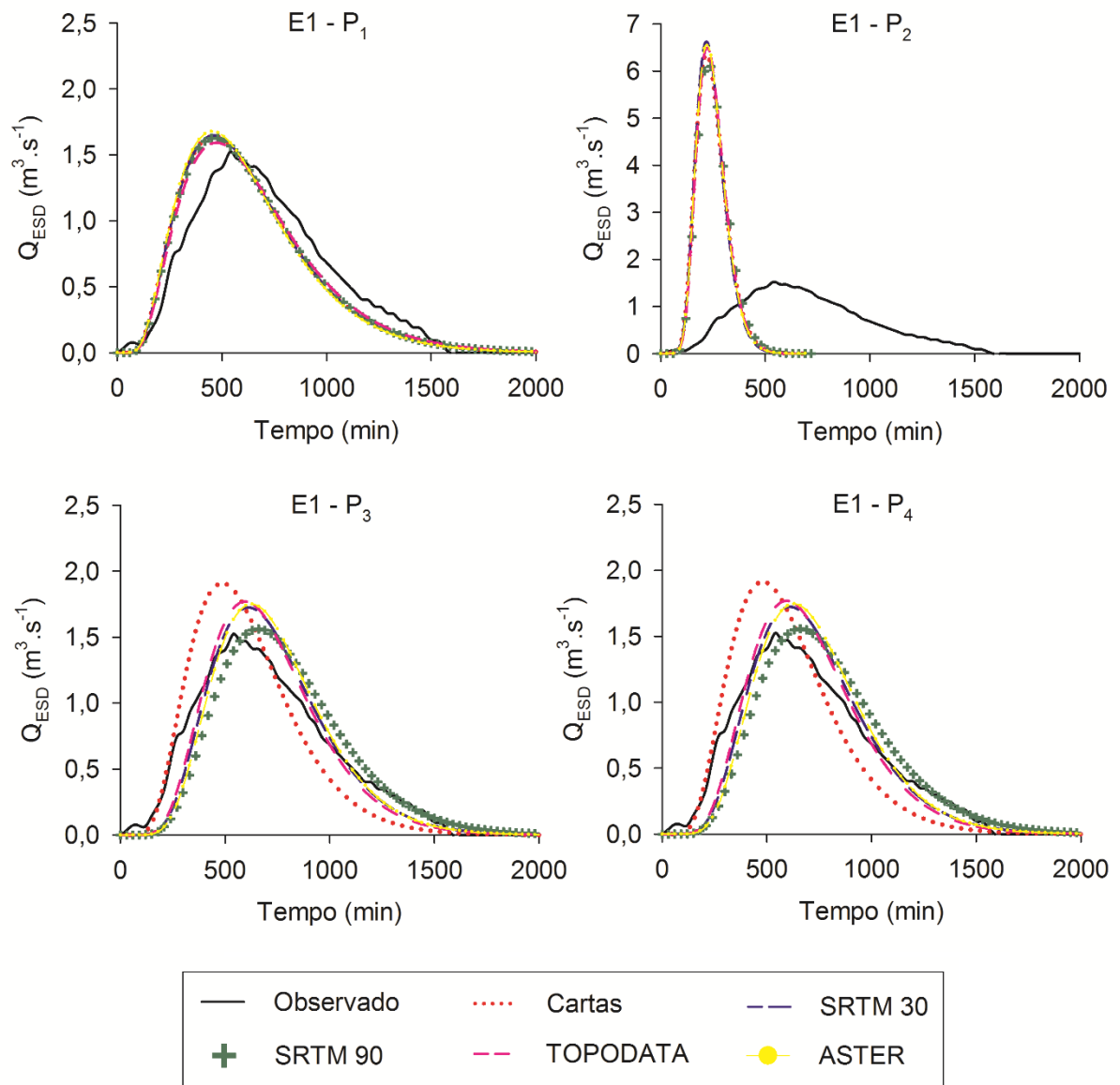


Figura B22 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

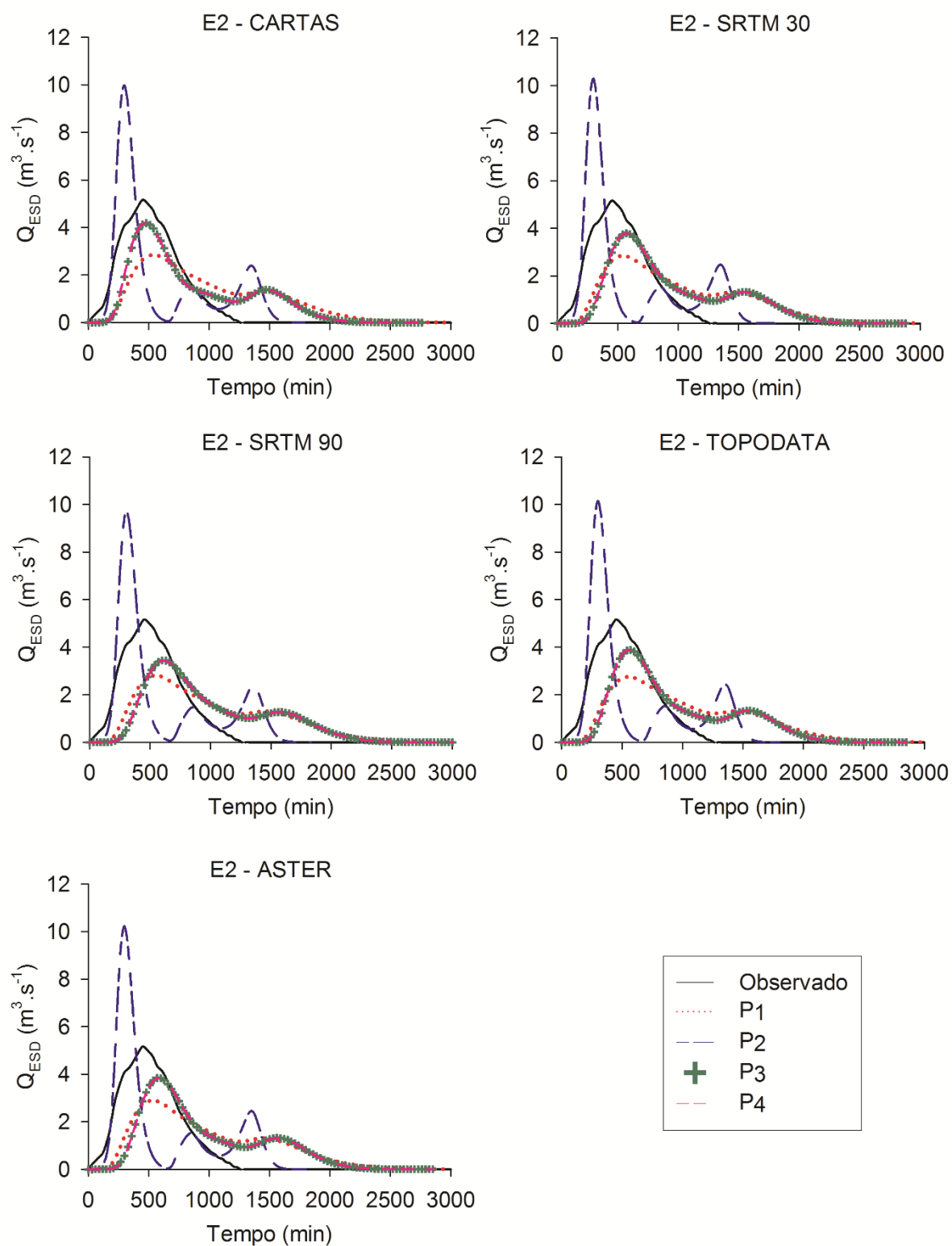


Figura B23 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

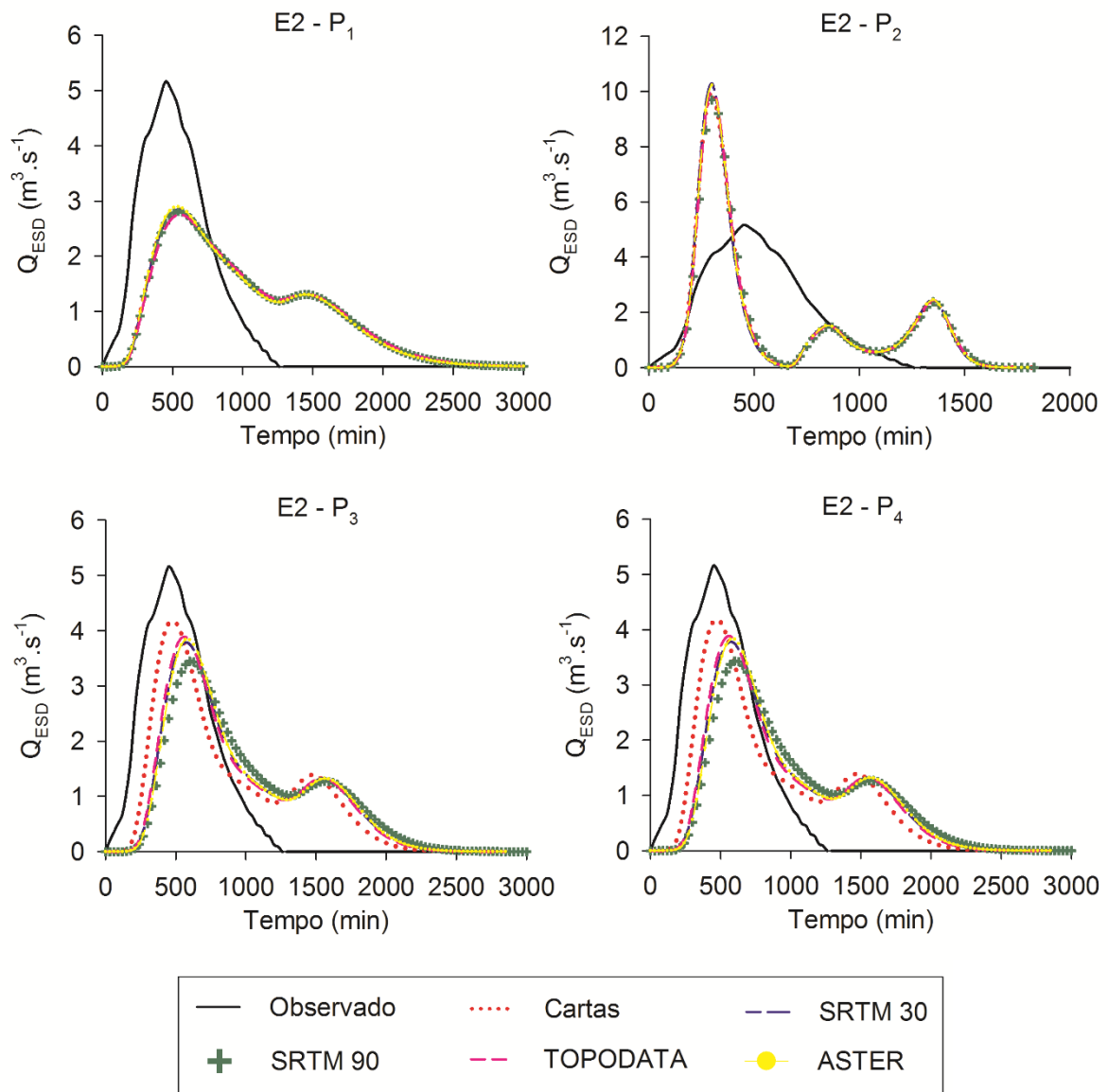


Figura B24 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

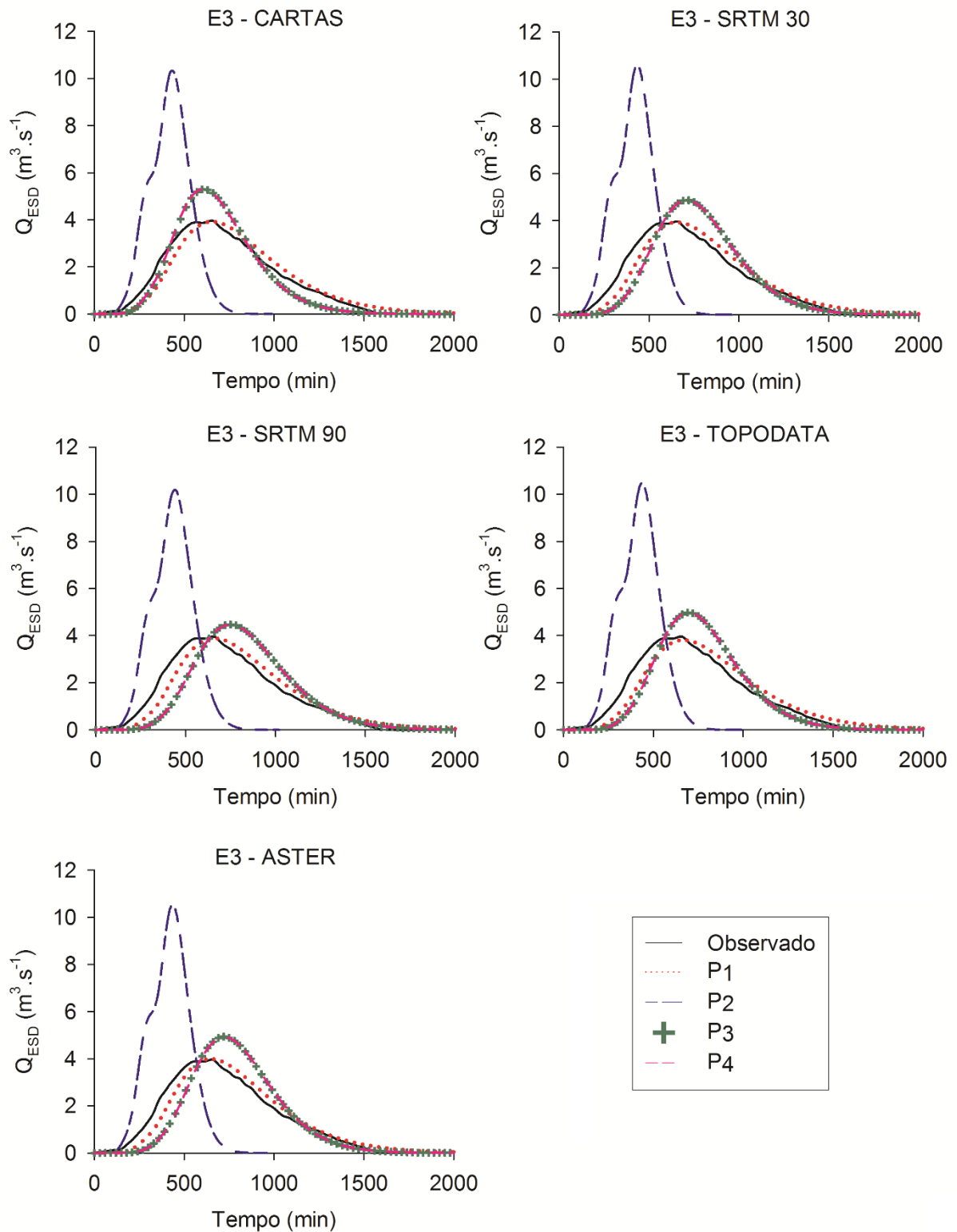


Figura B25 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

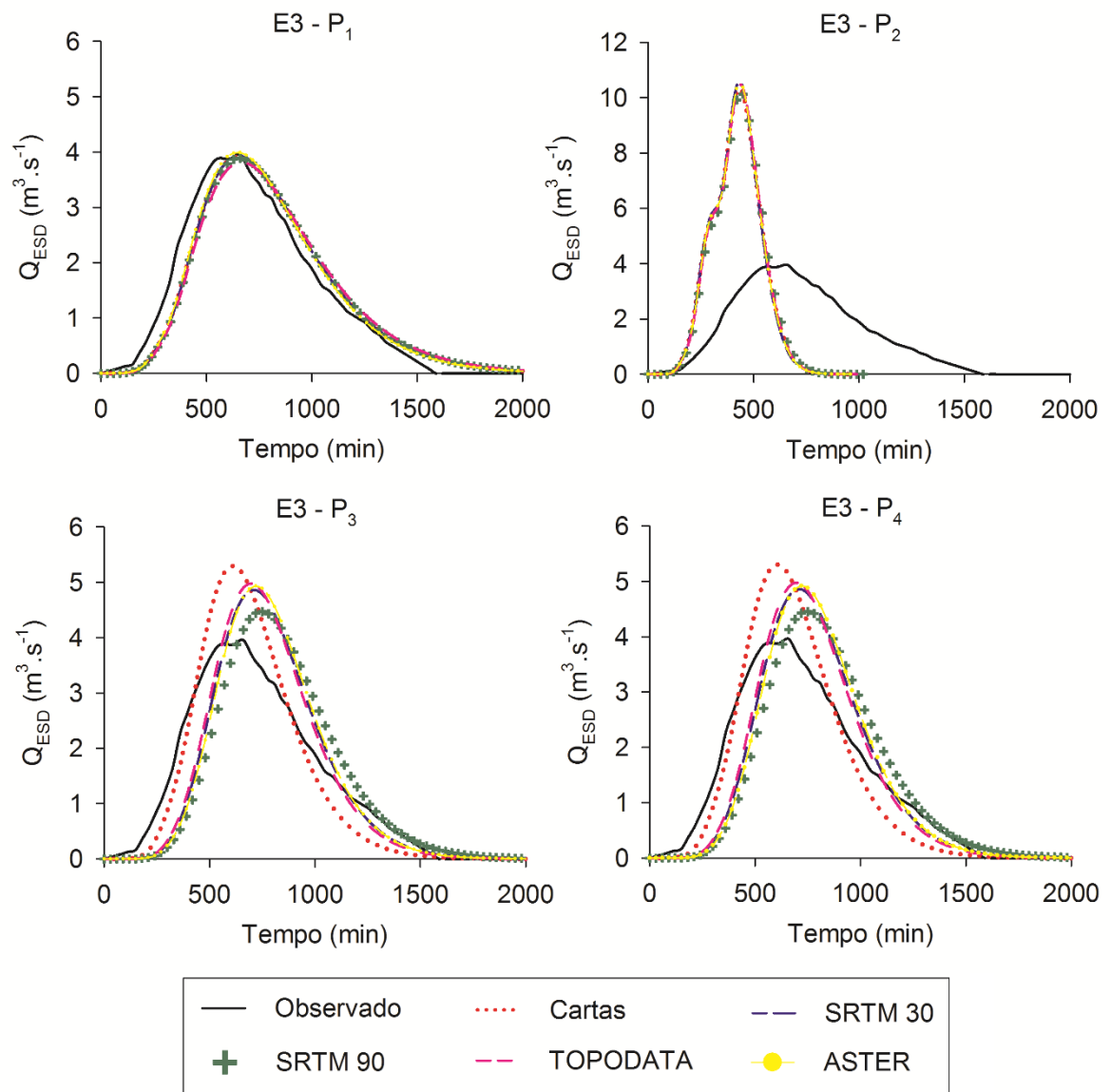


Figura B26 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

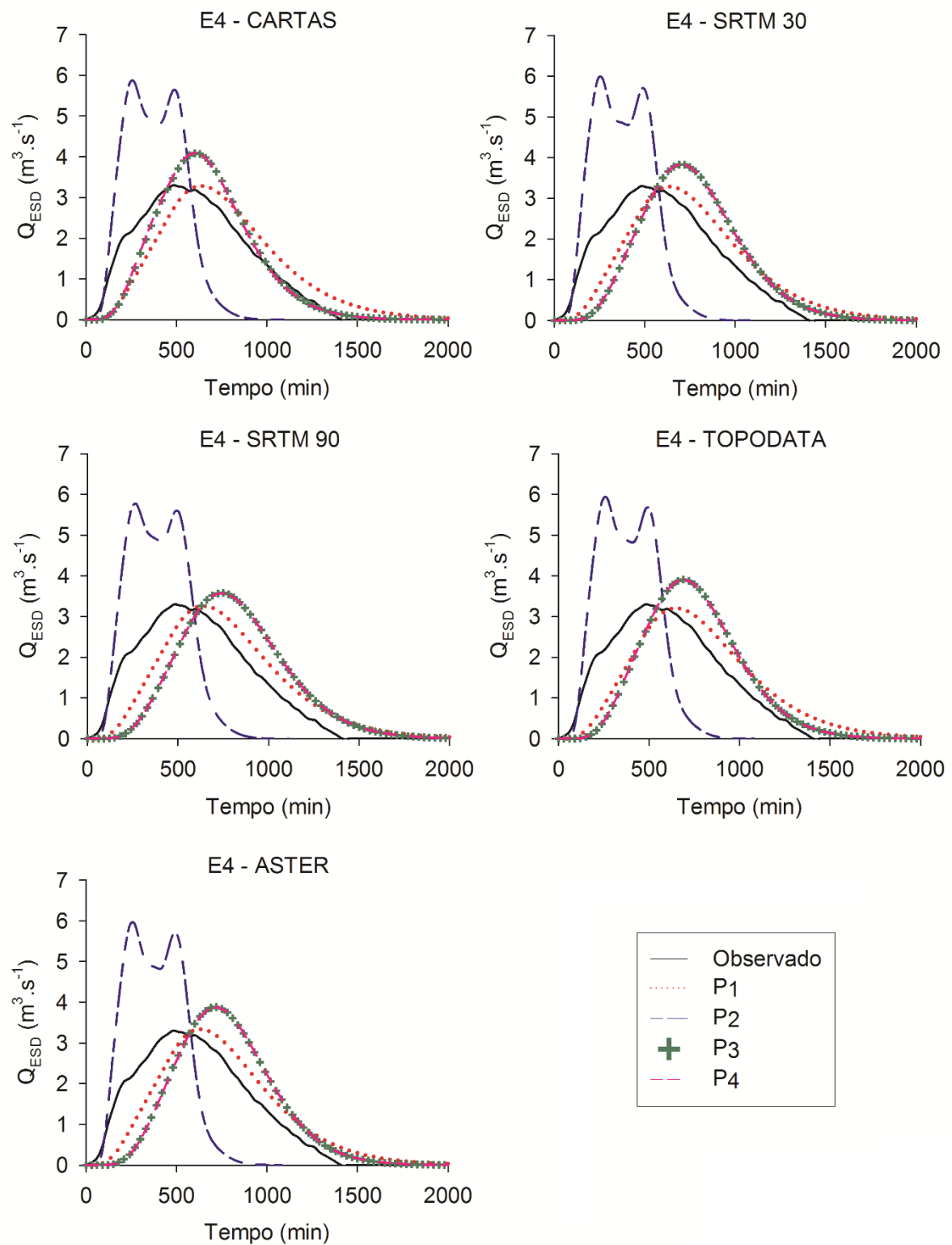


Figura B27 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

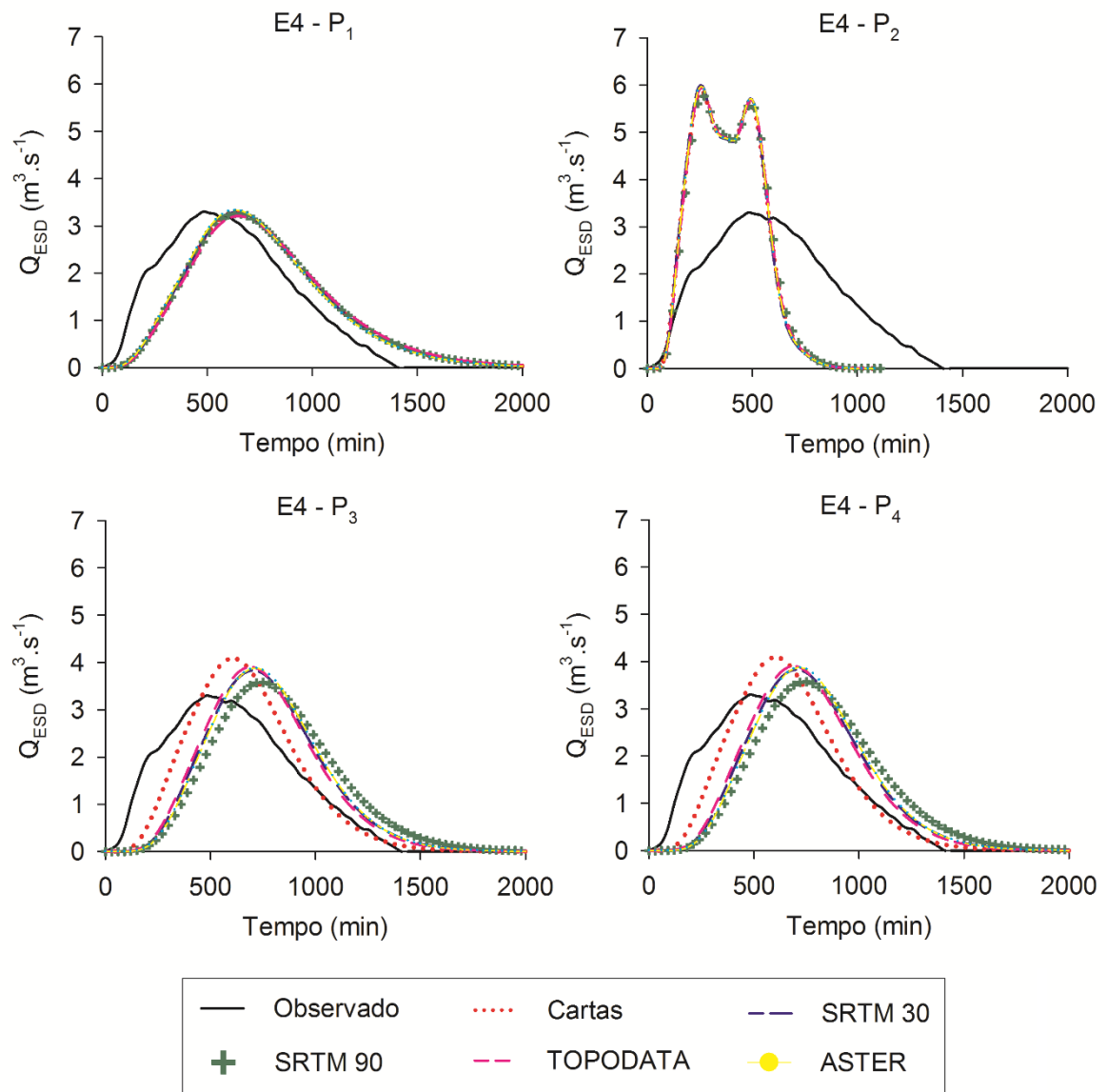


Figura B28 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

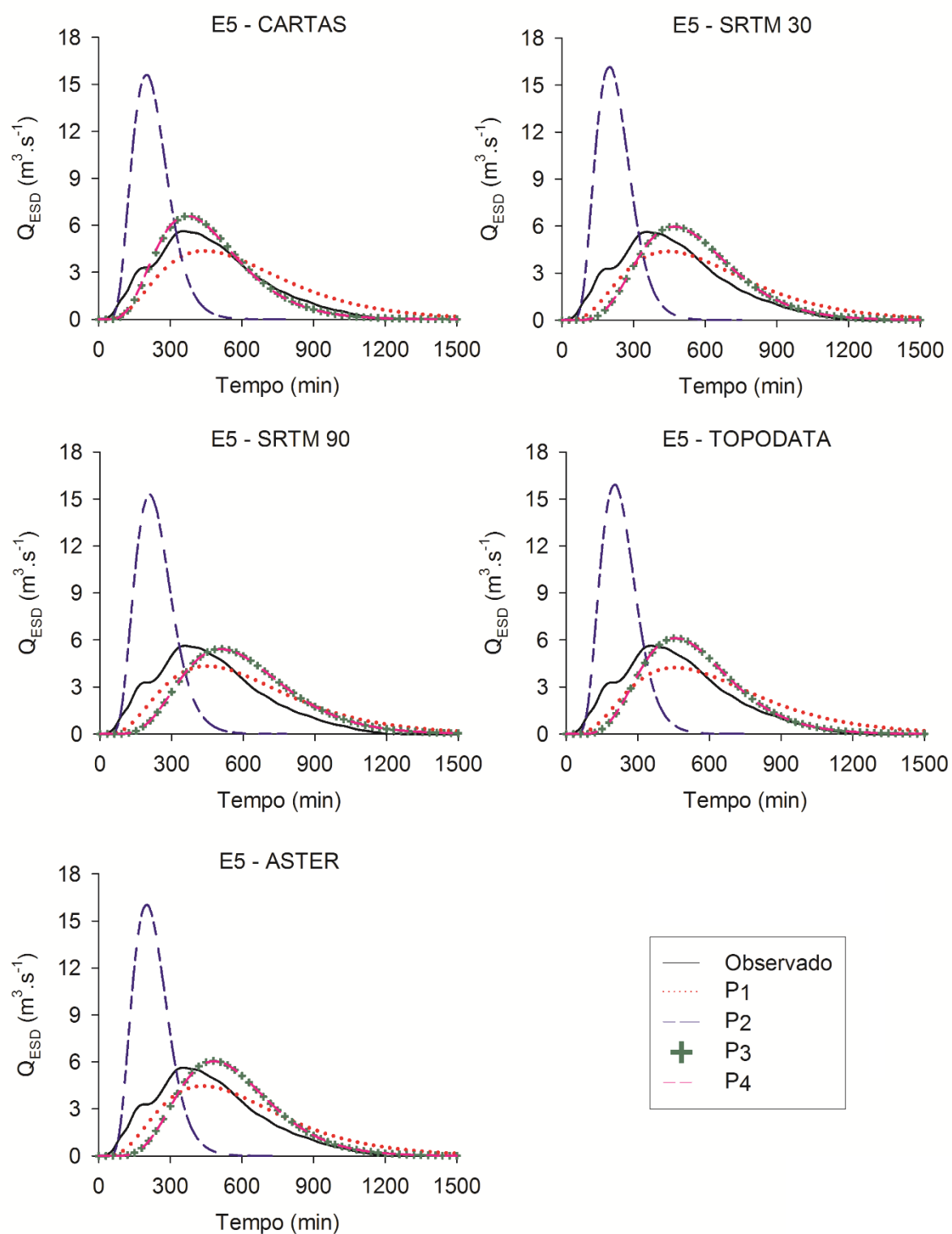


Figura B29 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

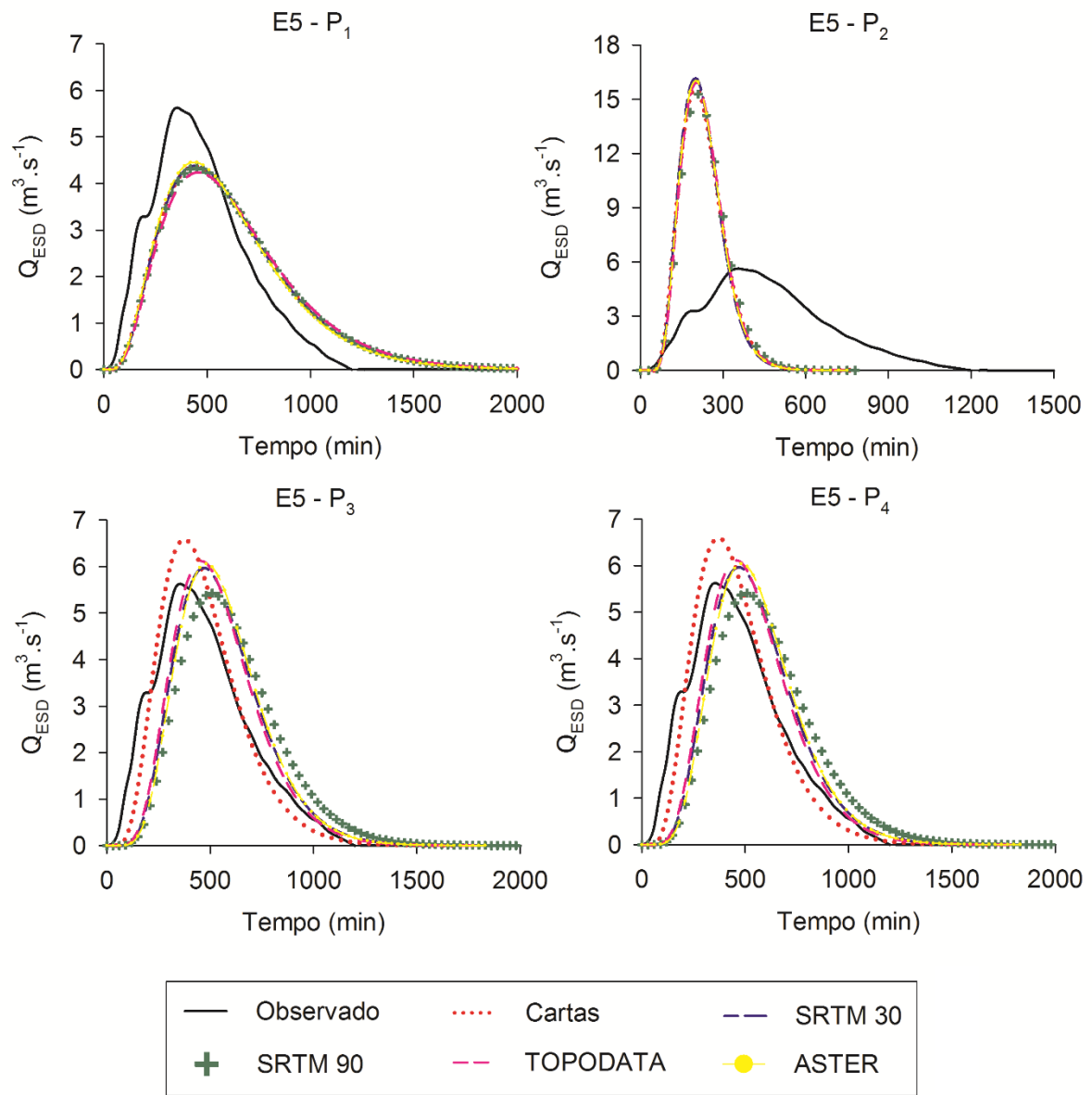


Figura B30 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

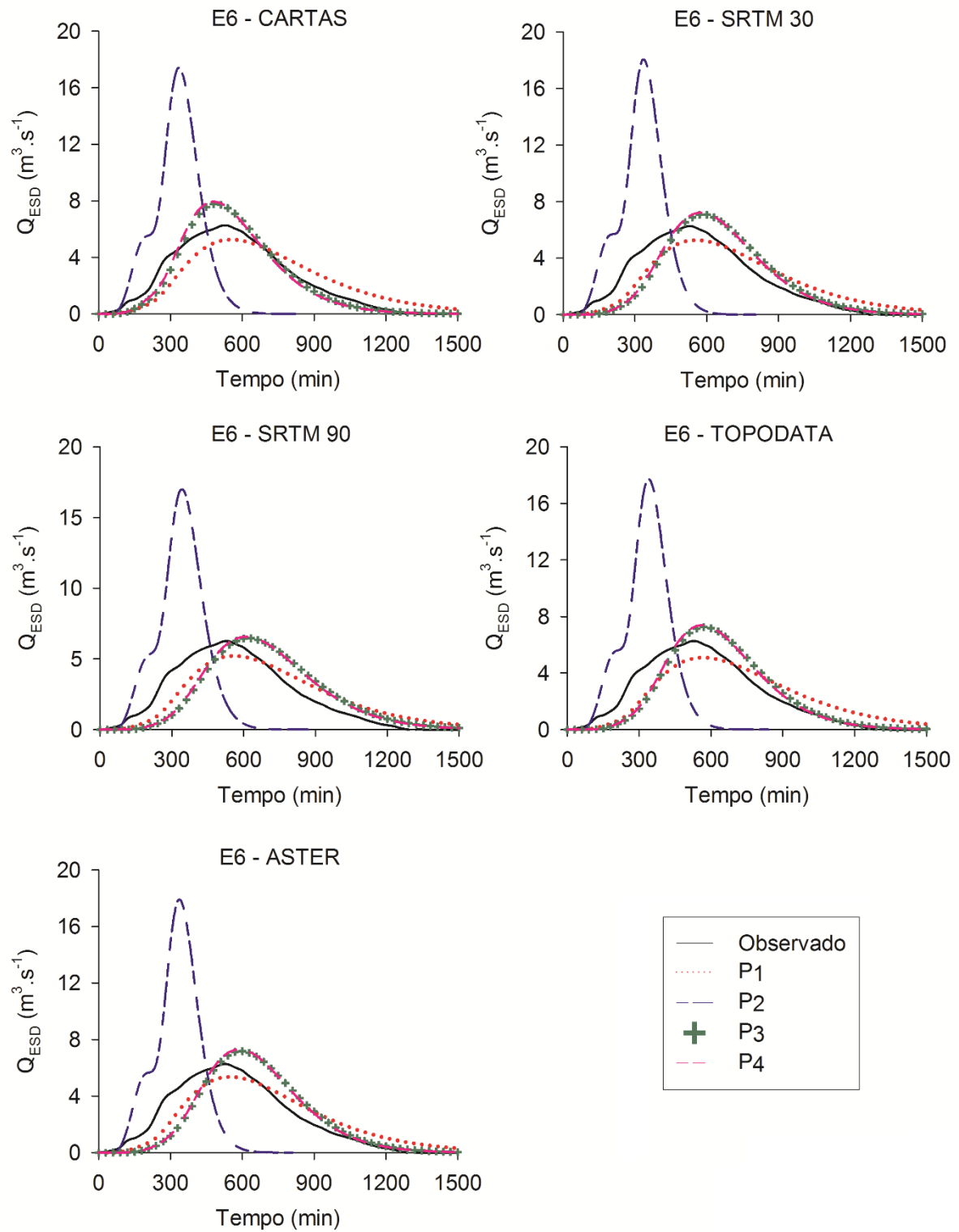


Figura B31 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

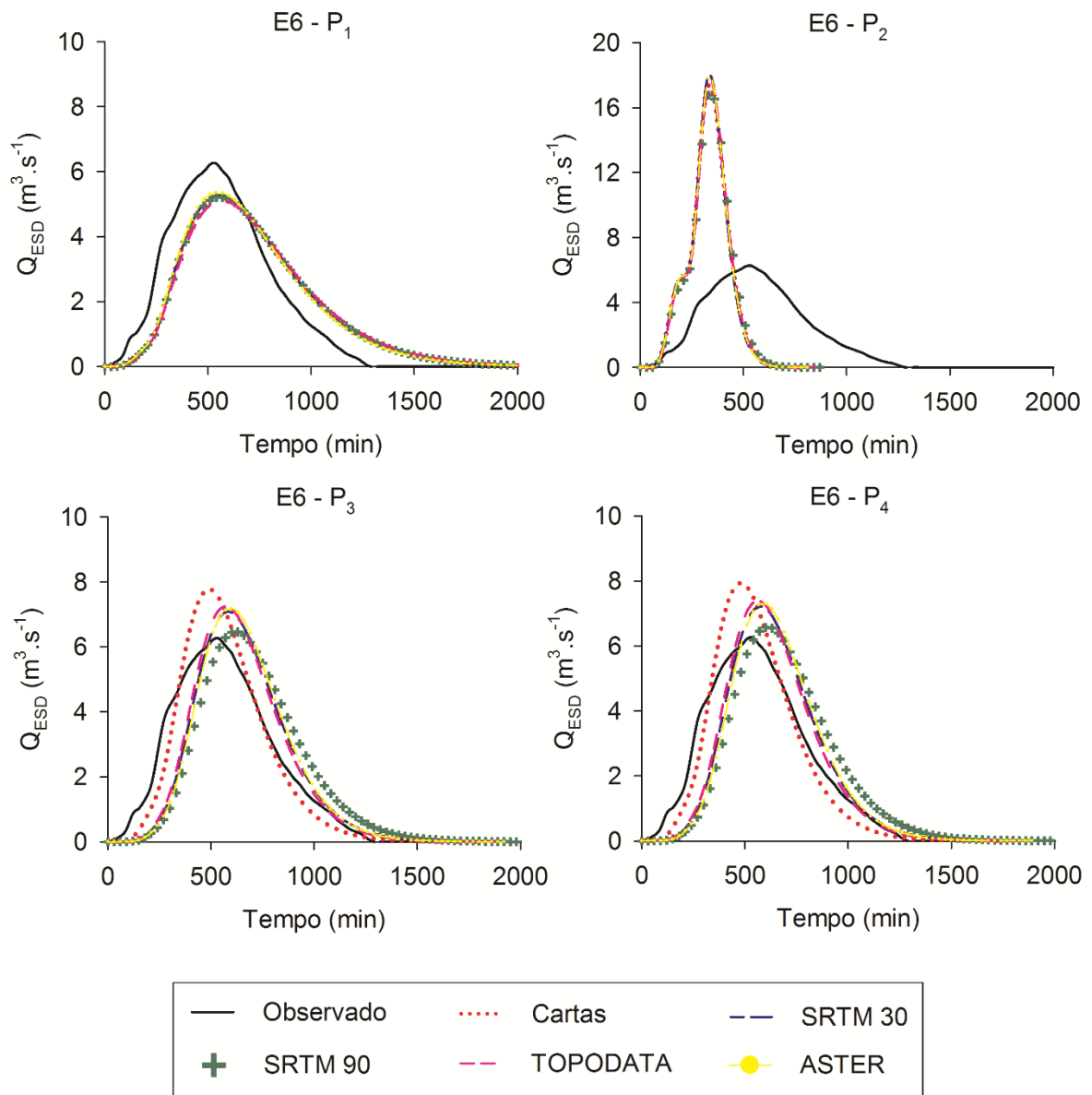


Figura B32 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

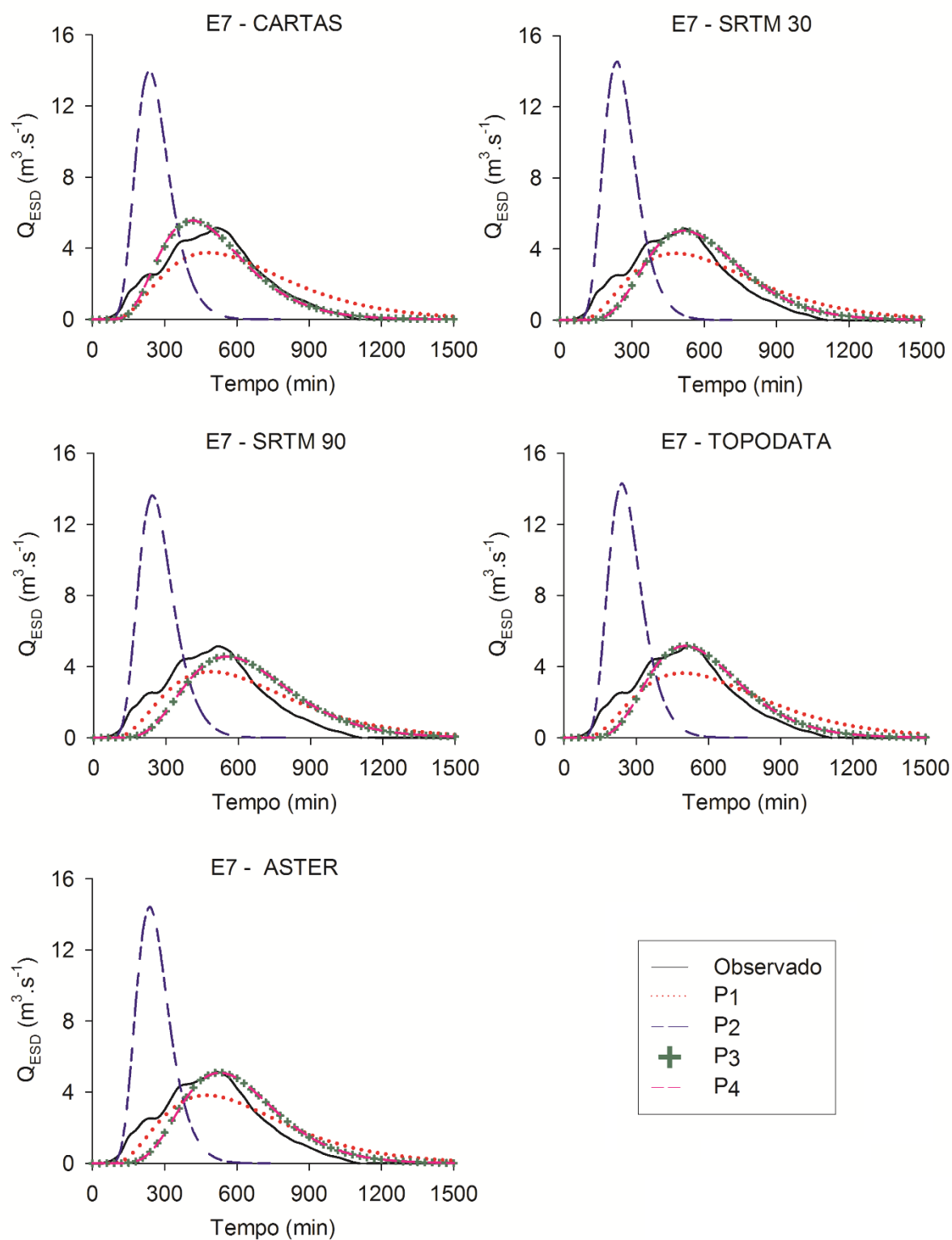


Figura B33 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

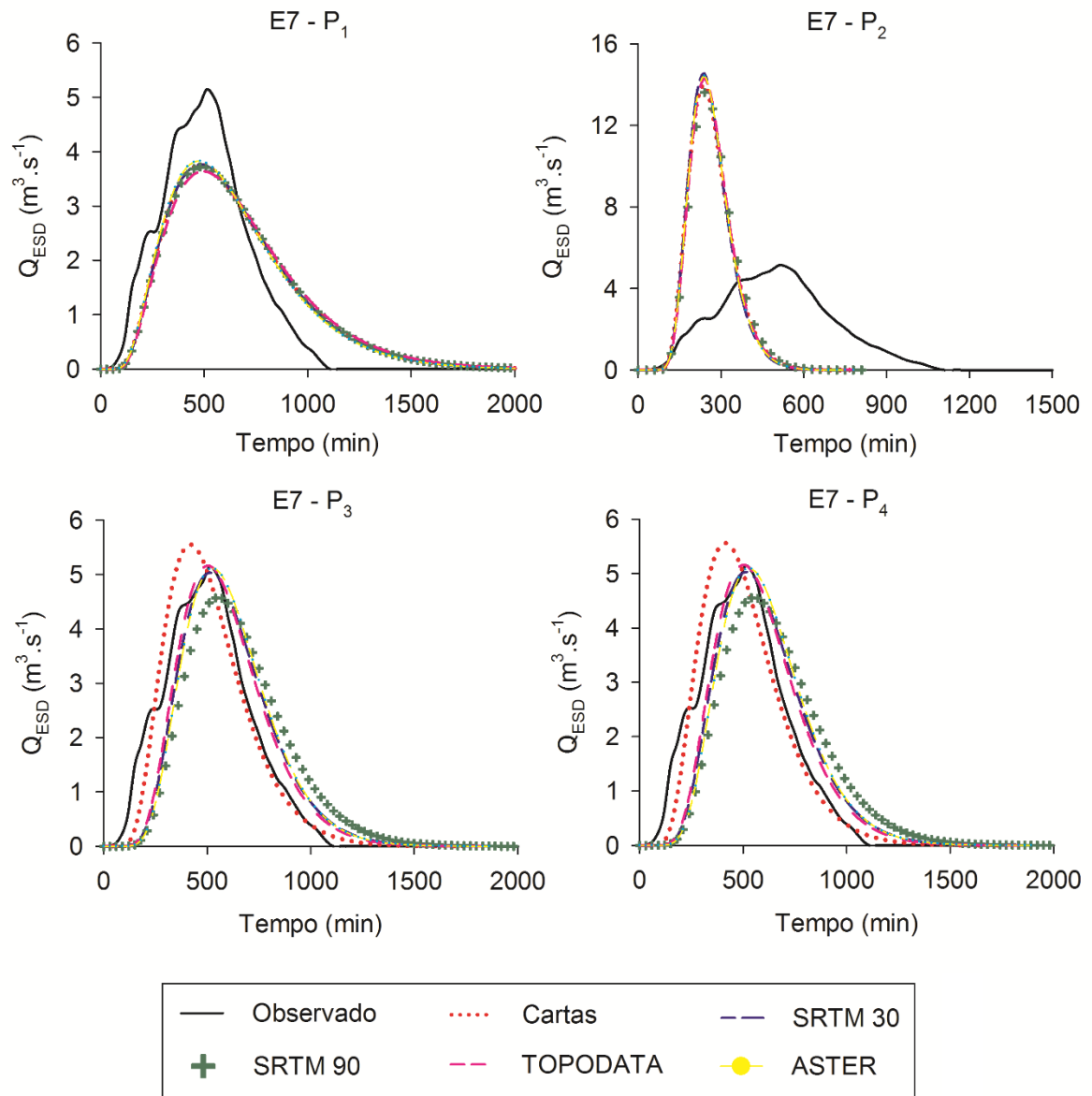


Figura B34 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

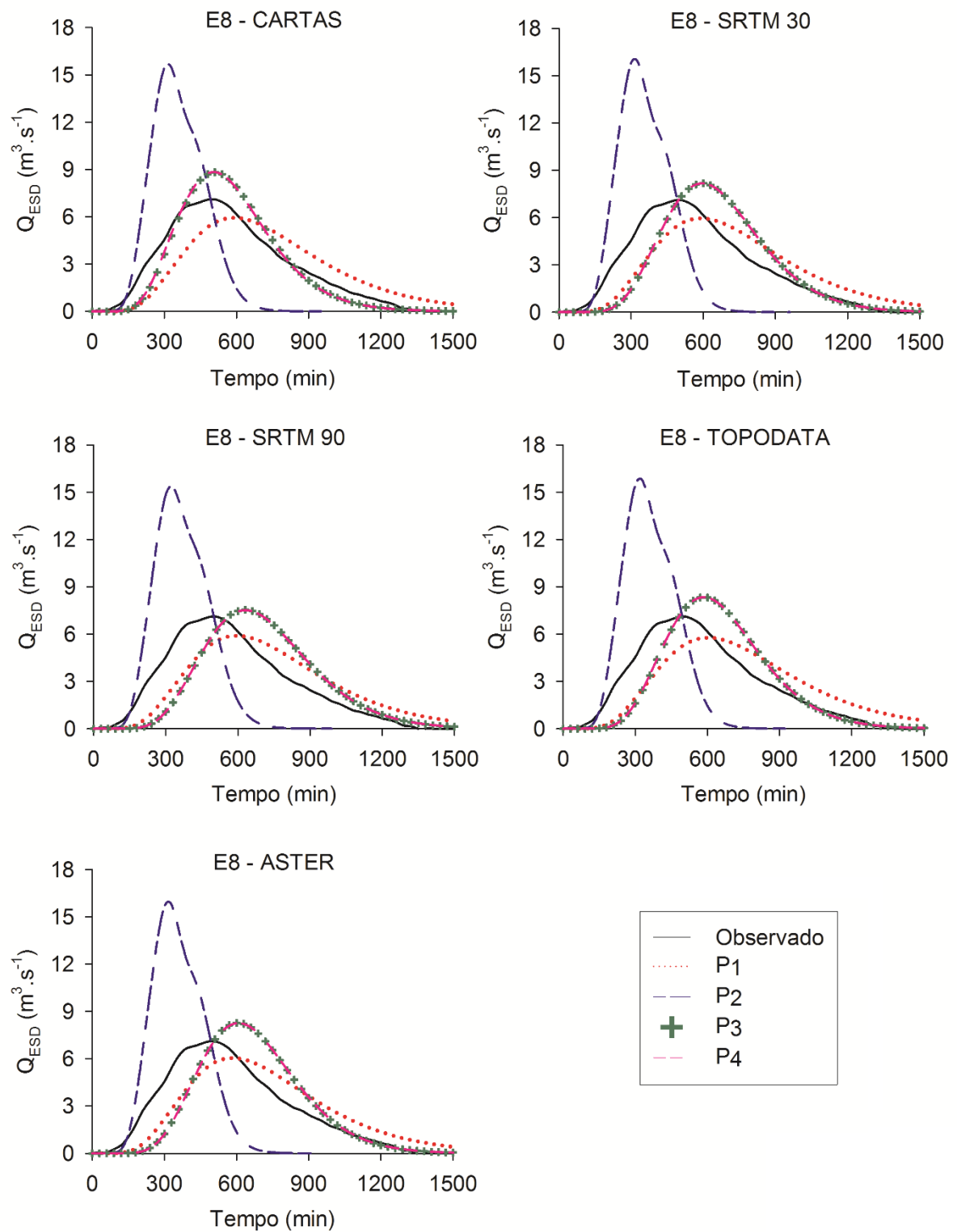


Figura B35 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHACN, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

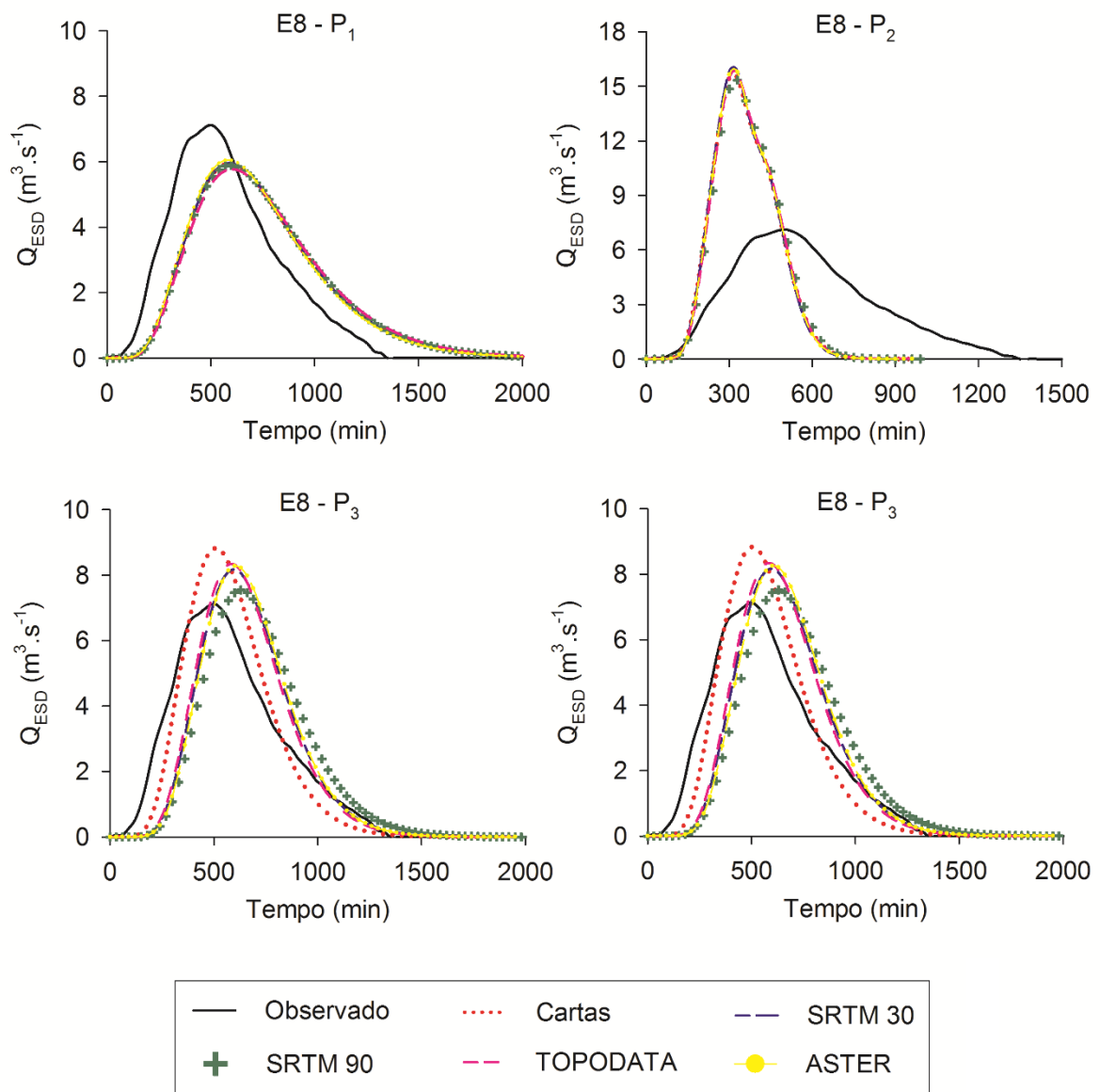


Figura B36 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHACN, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

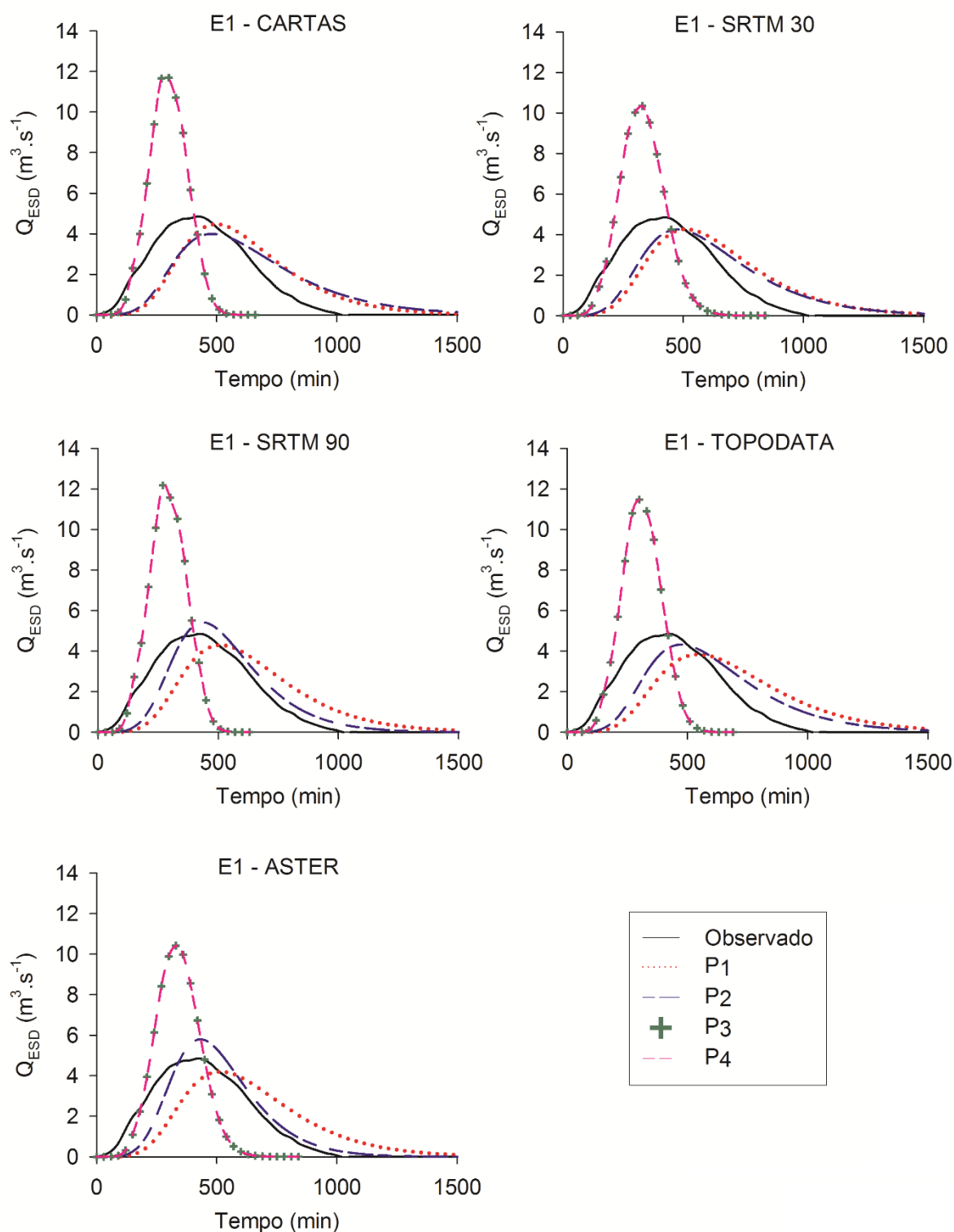


Figura B37 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

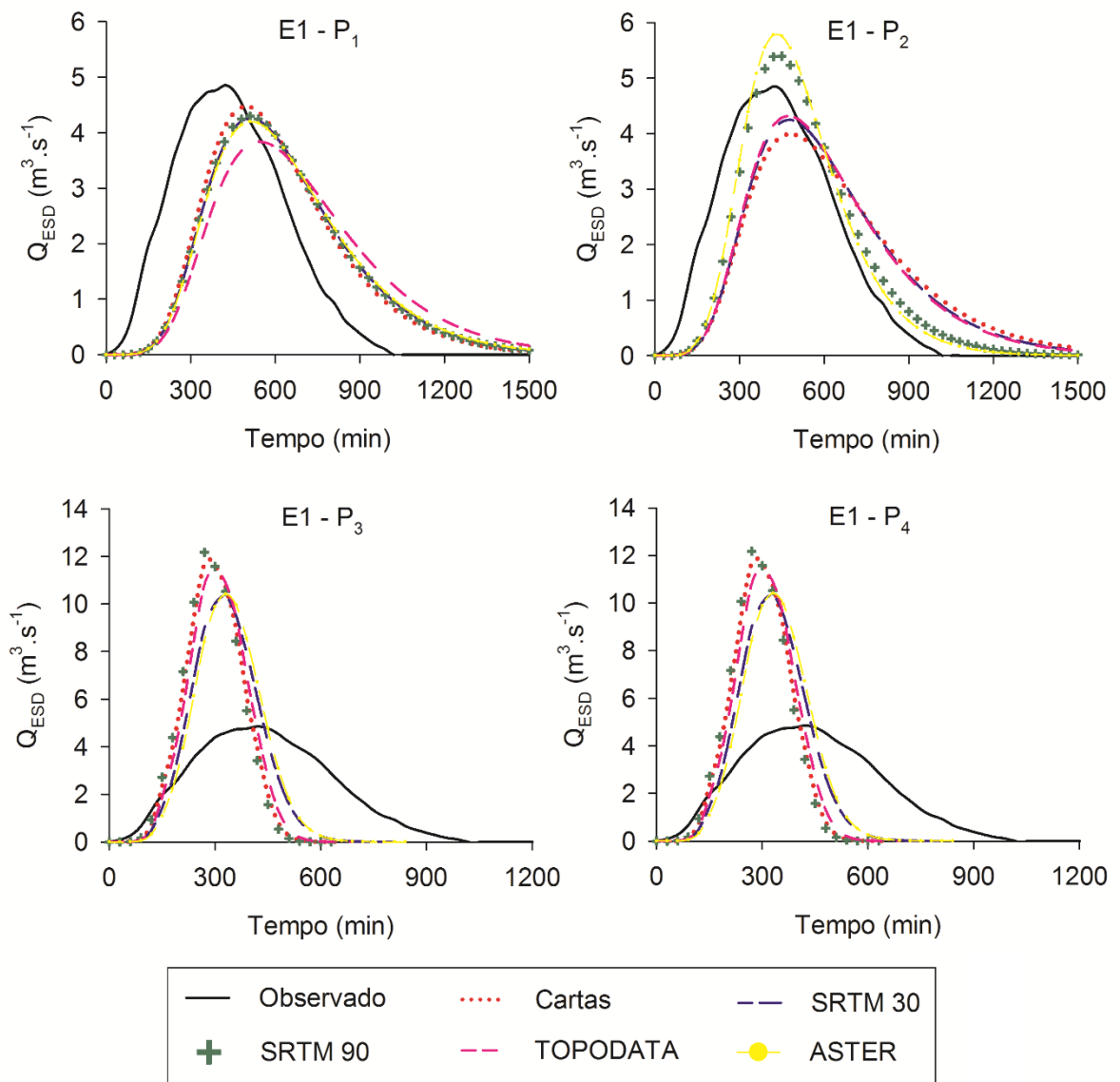


Figura B38 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

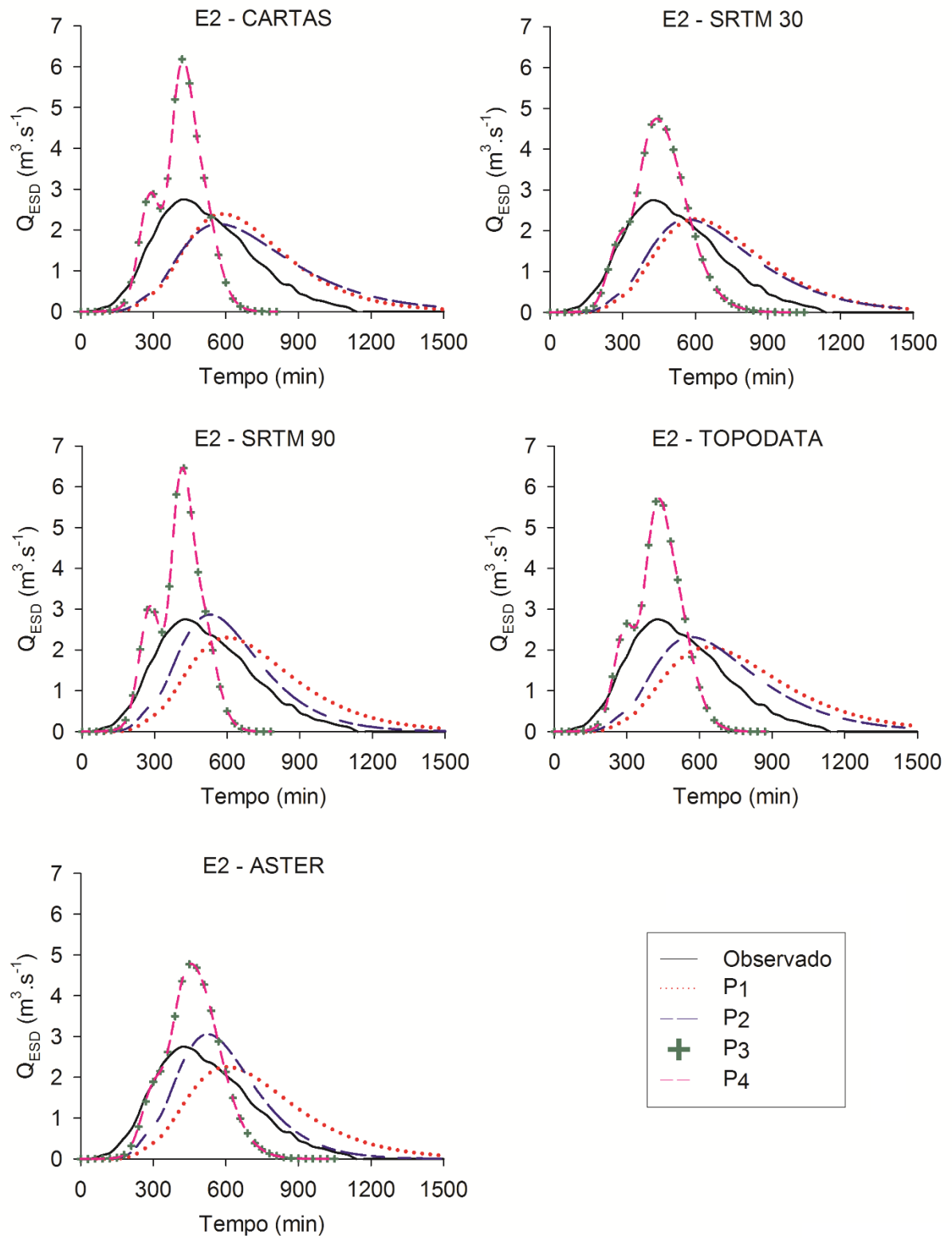


Figura B39 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

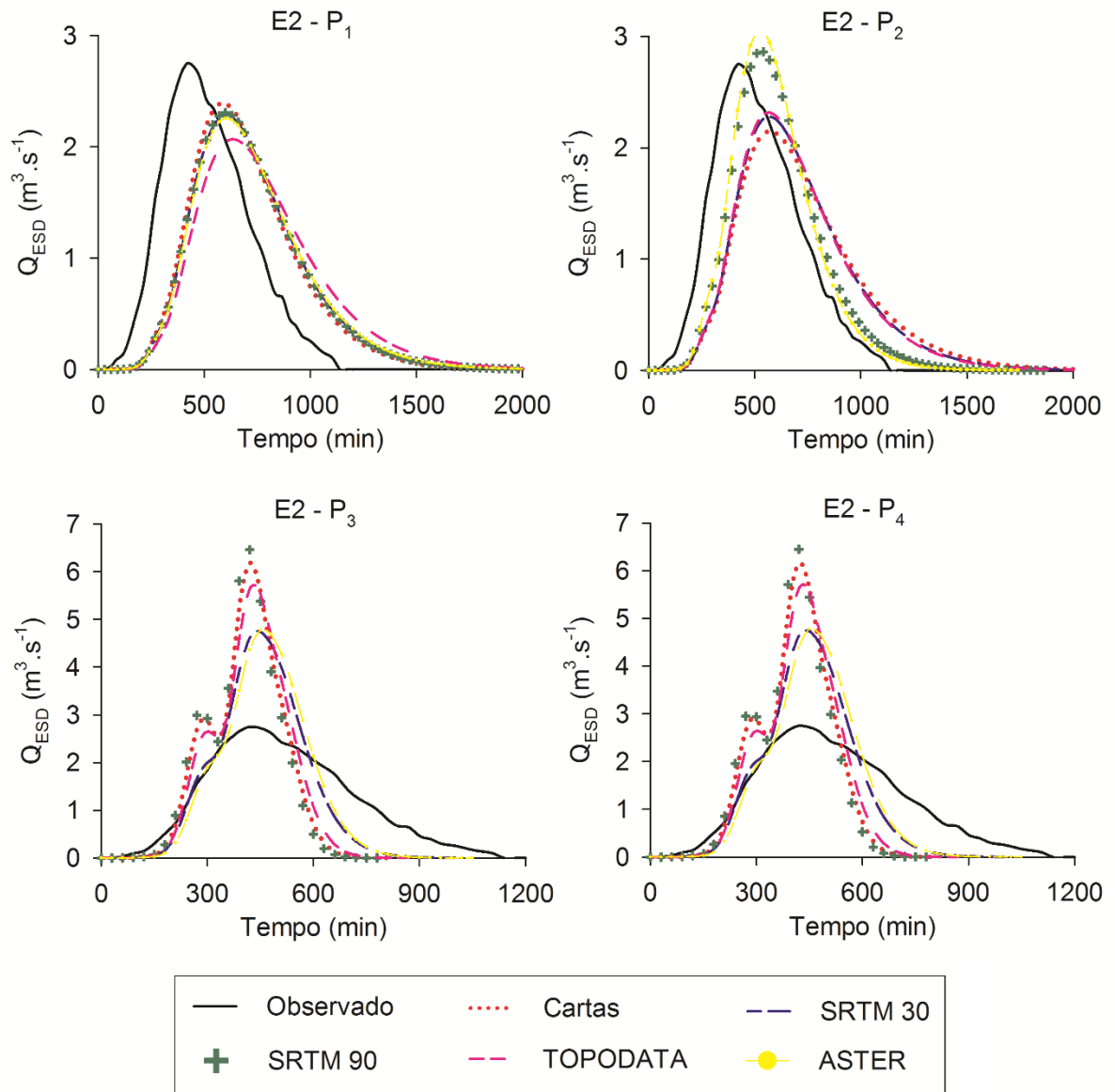


Figura B40 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

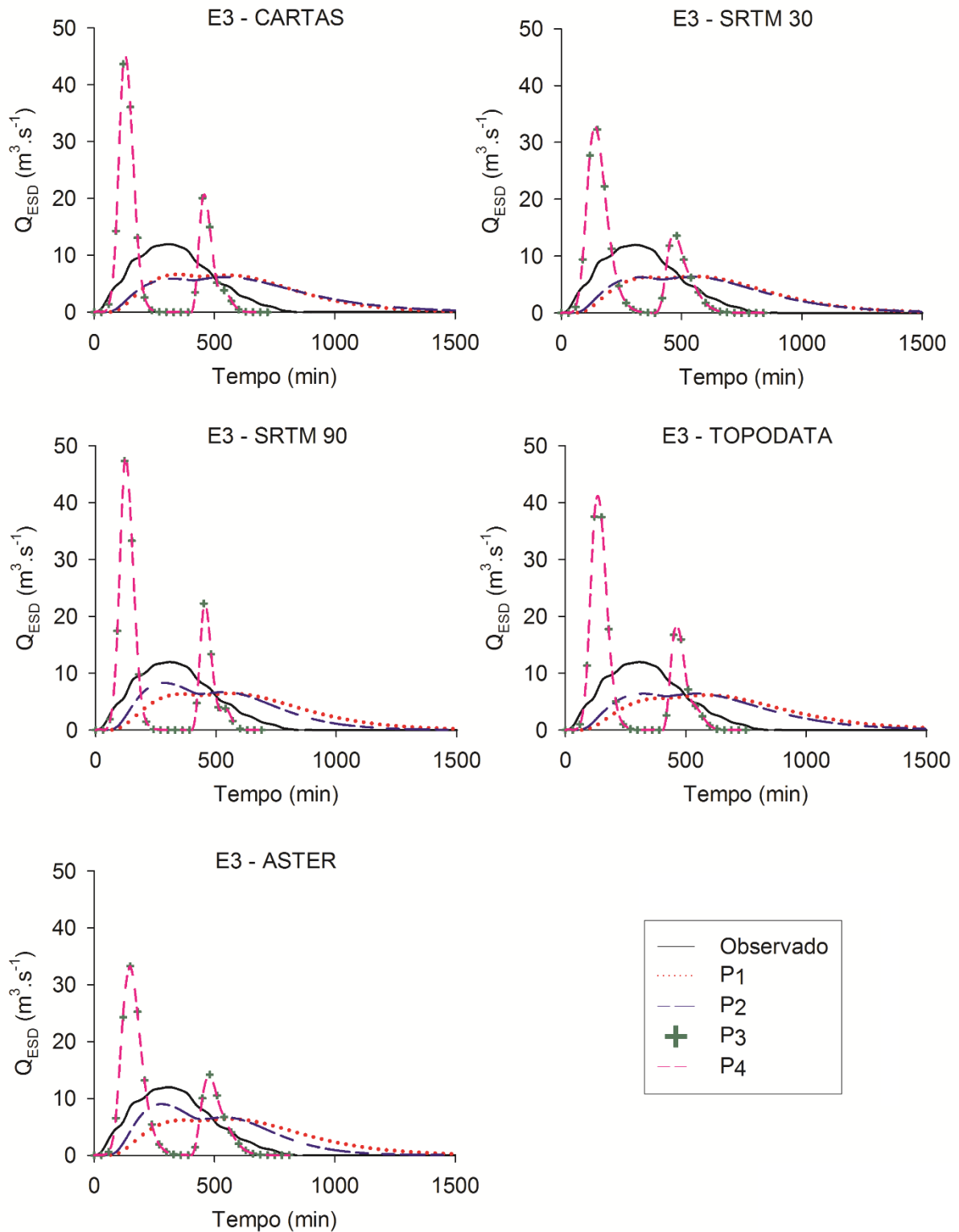


Figura B41 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

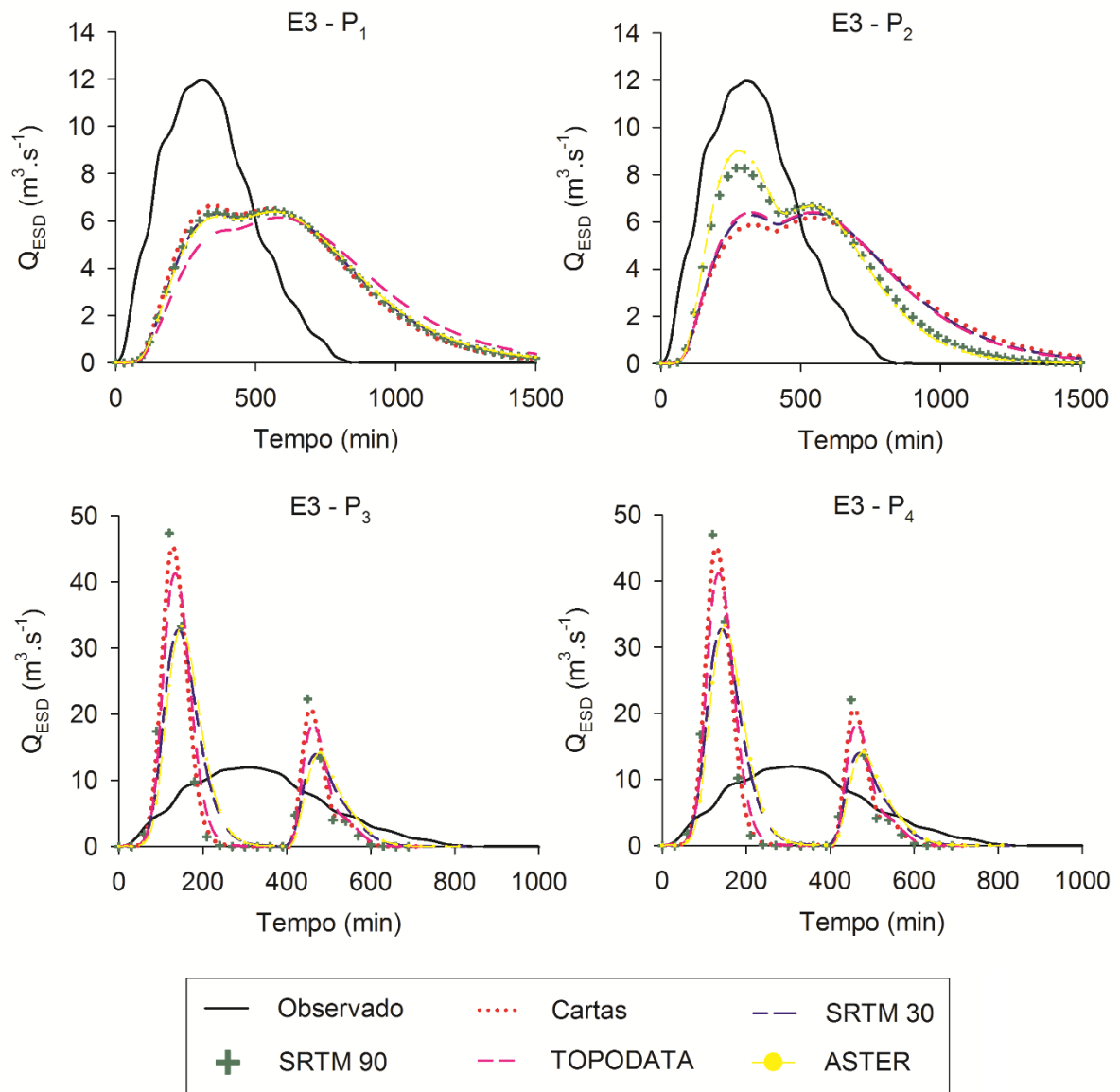


Figura B42 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

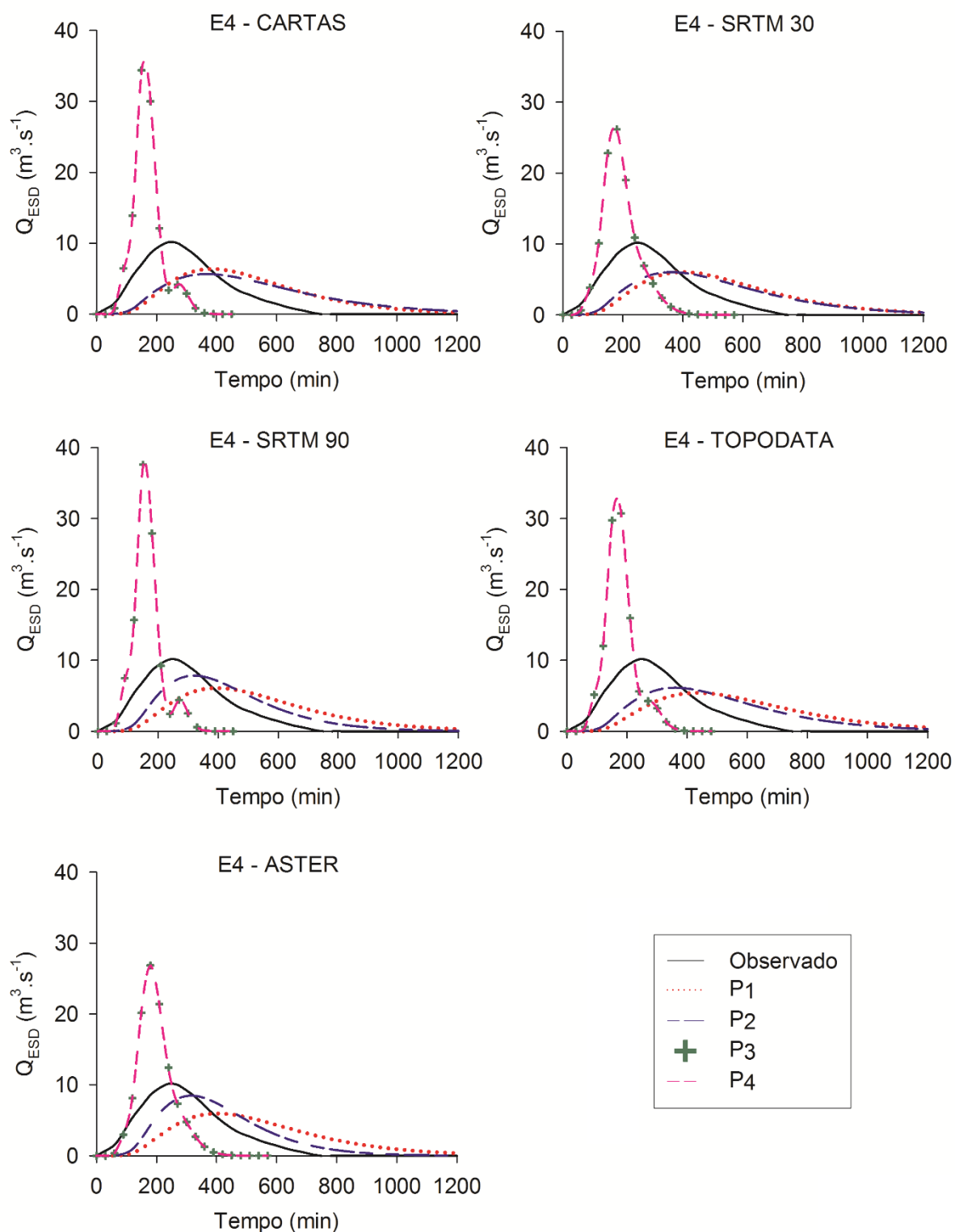


Figura B43 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

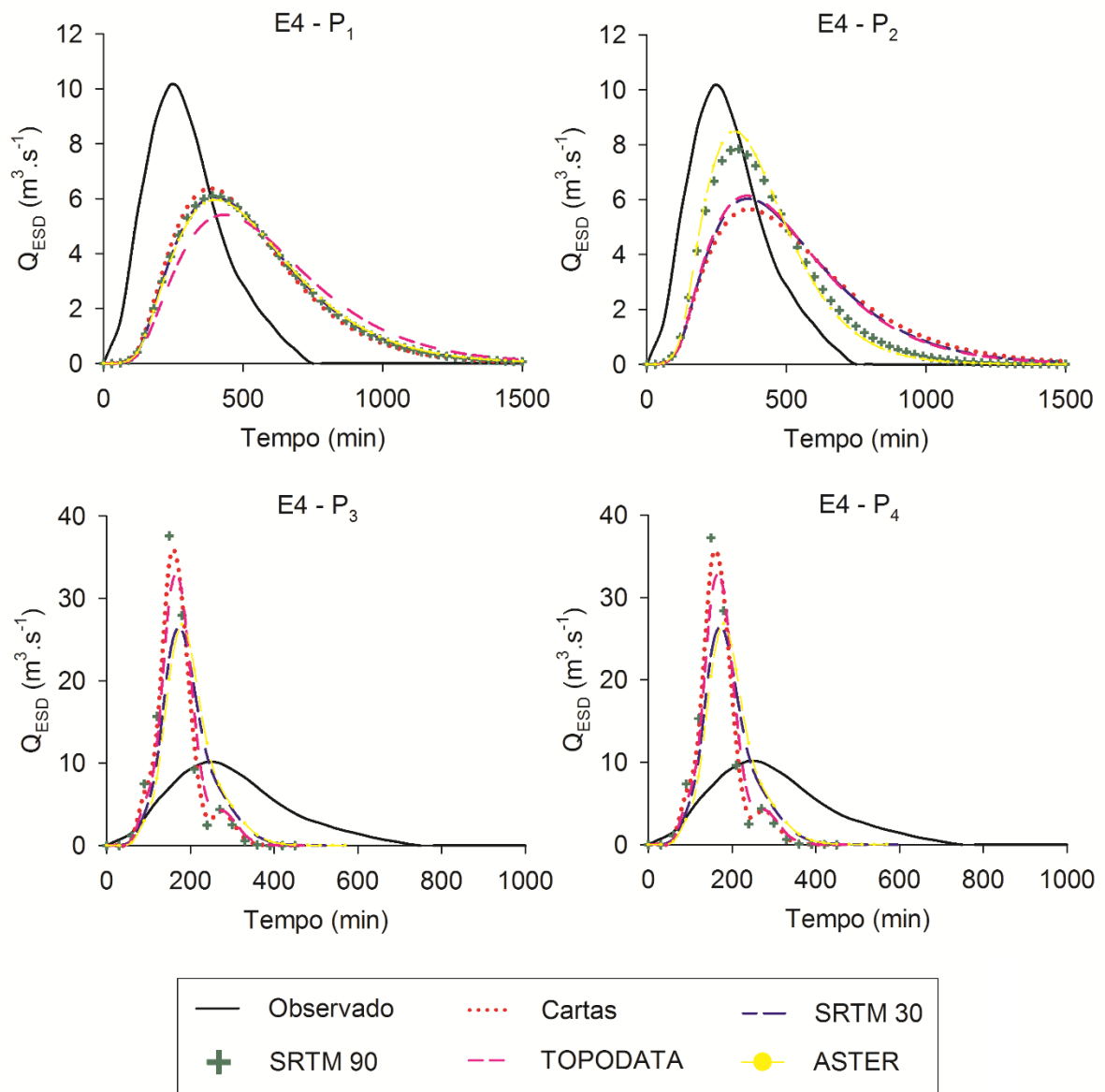


Figura B44 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

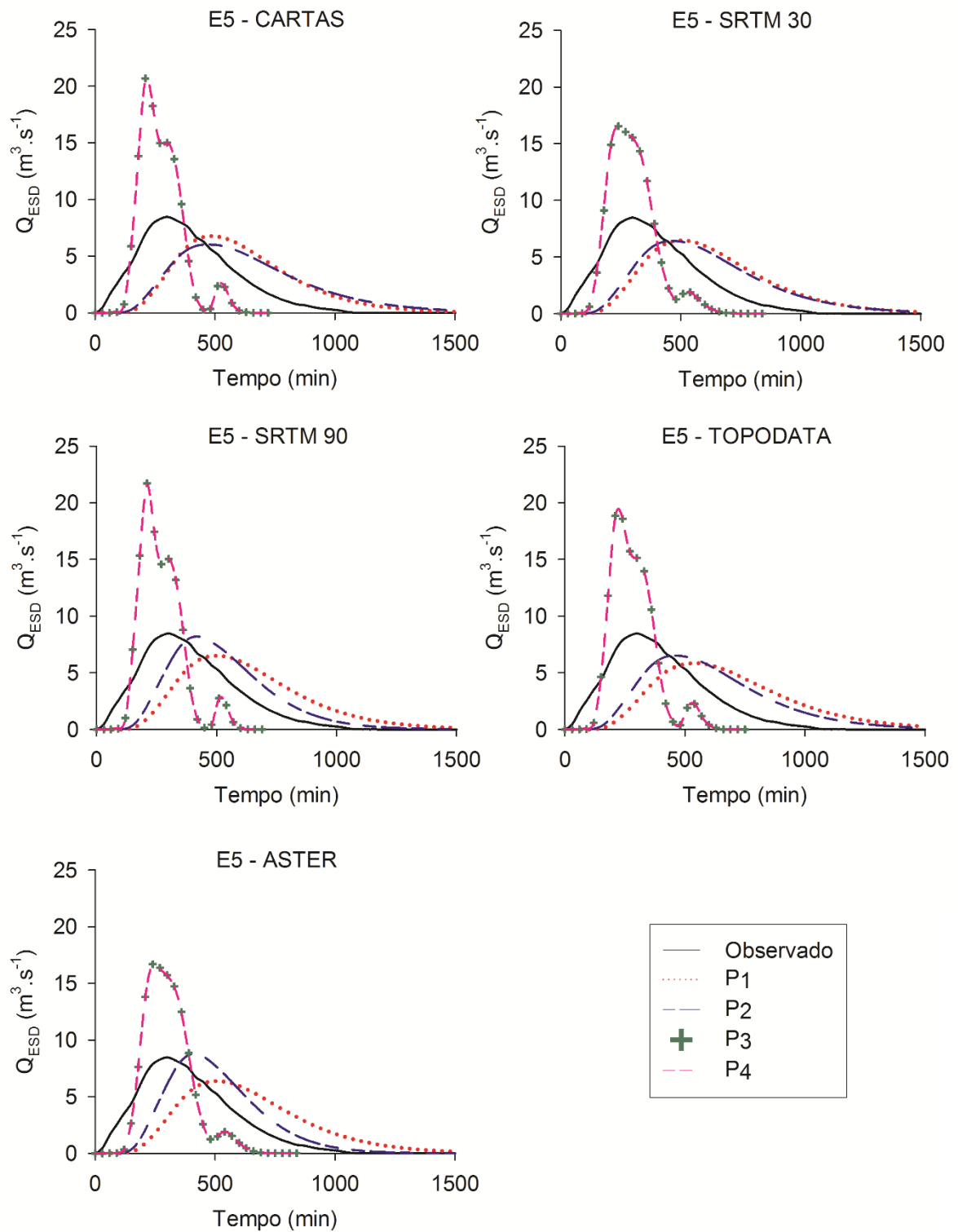


Figura B45 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

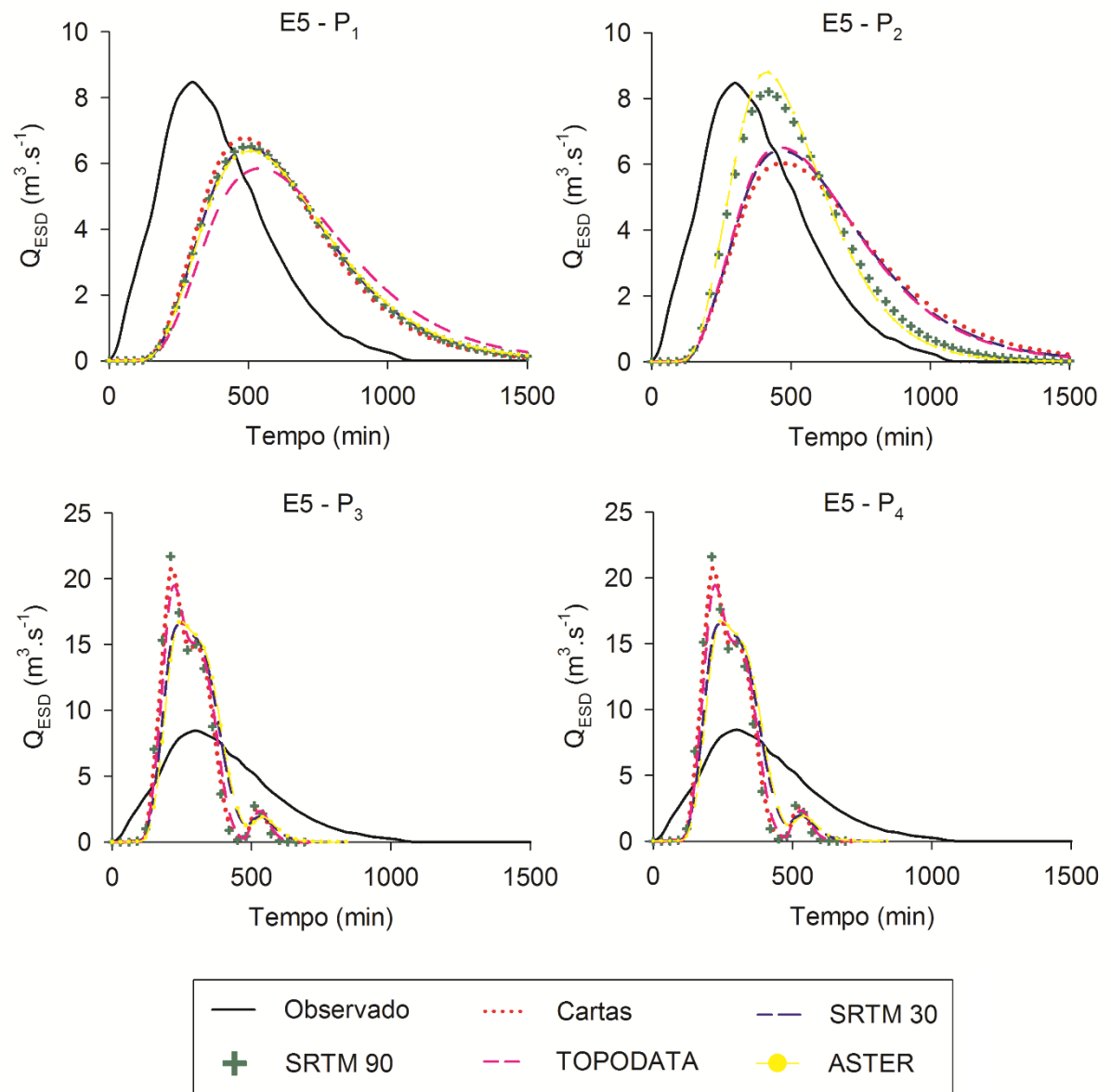


Figura B46 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

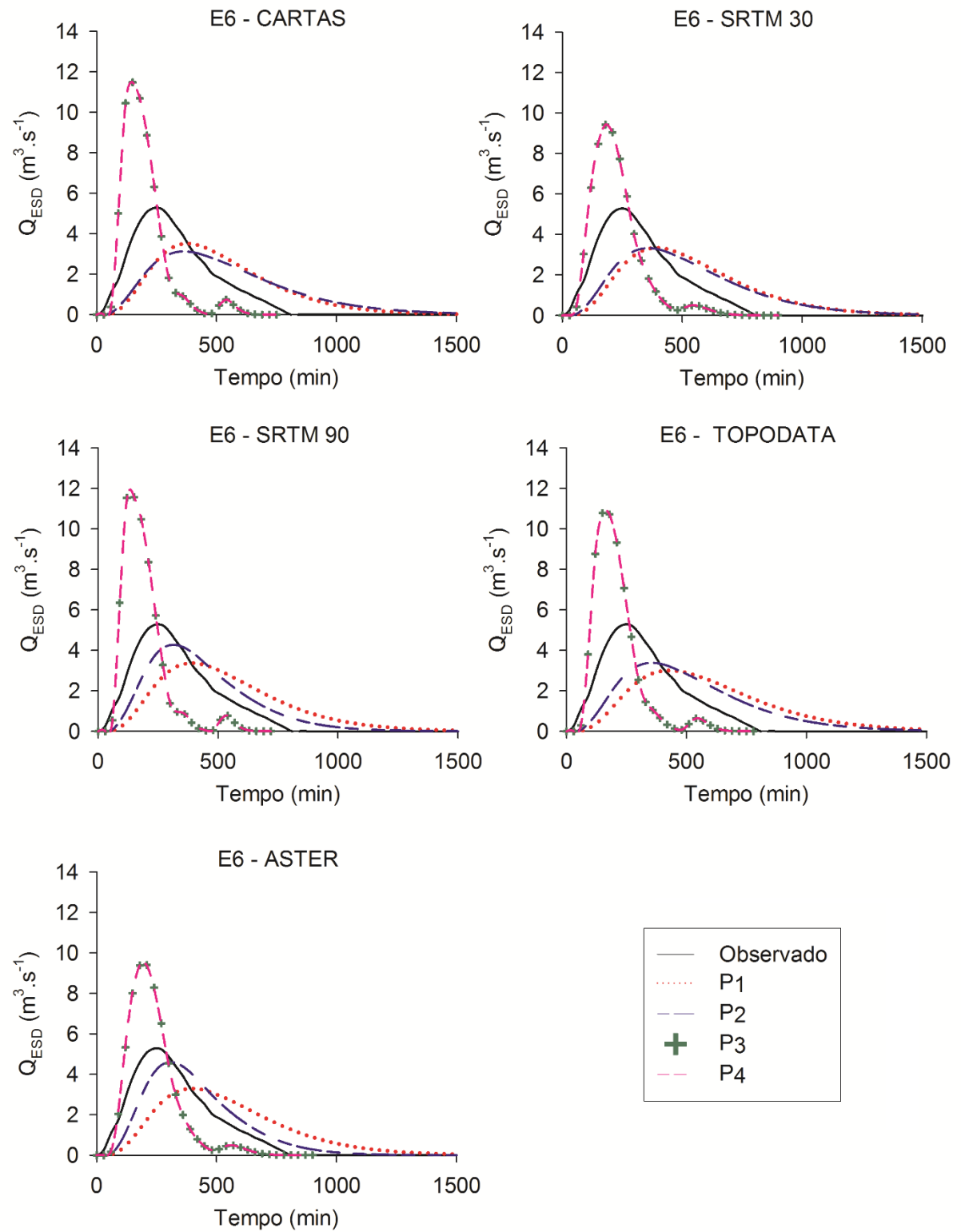


Figura B47 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

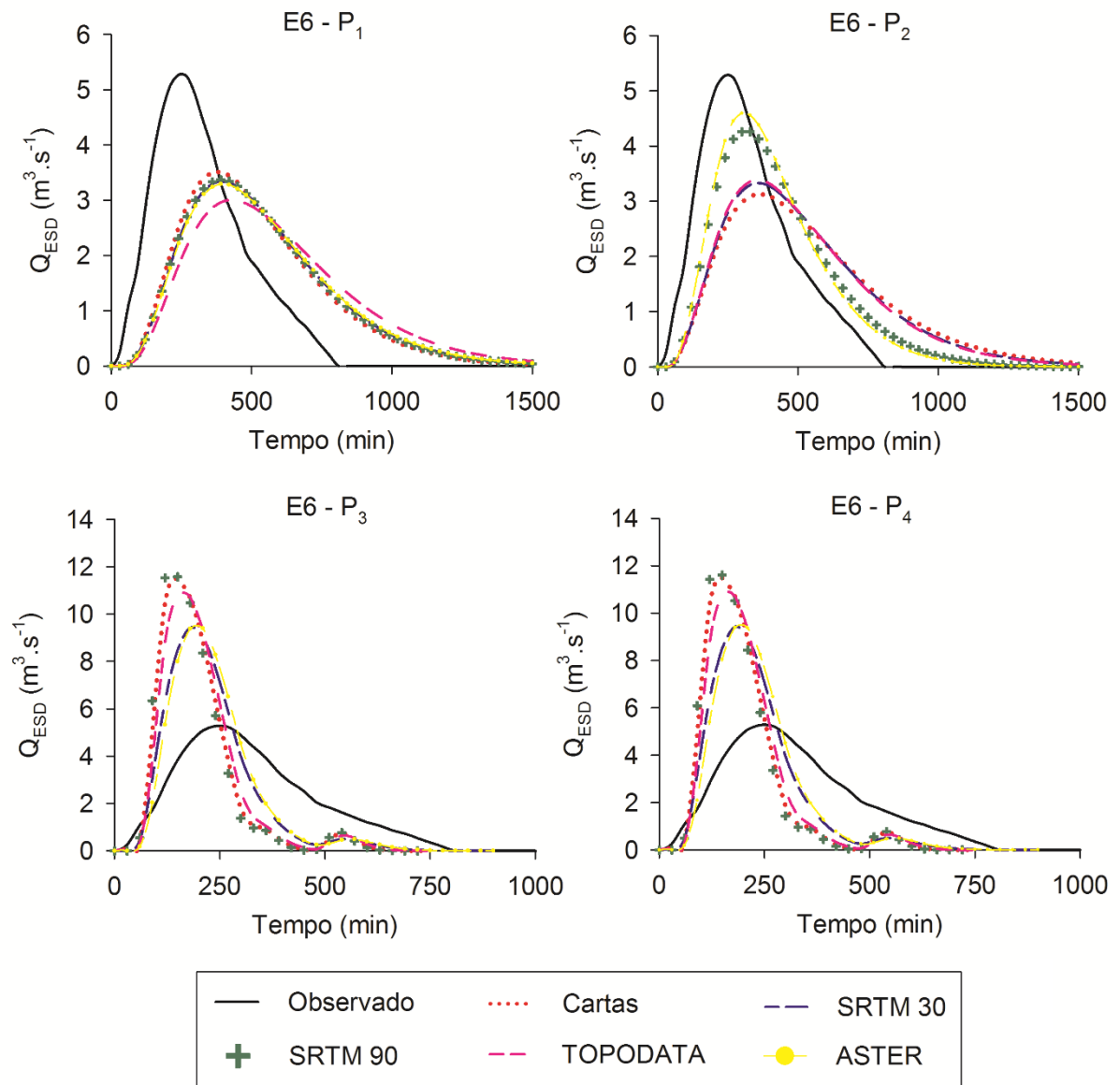


Figura B48 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

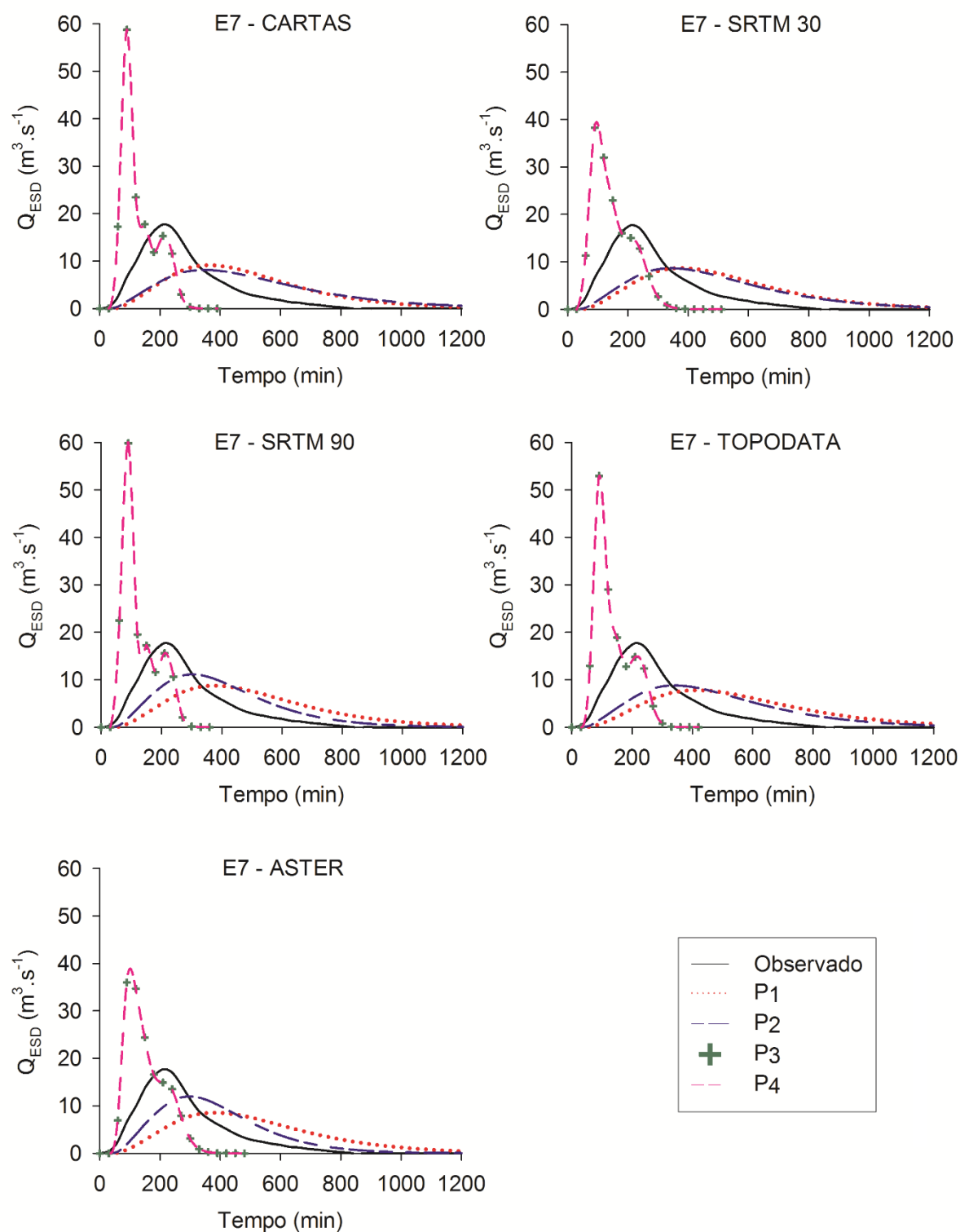


Figura B49 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

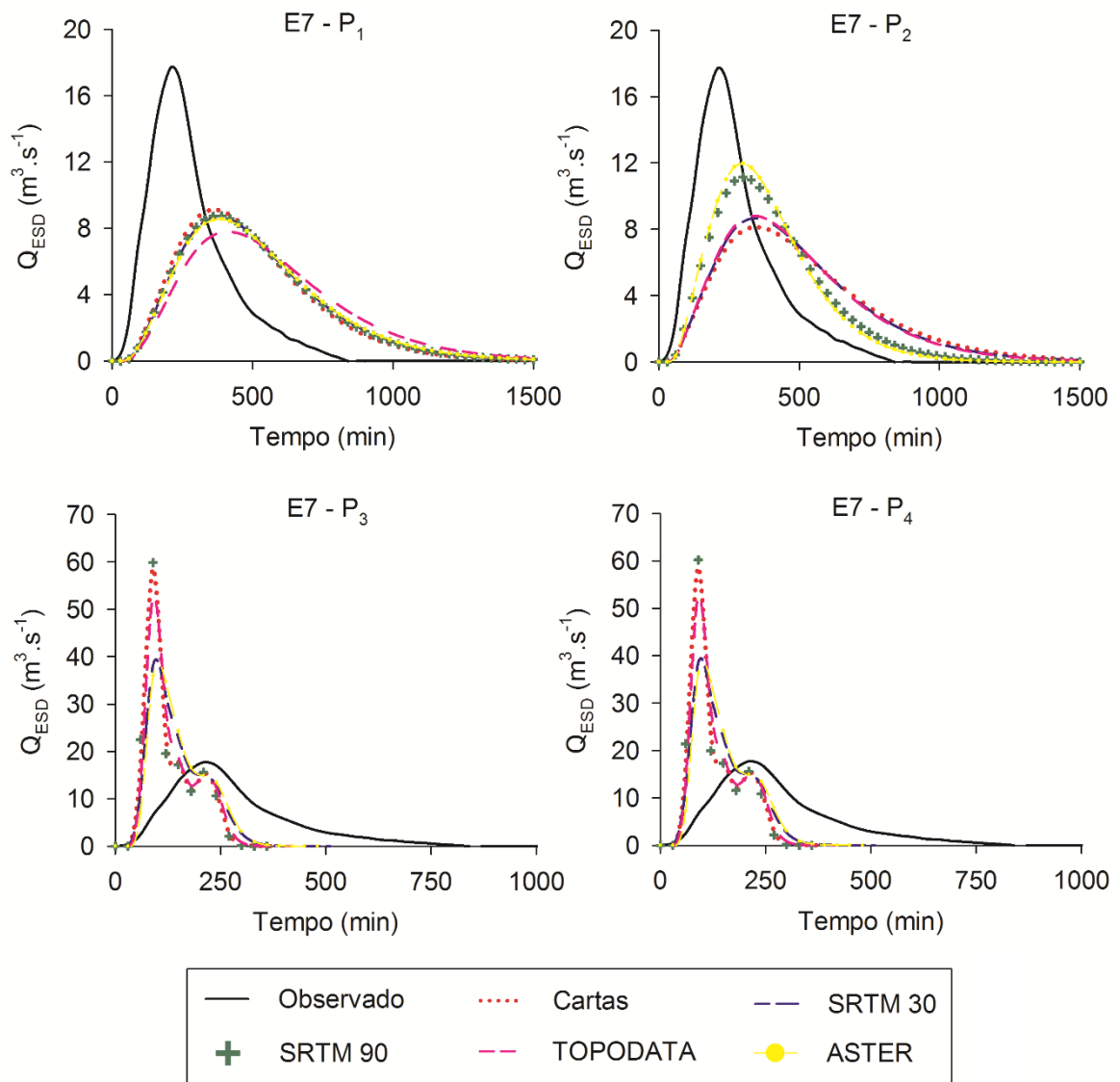


Figura B50 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

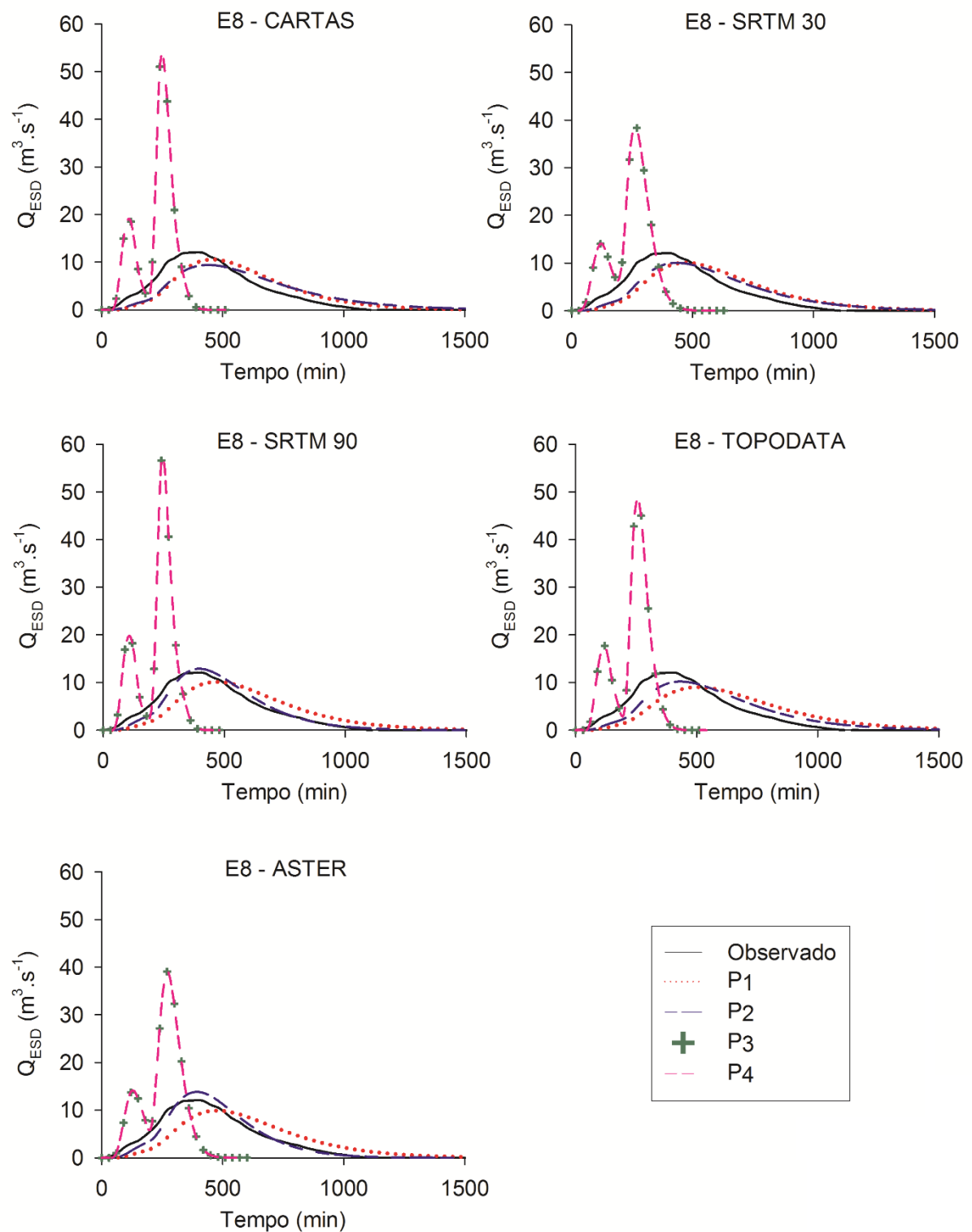


Figura B51 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

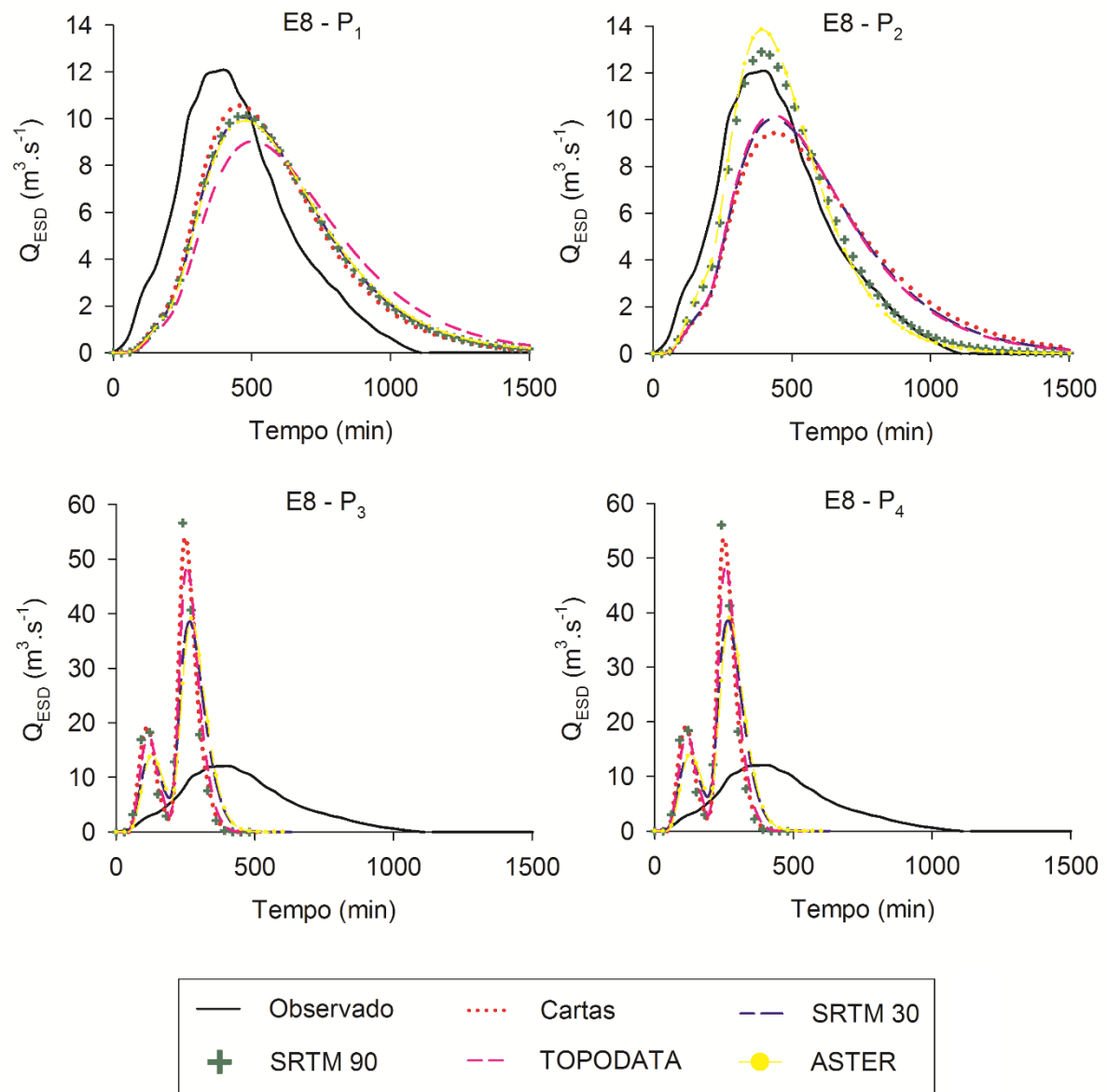


Figura B52 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

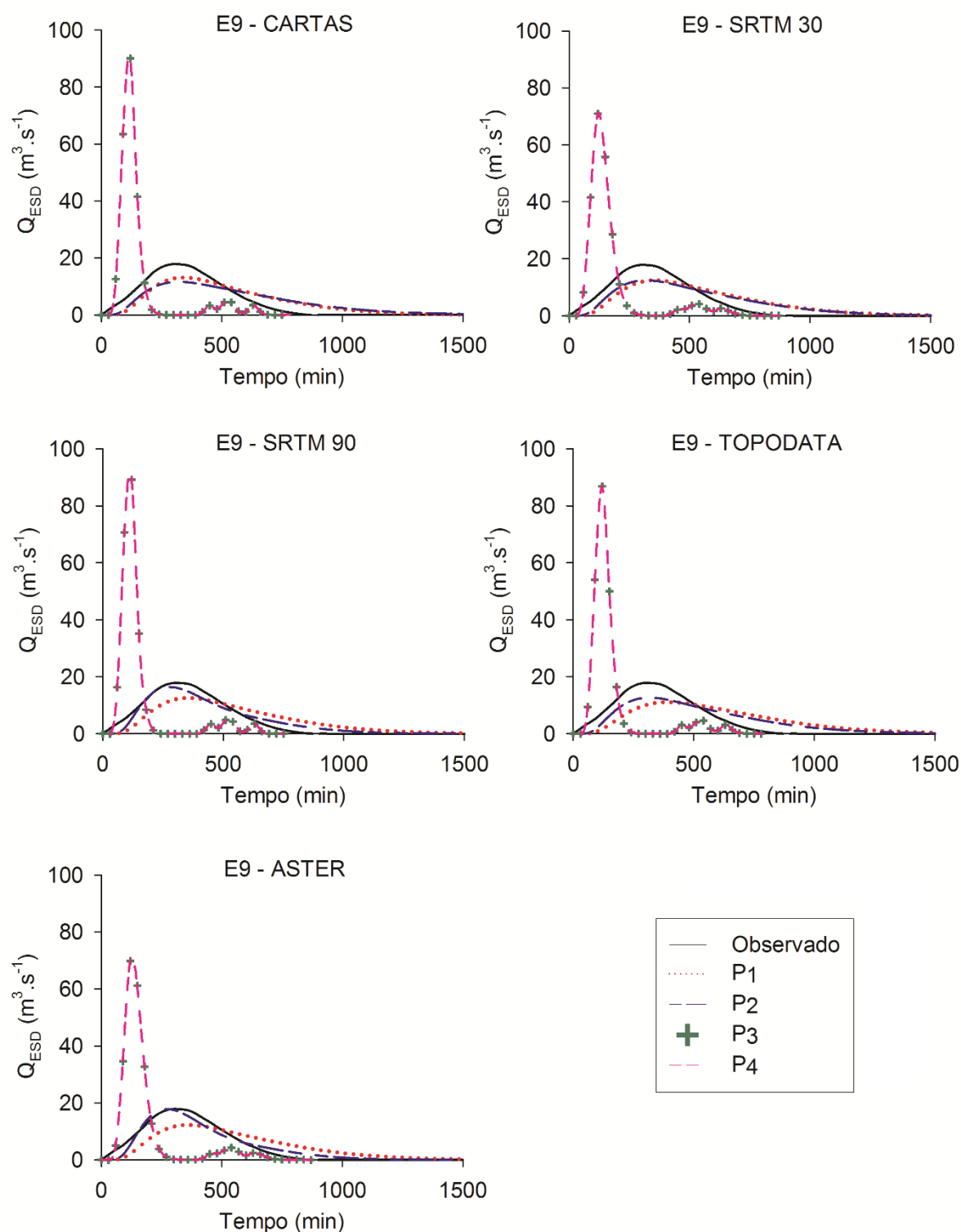


Figura B53 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

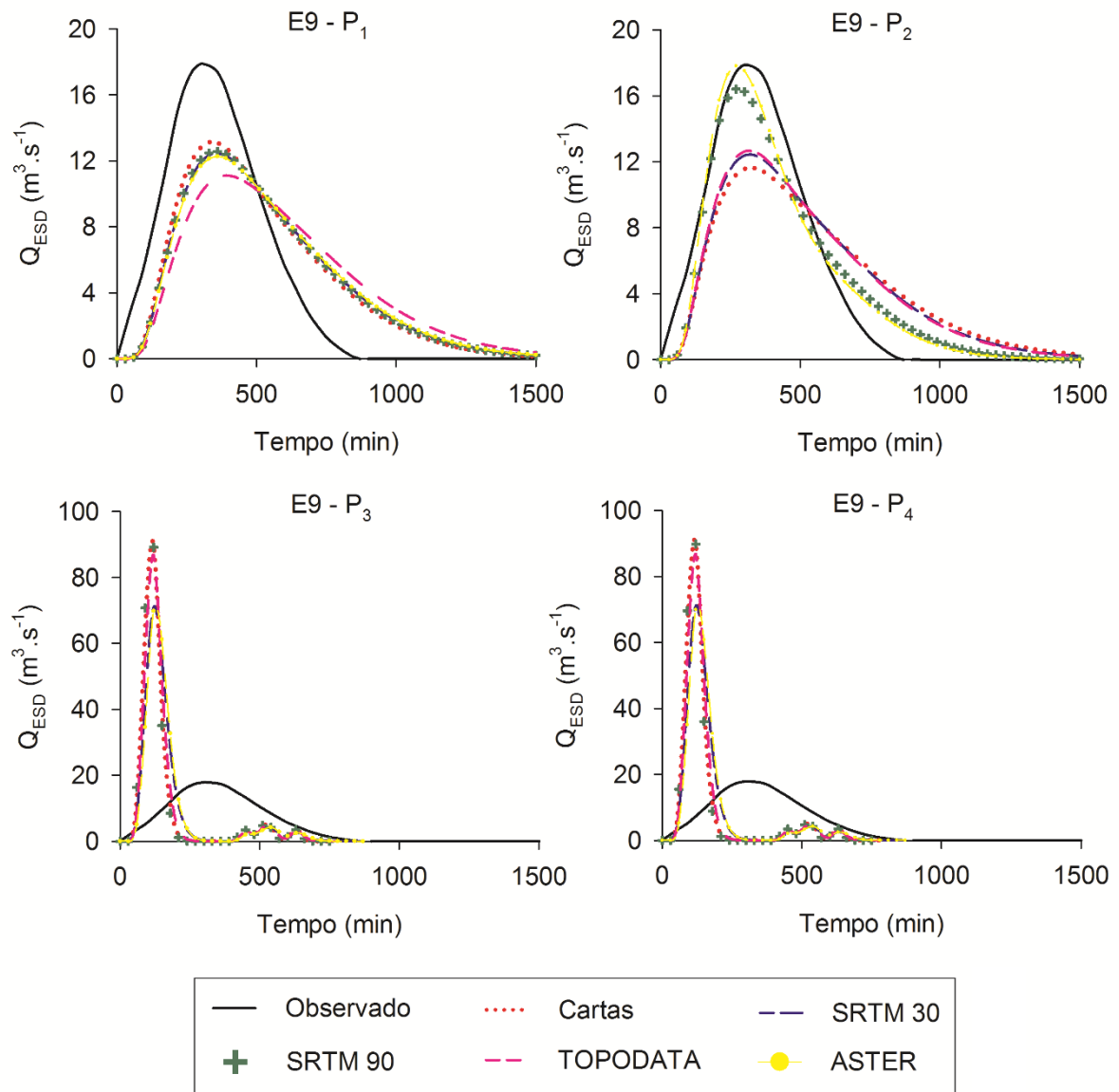


Figura B54 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

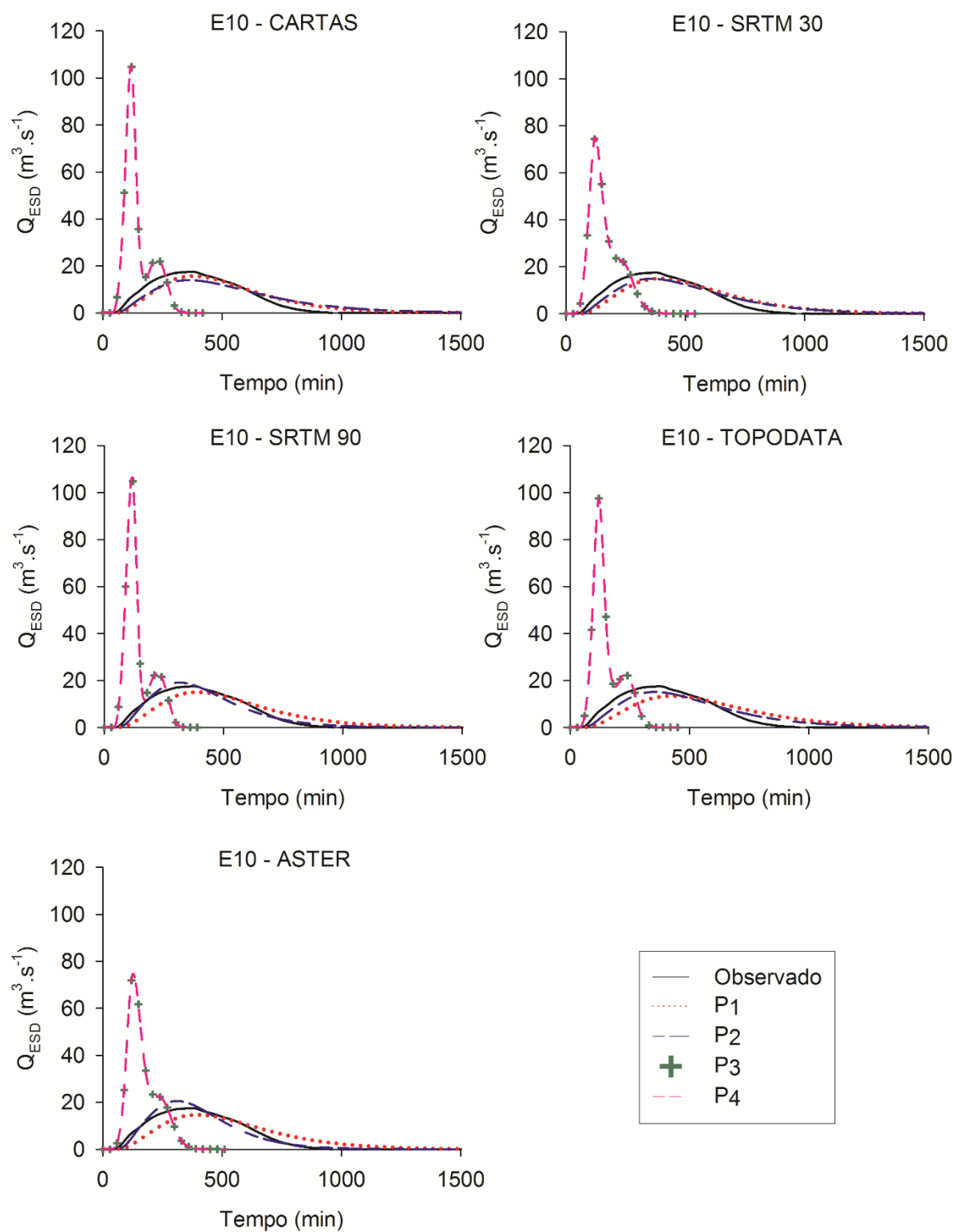


Figura B55 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHRJ, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

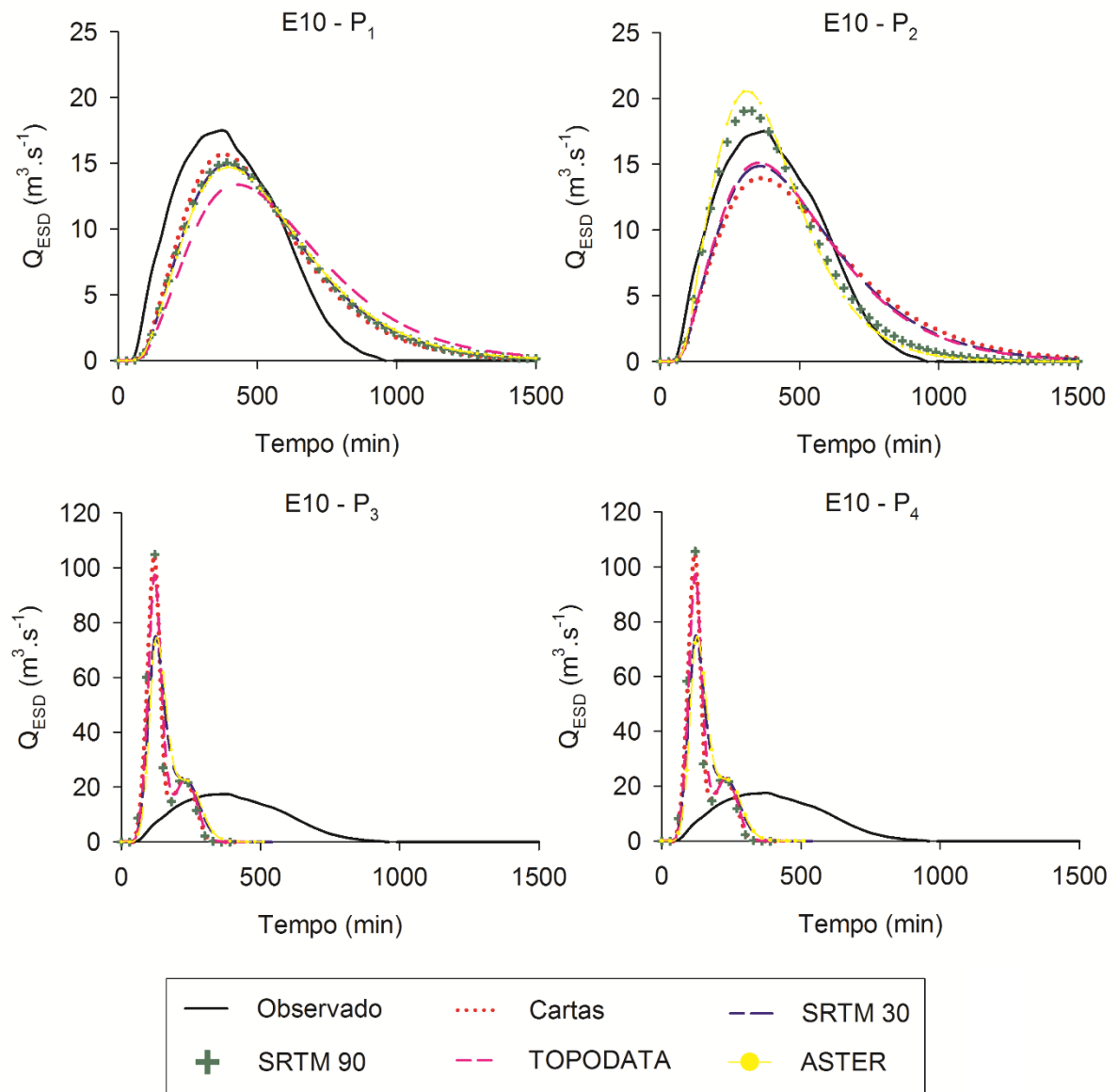


Figura B56 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHRJ, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

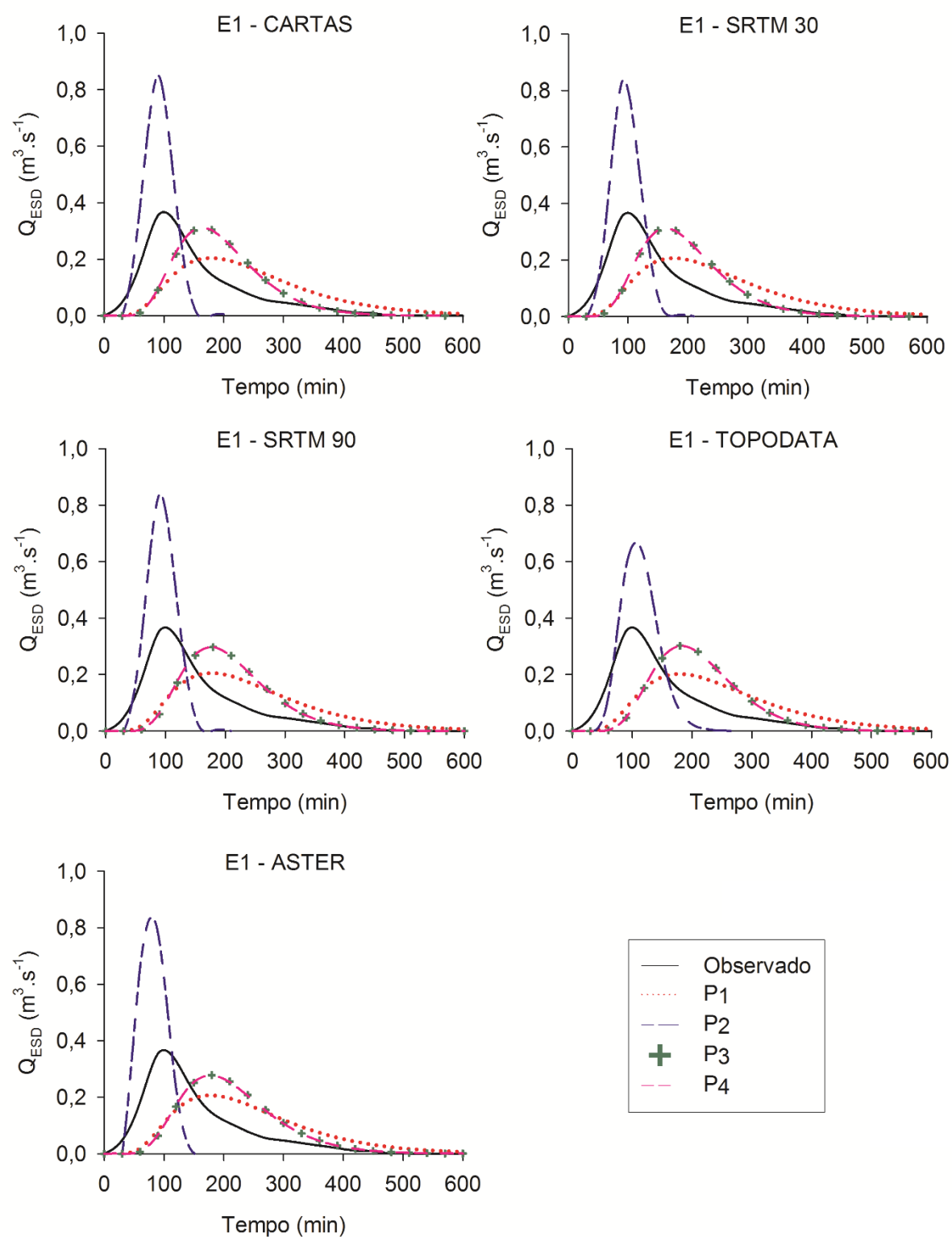


Figura B57 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

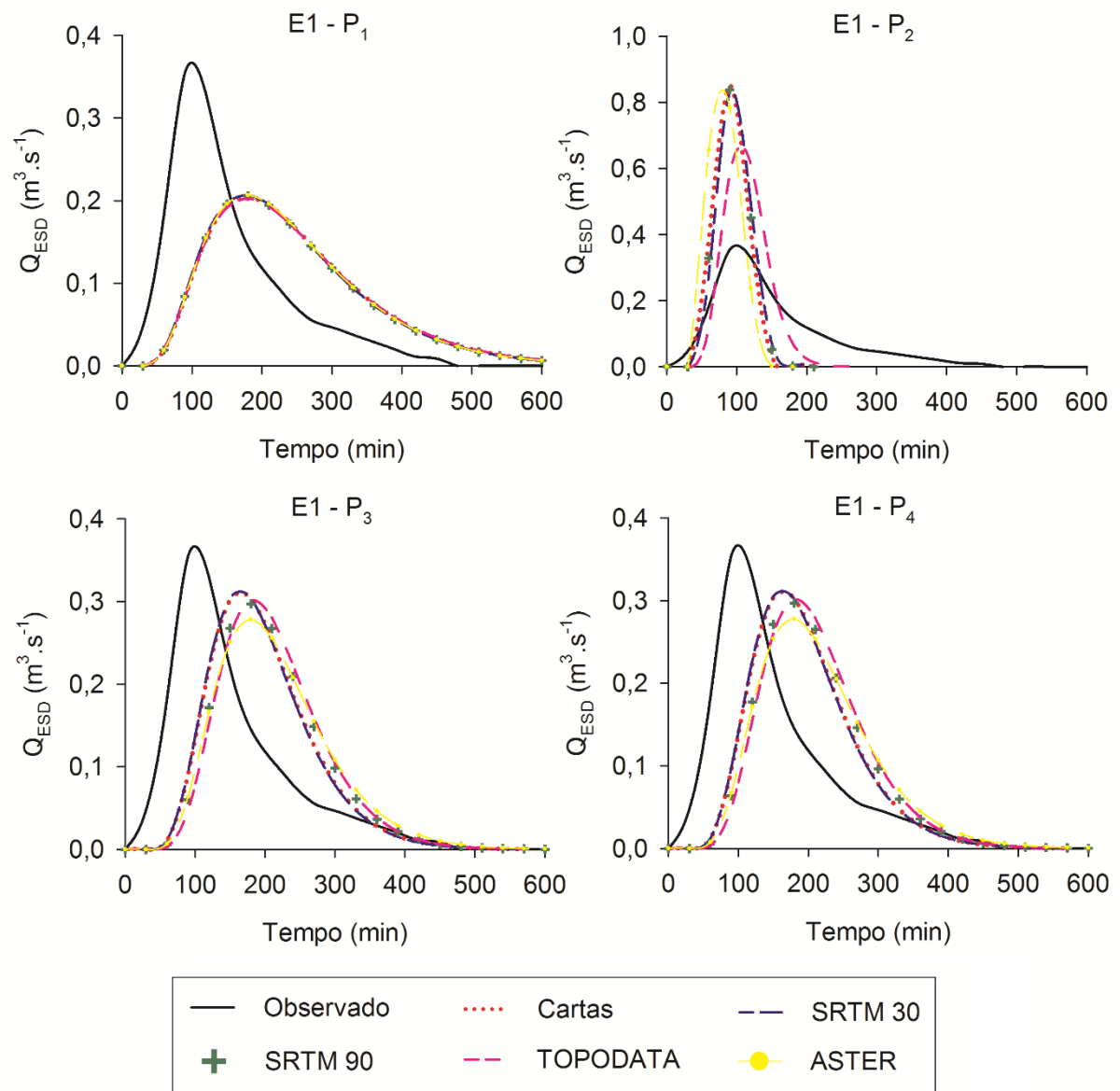


Figura B58 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

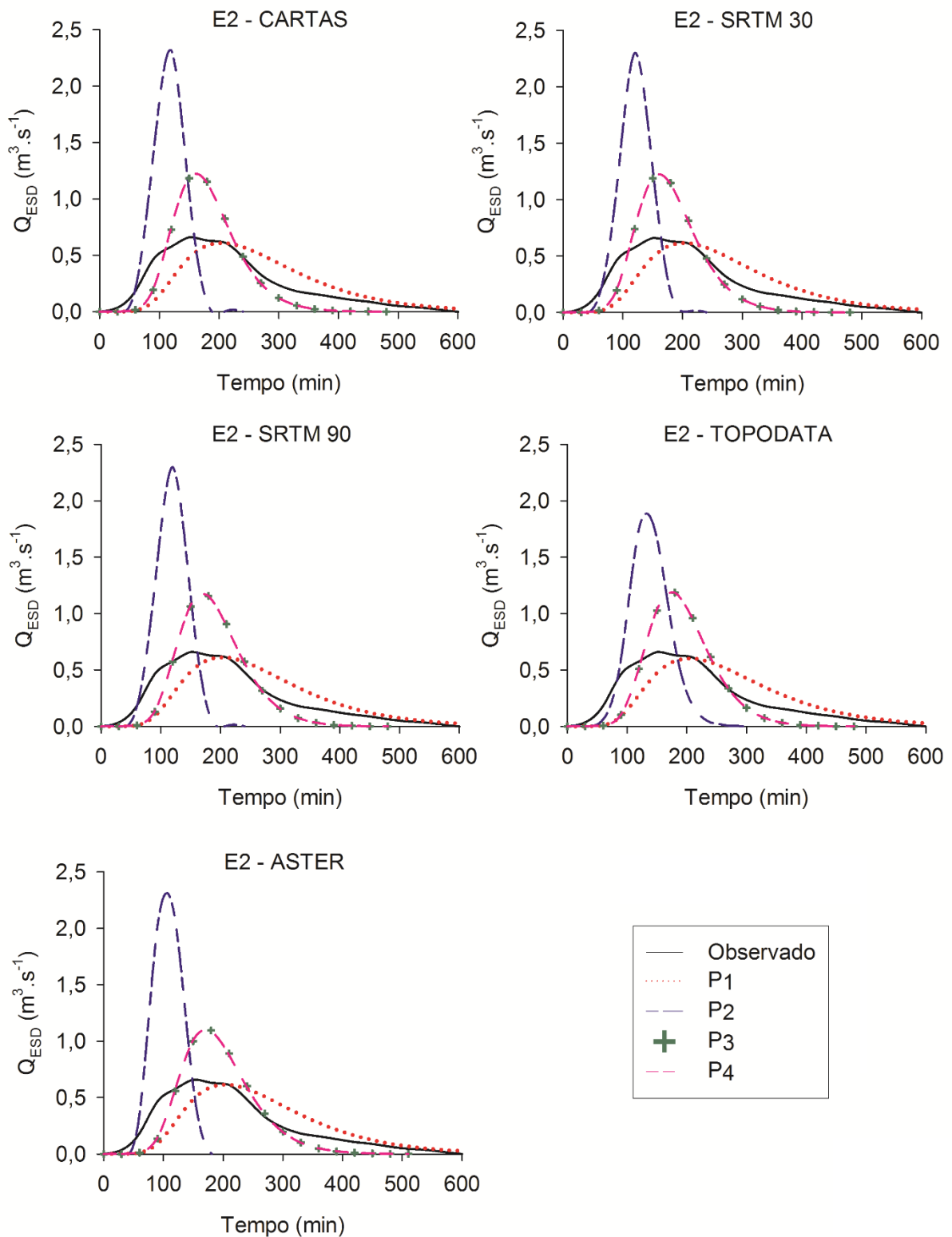


Figura B59 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

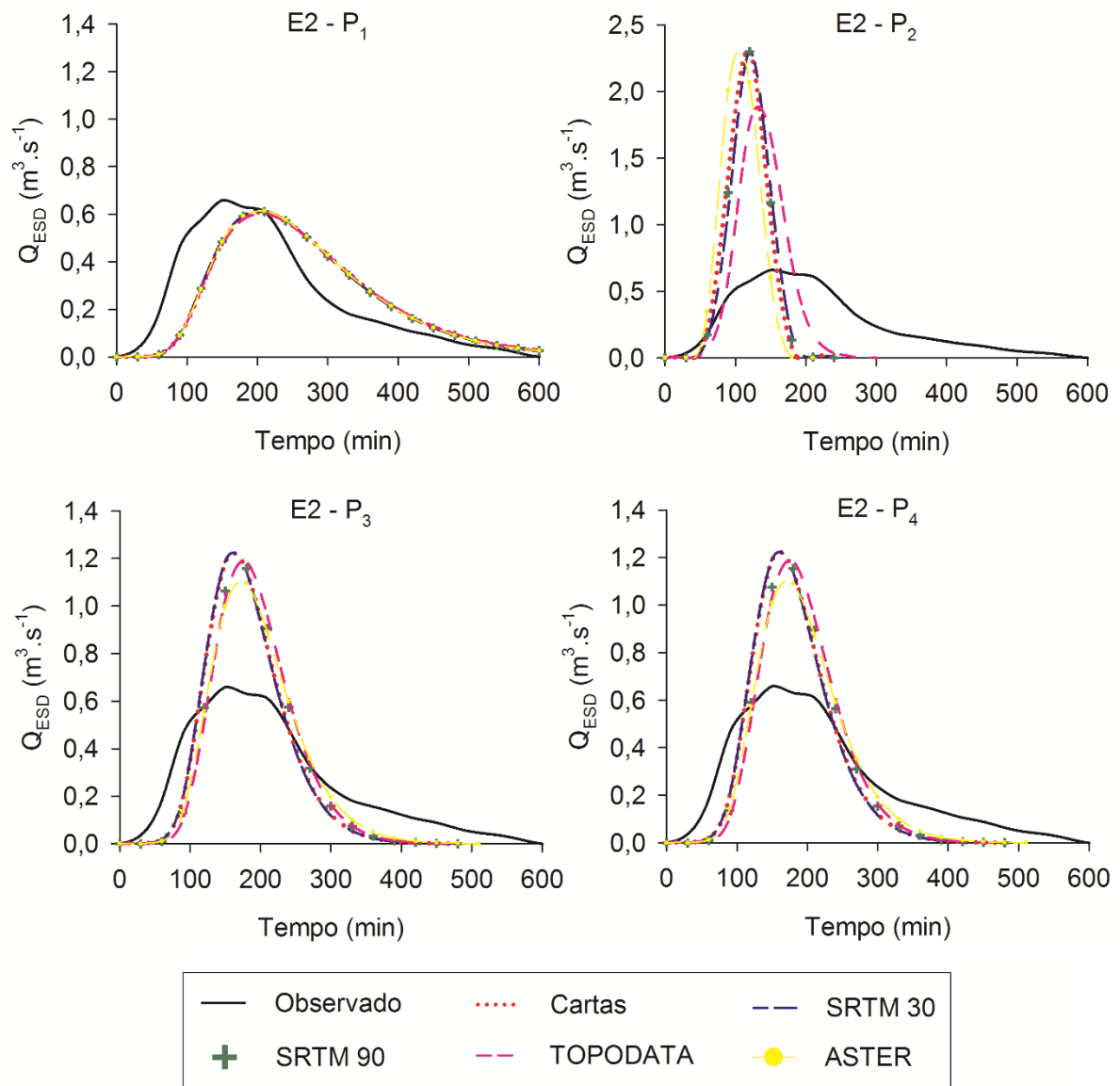


Figura B60 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

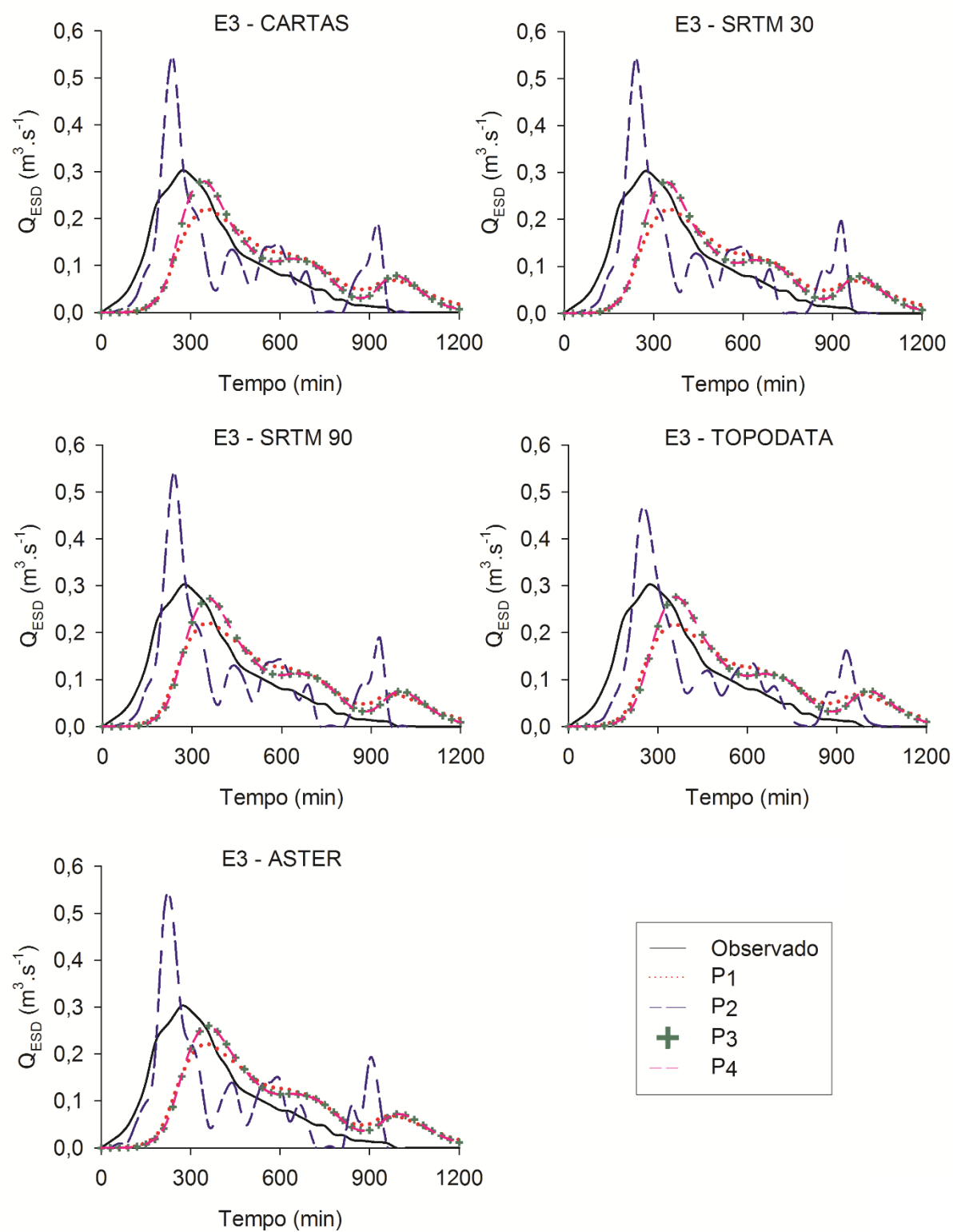


Figura B61 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

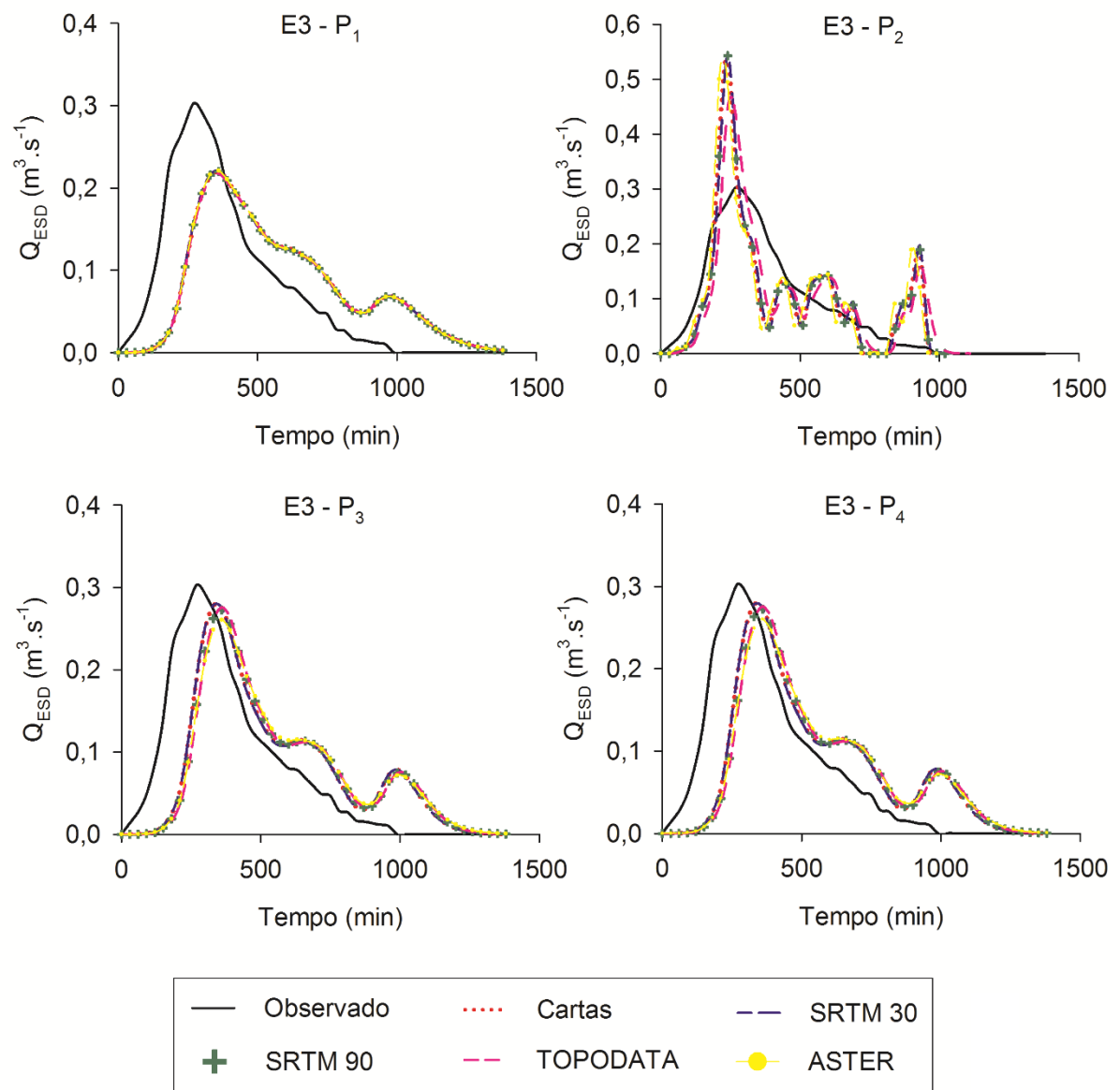


Figura B62 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

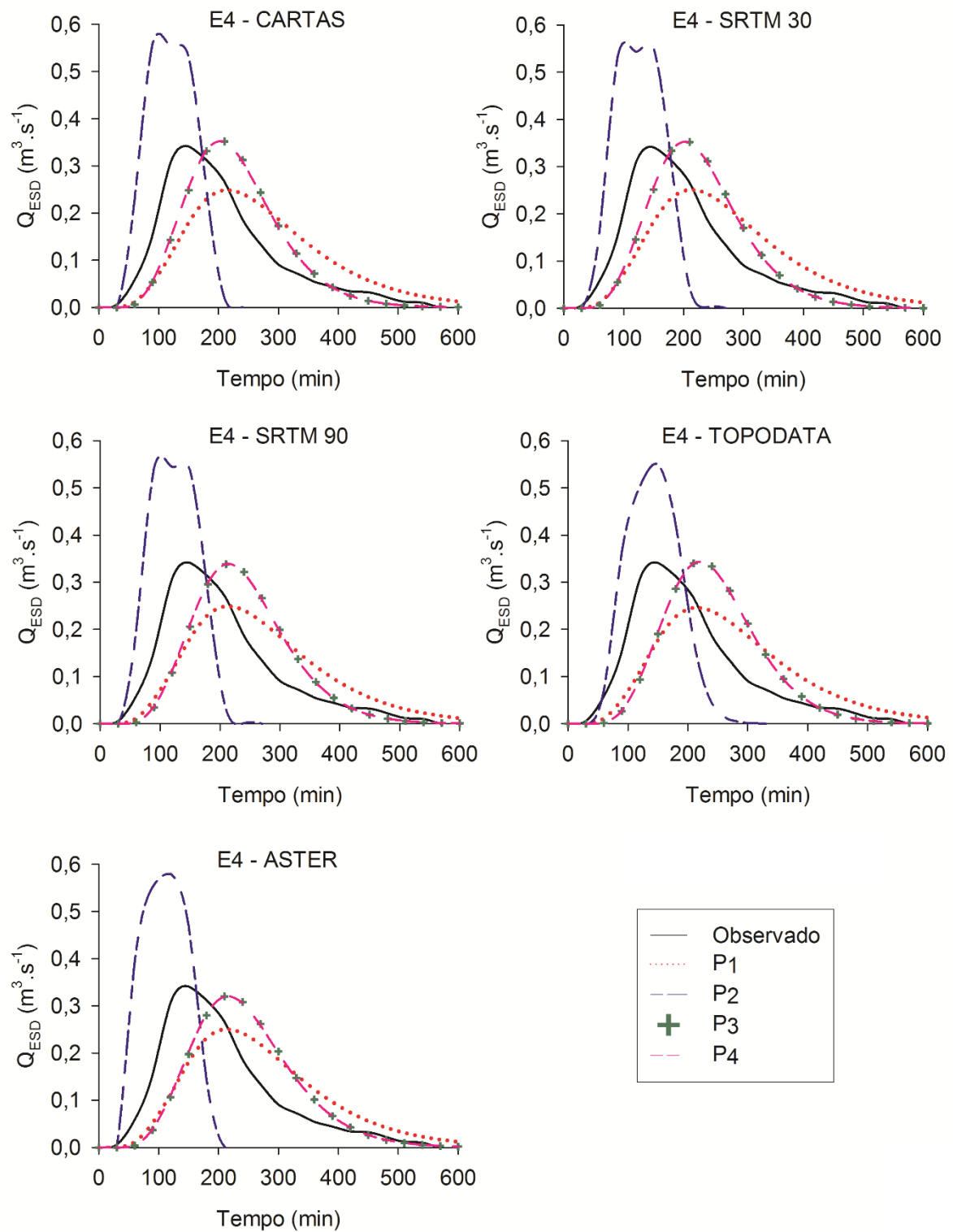


Figura B63 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

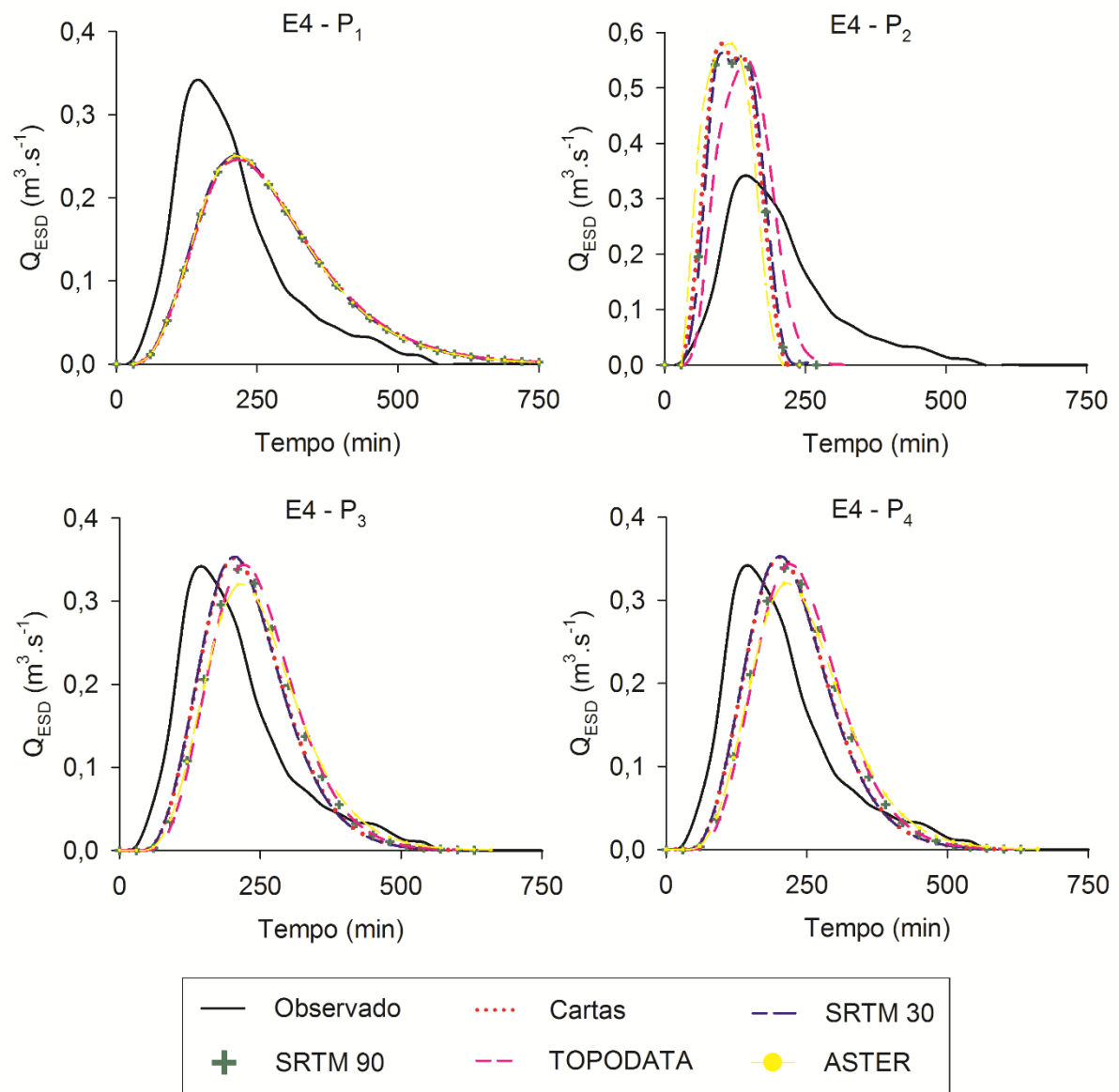


Figura B64 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

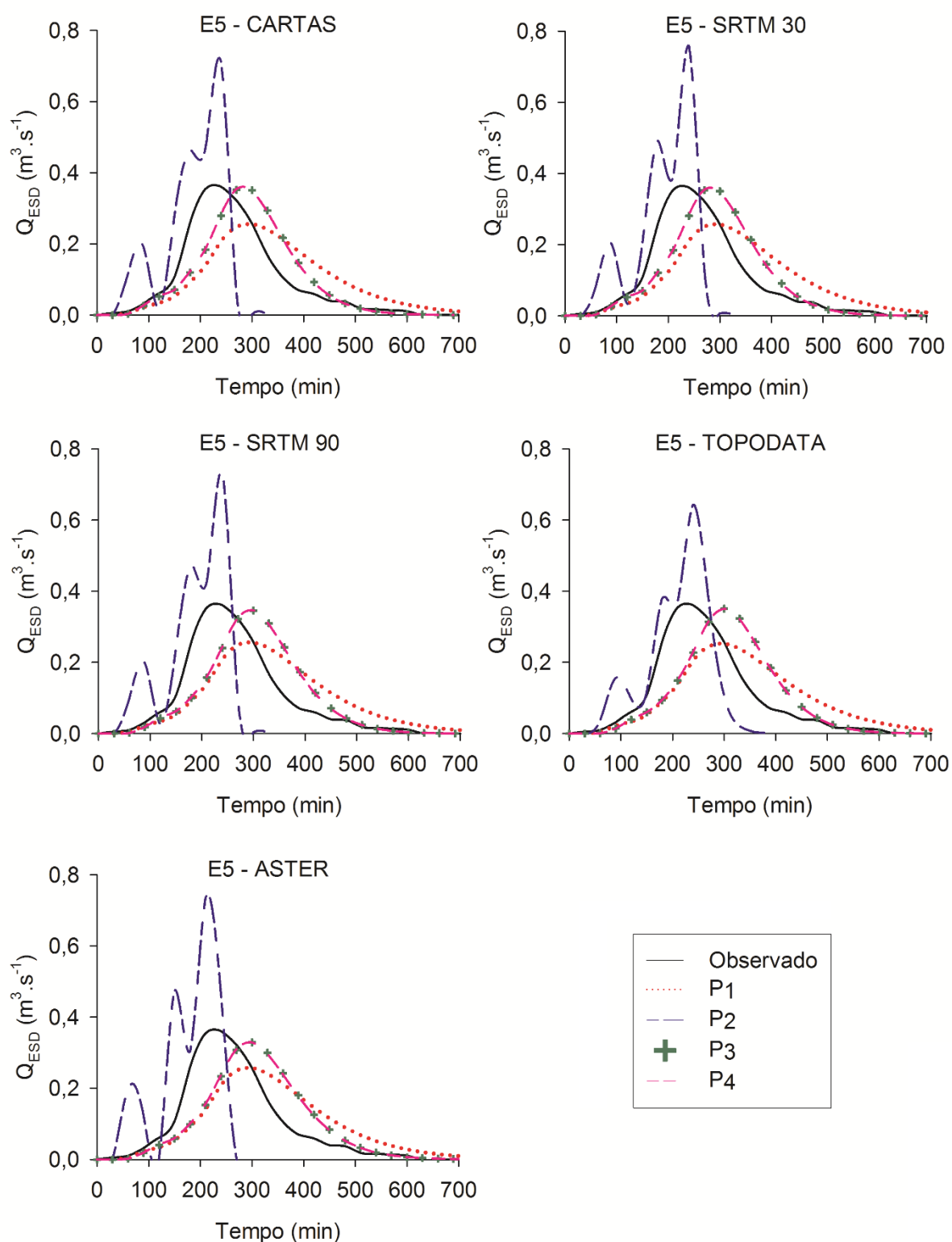


Figura B65 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

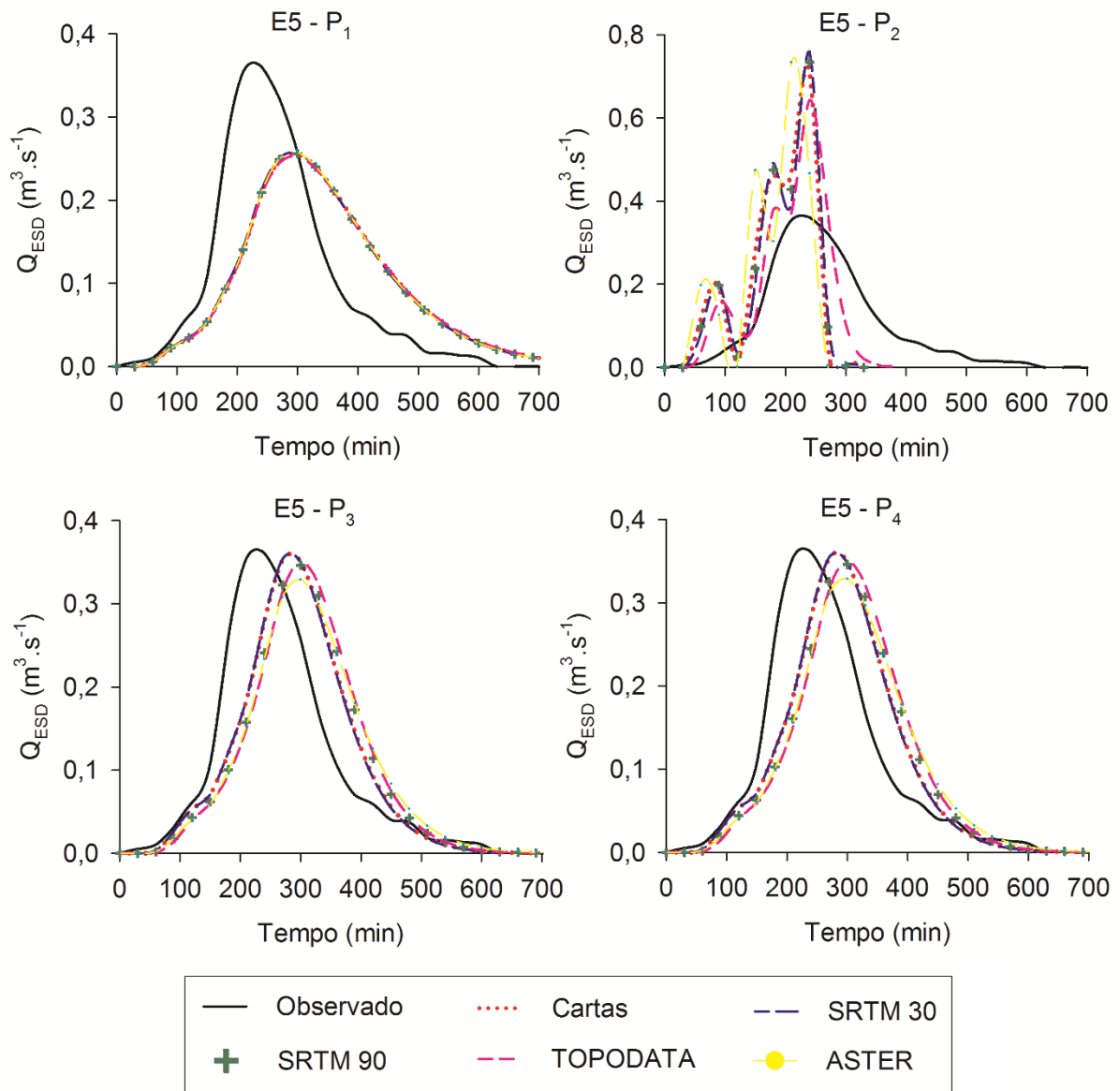


Figura B66 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

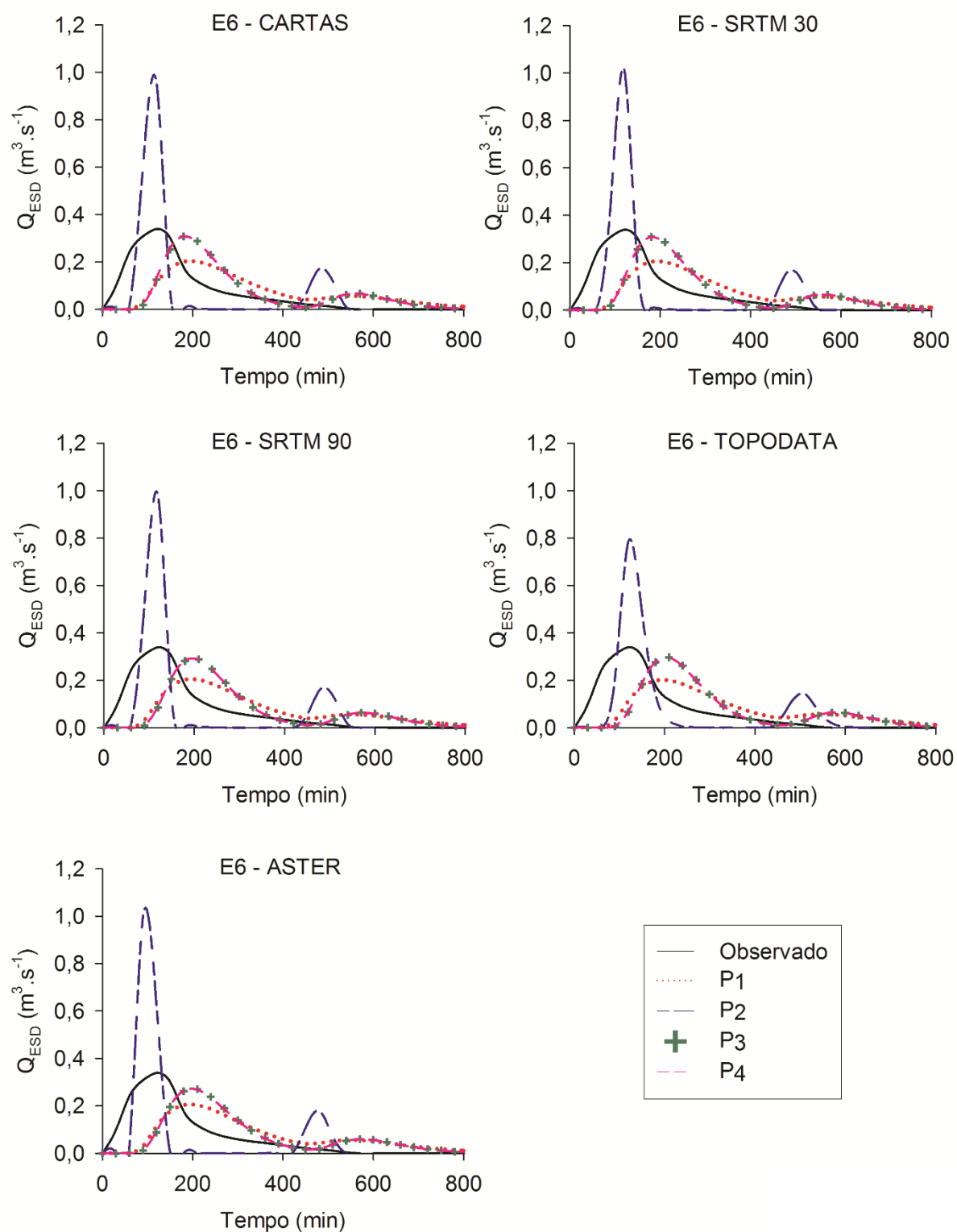


Figura B67 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

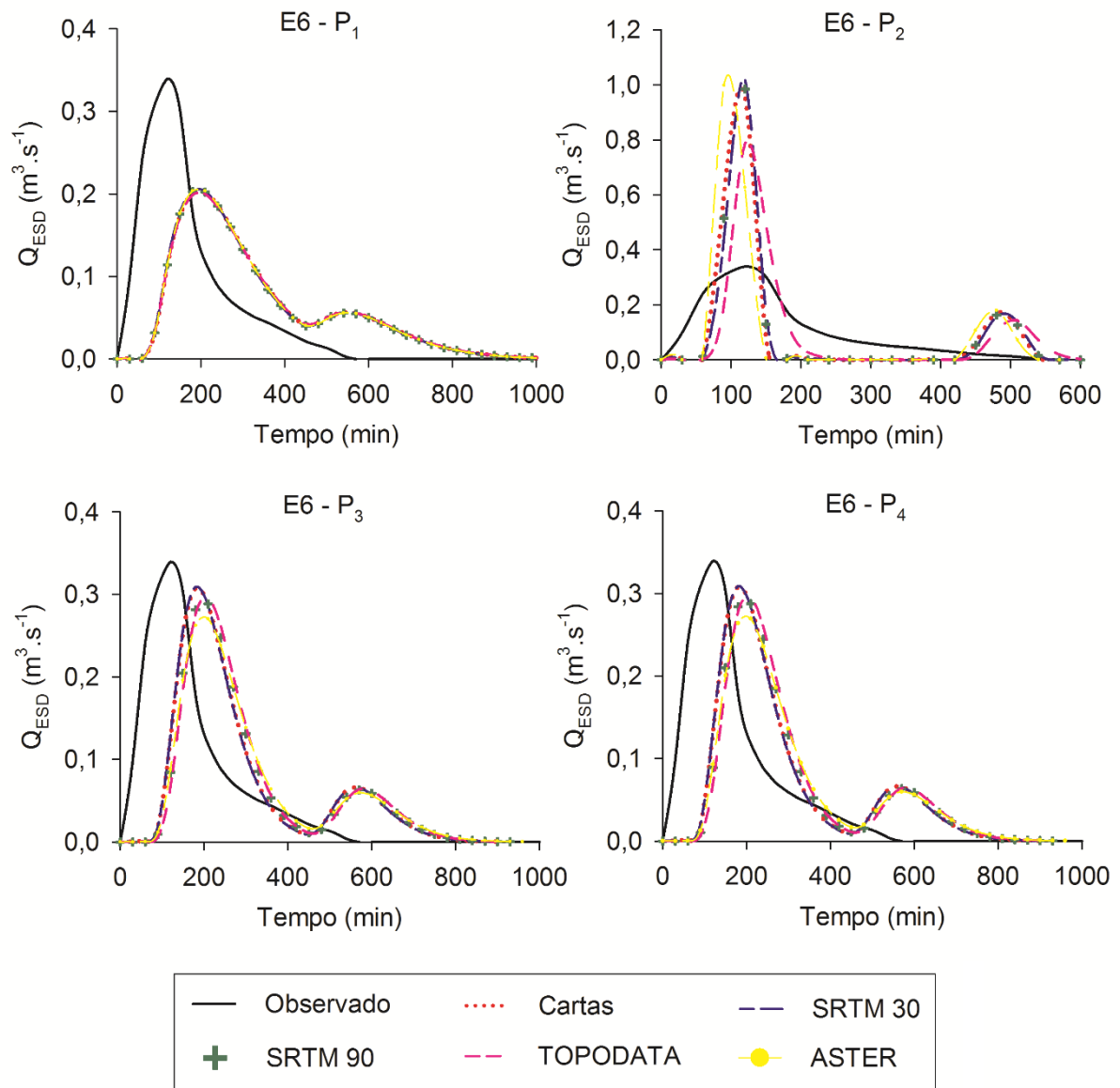


Figura B68 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 06, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

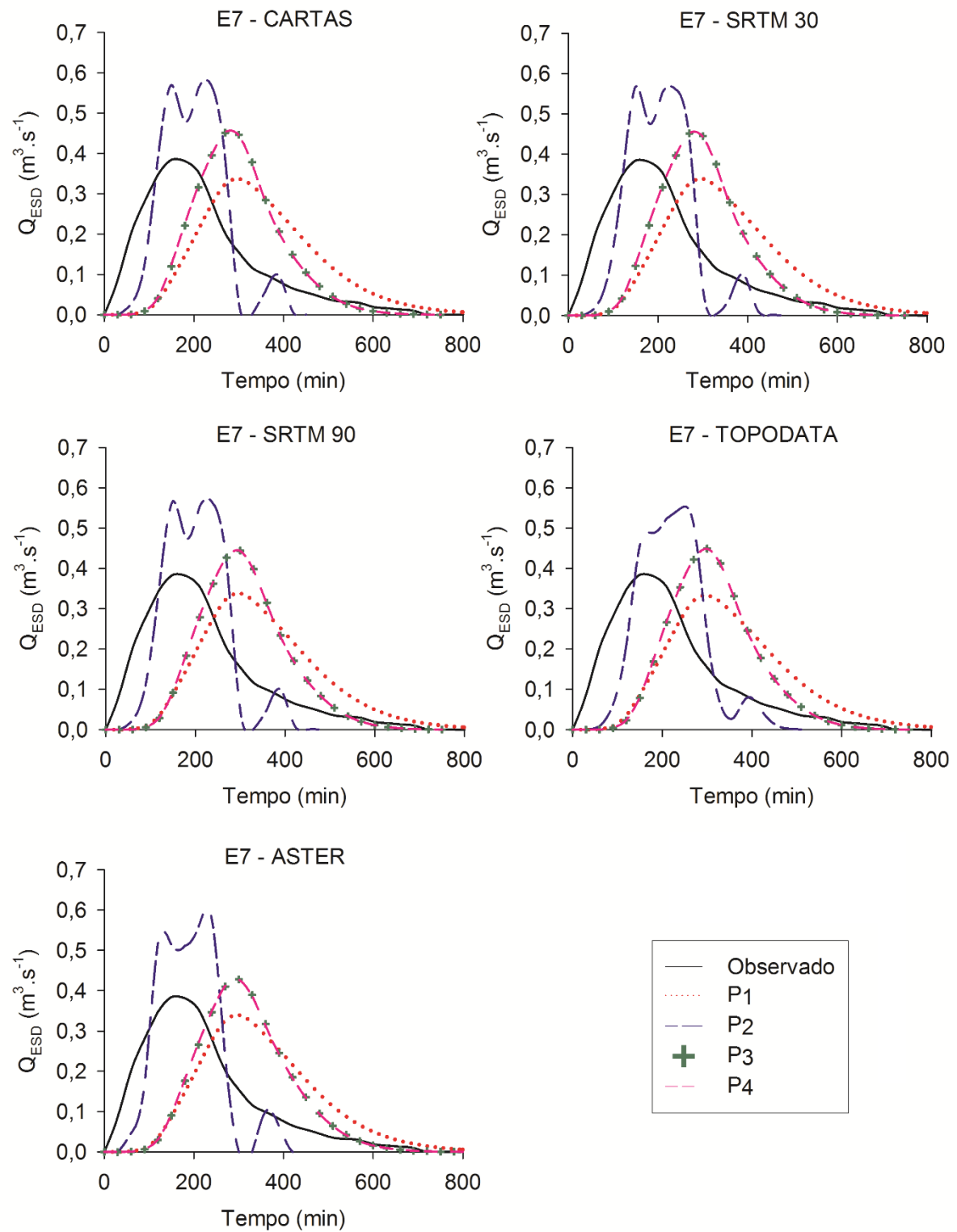


Figura B69 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

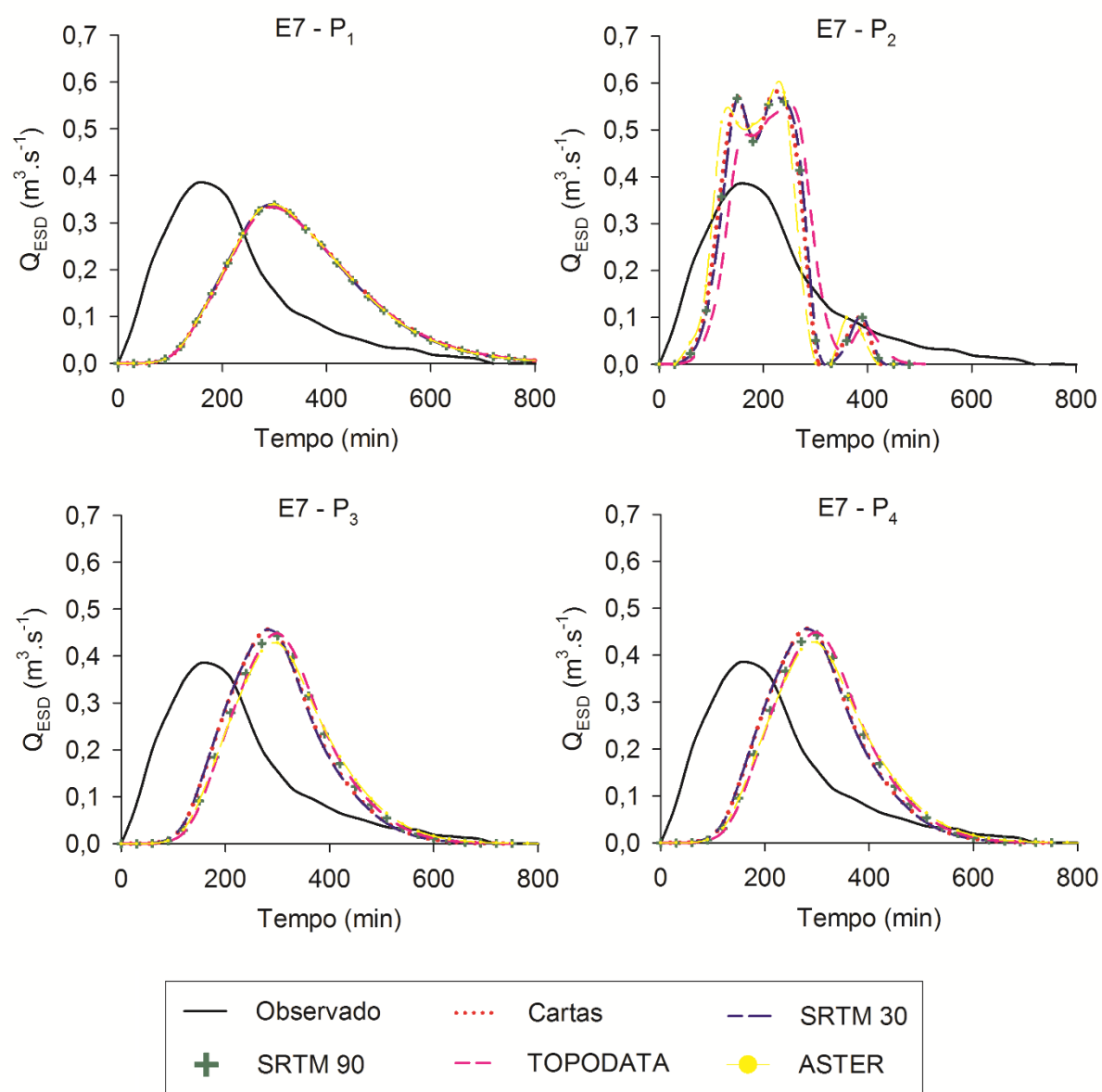


Figura B70 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 07, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

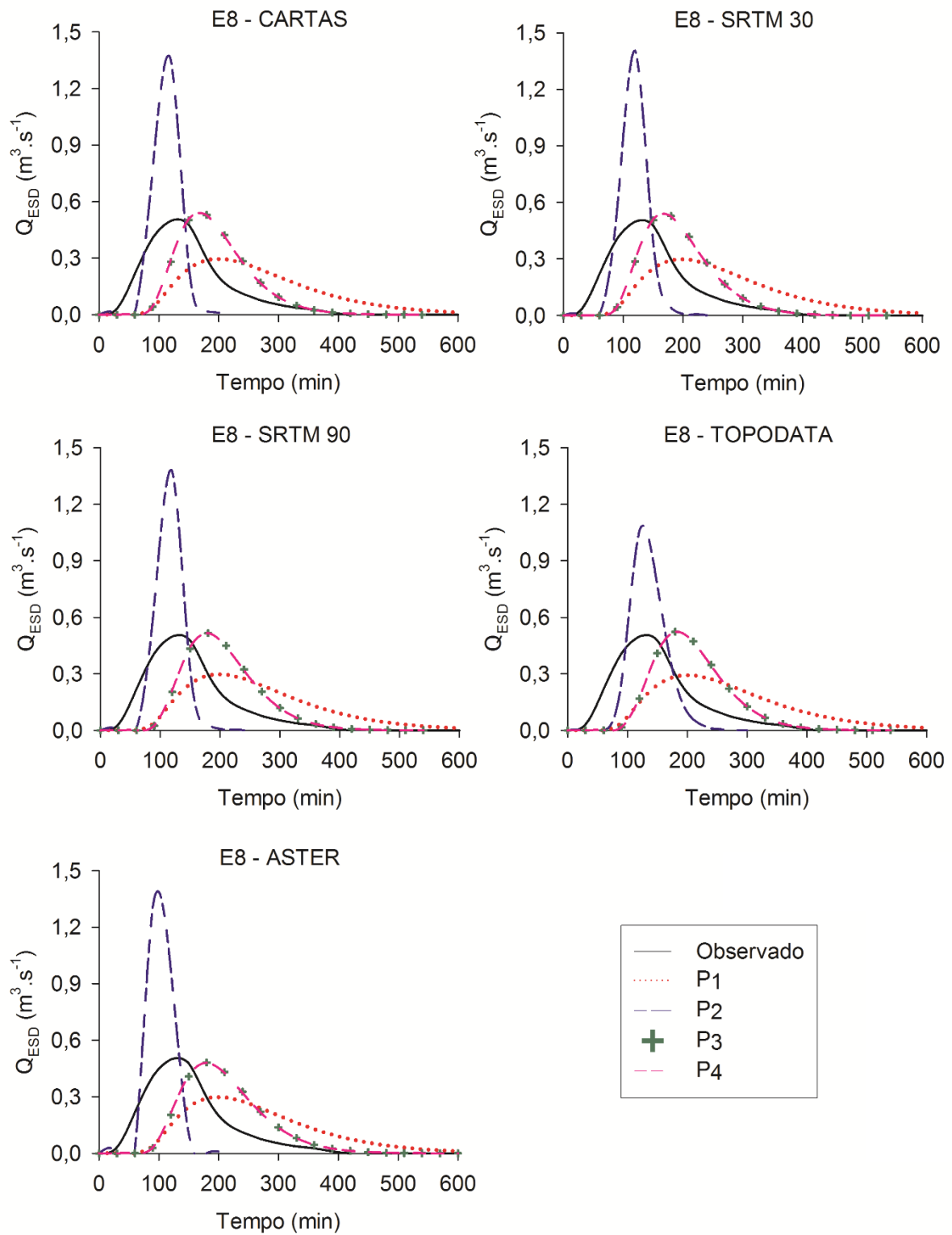


Figura B71 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

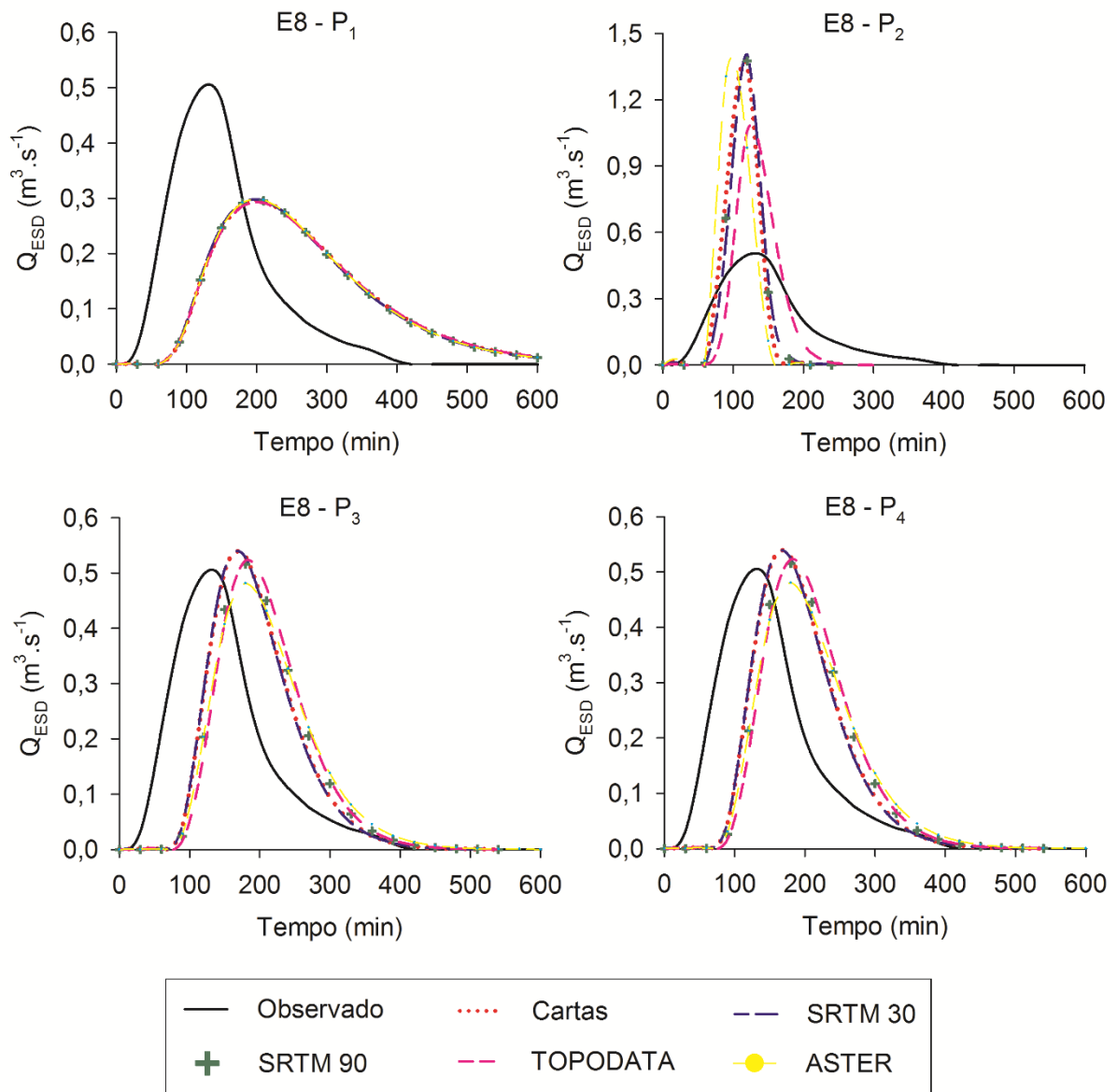


Figura B72 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 08, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

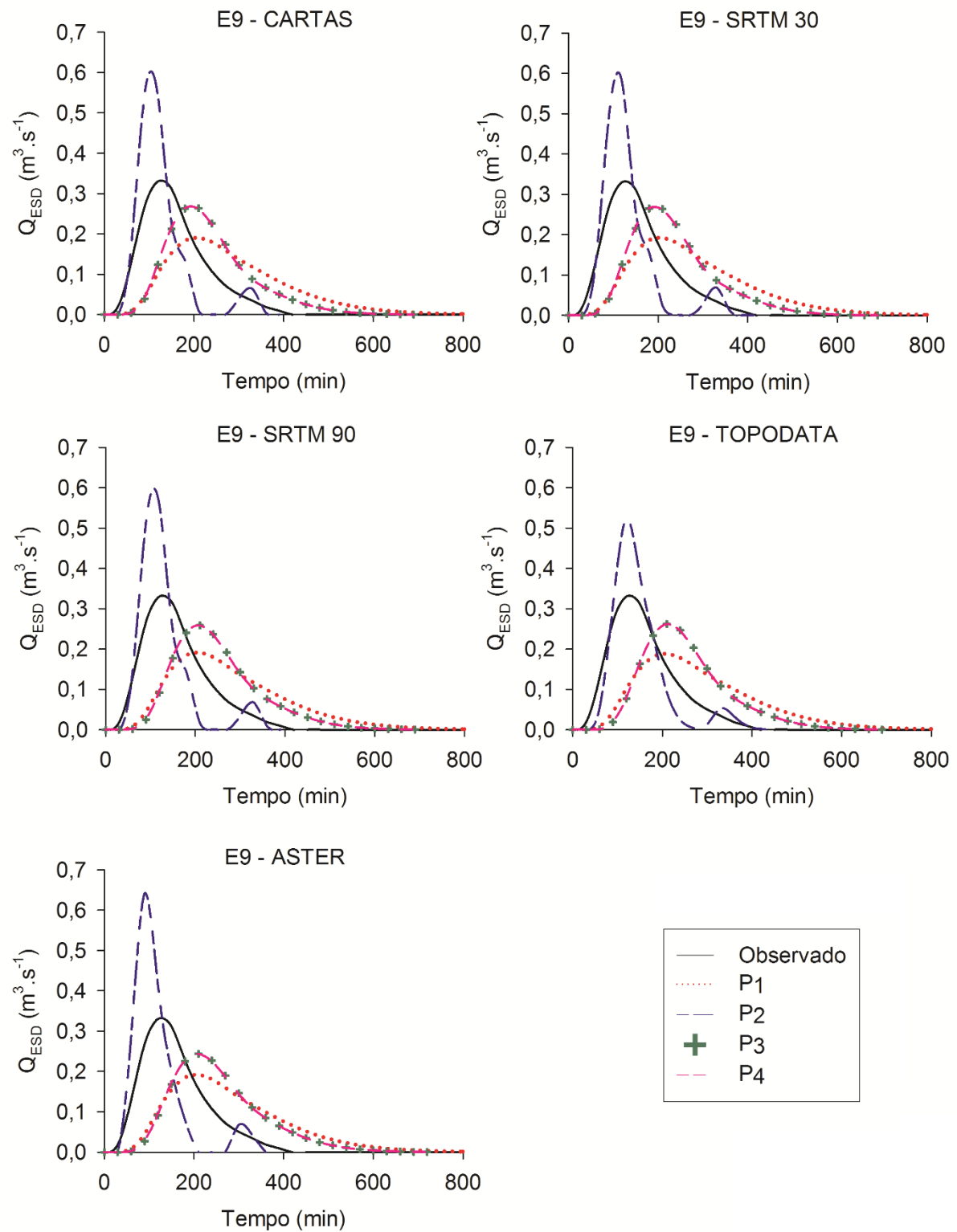


Figura B73 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

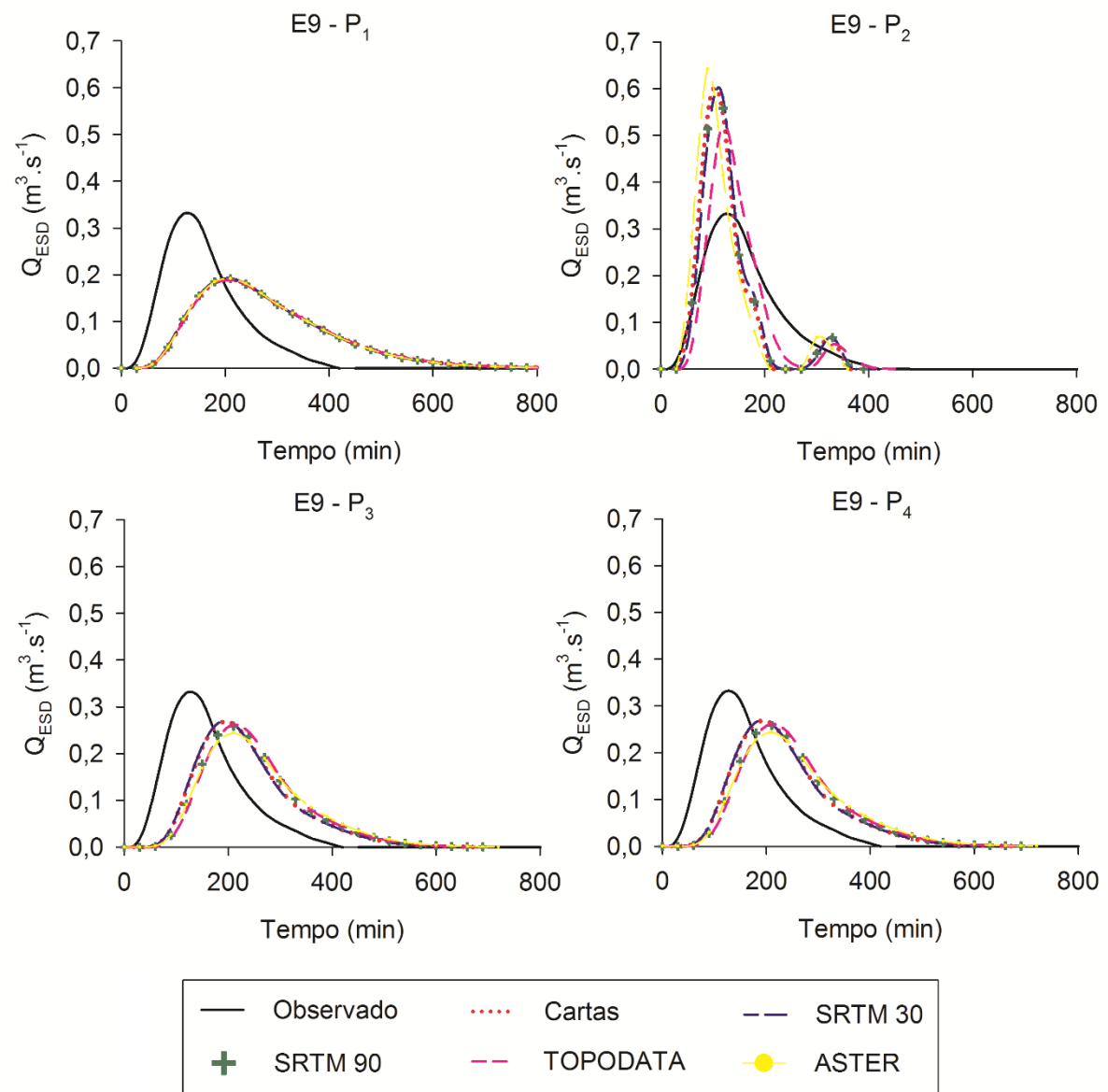


Figura B74 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 09, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

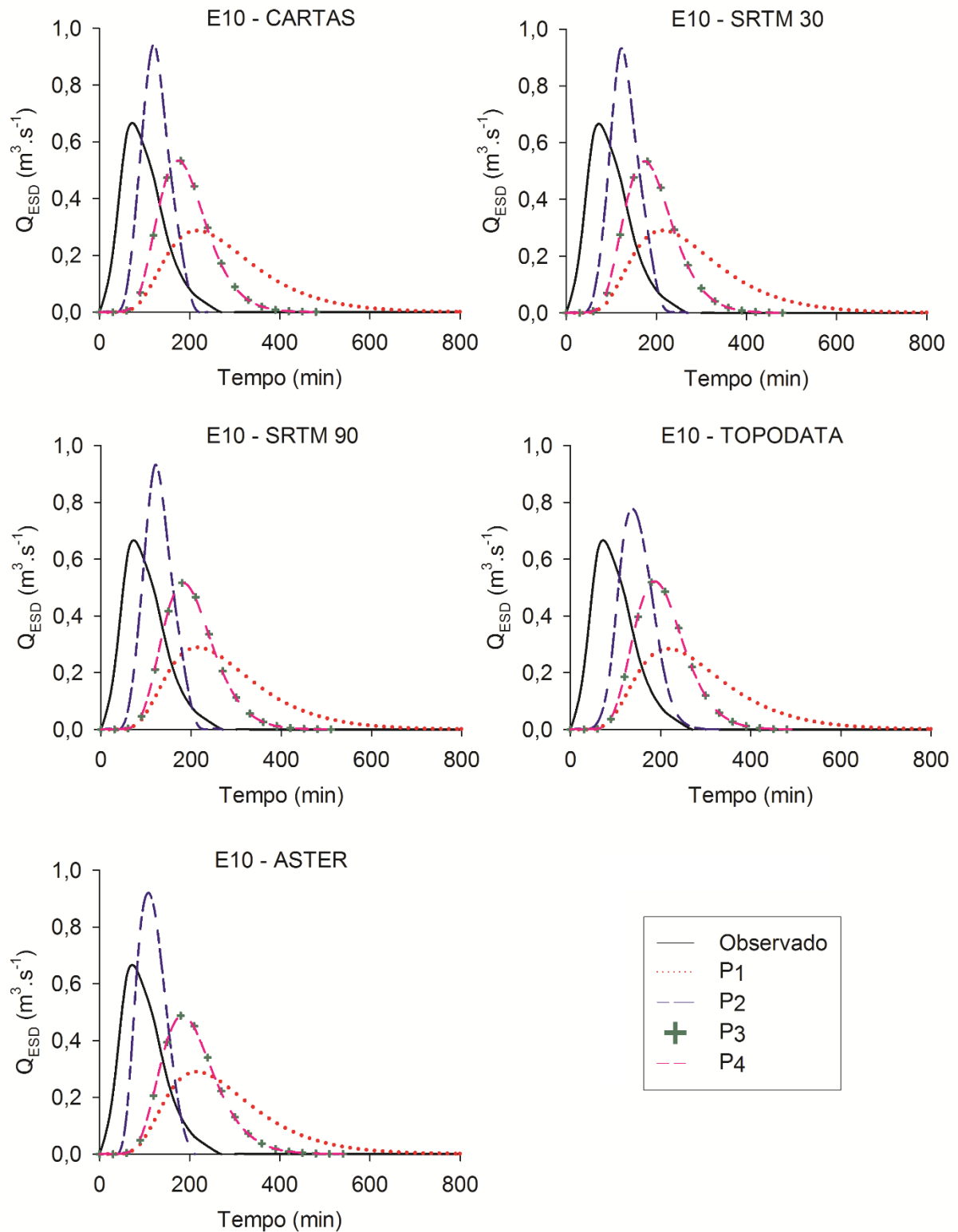


Figura B75 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHRL, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

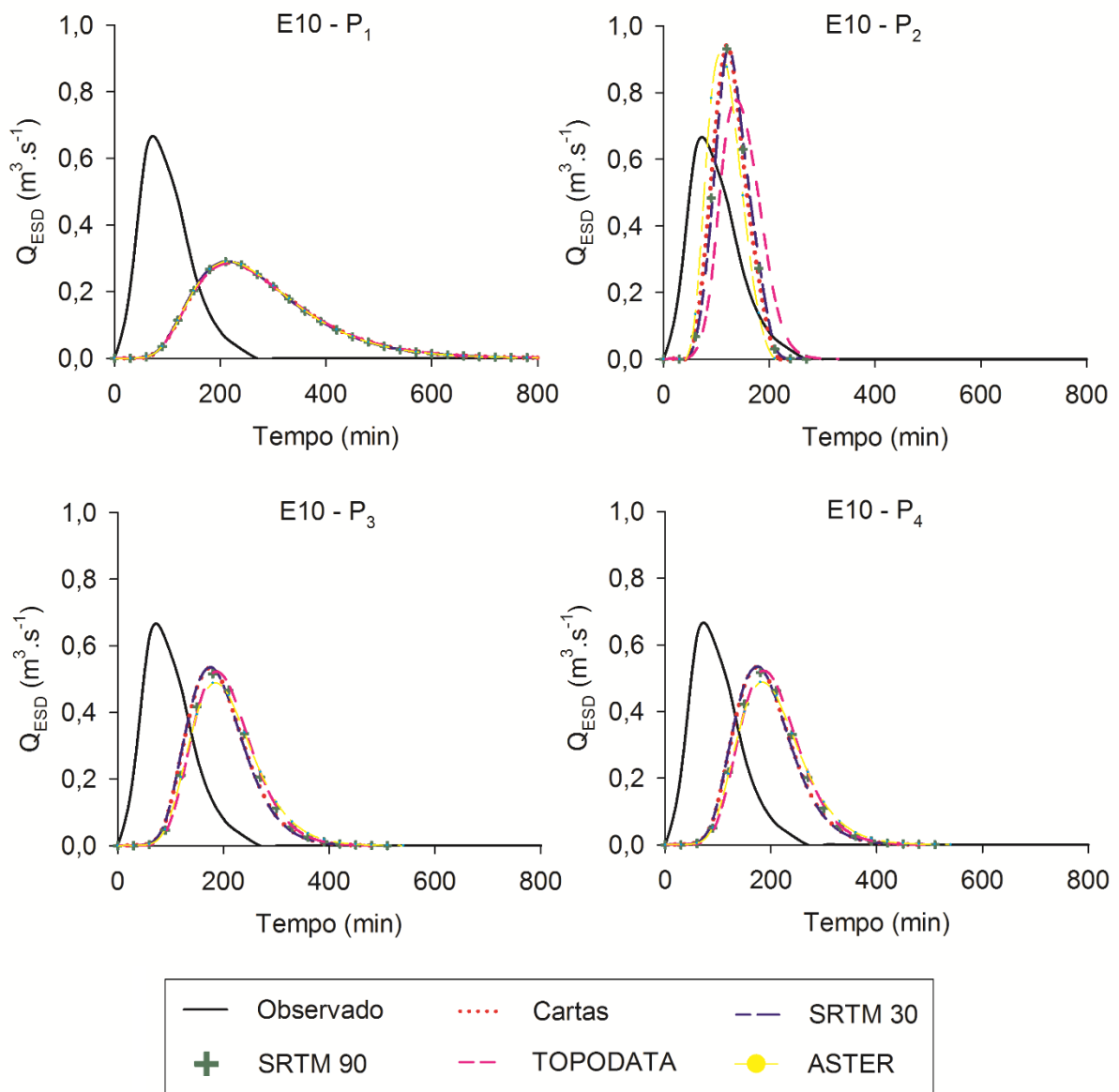


Figura B76 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 10, da BHRL, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

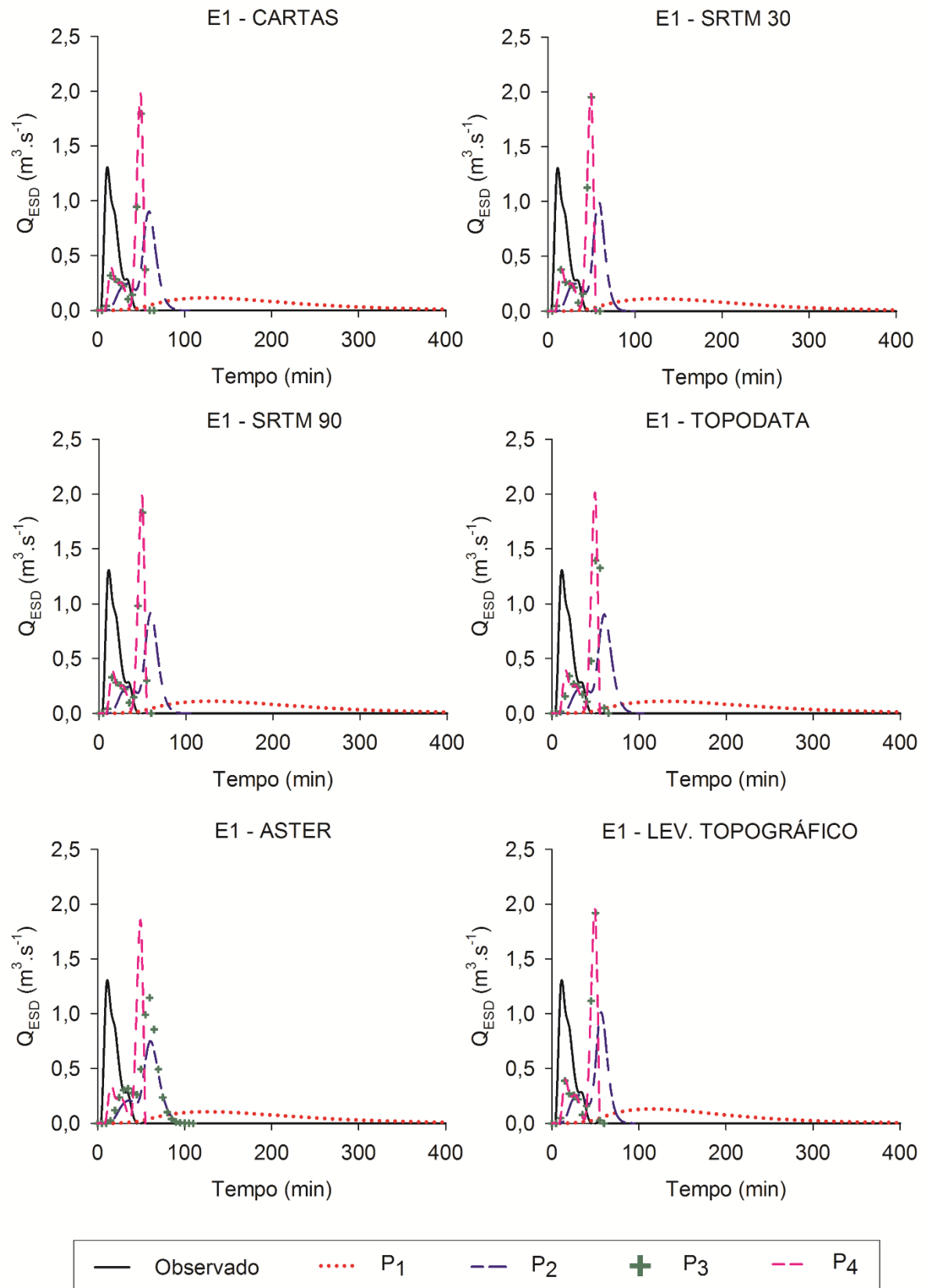


Figura B77 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHSE, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

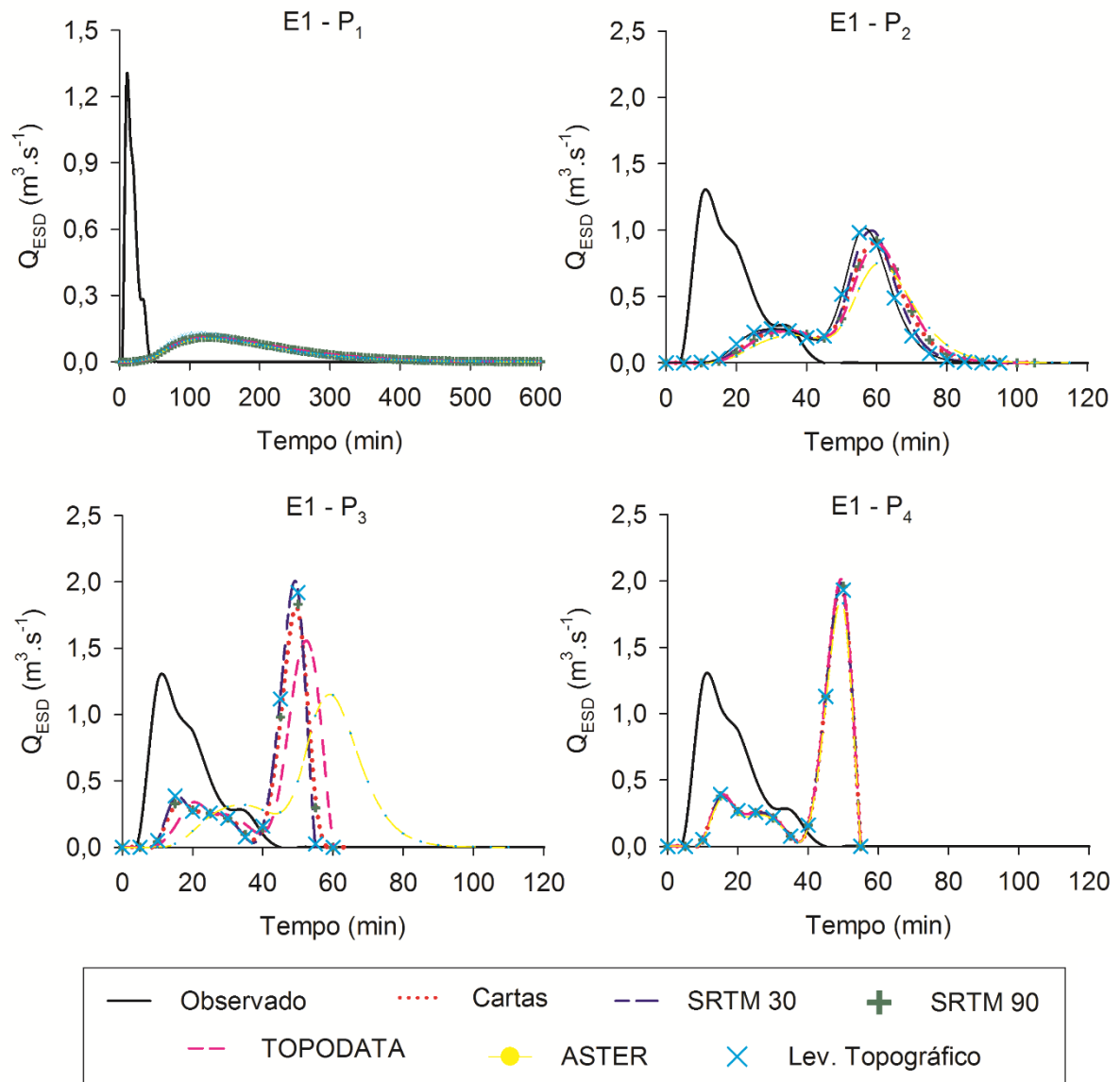


Figura B78 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 01, da BHSE, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

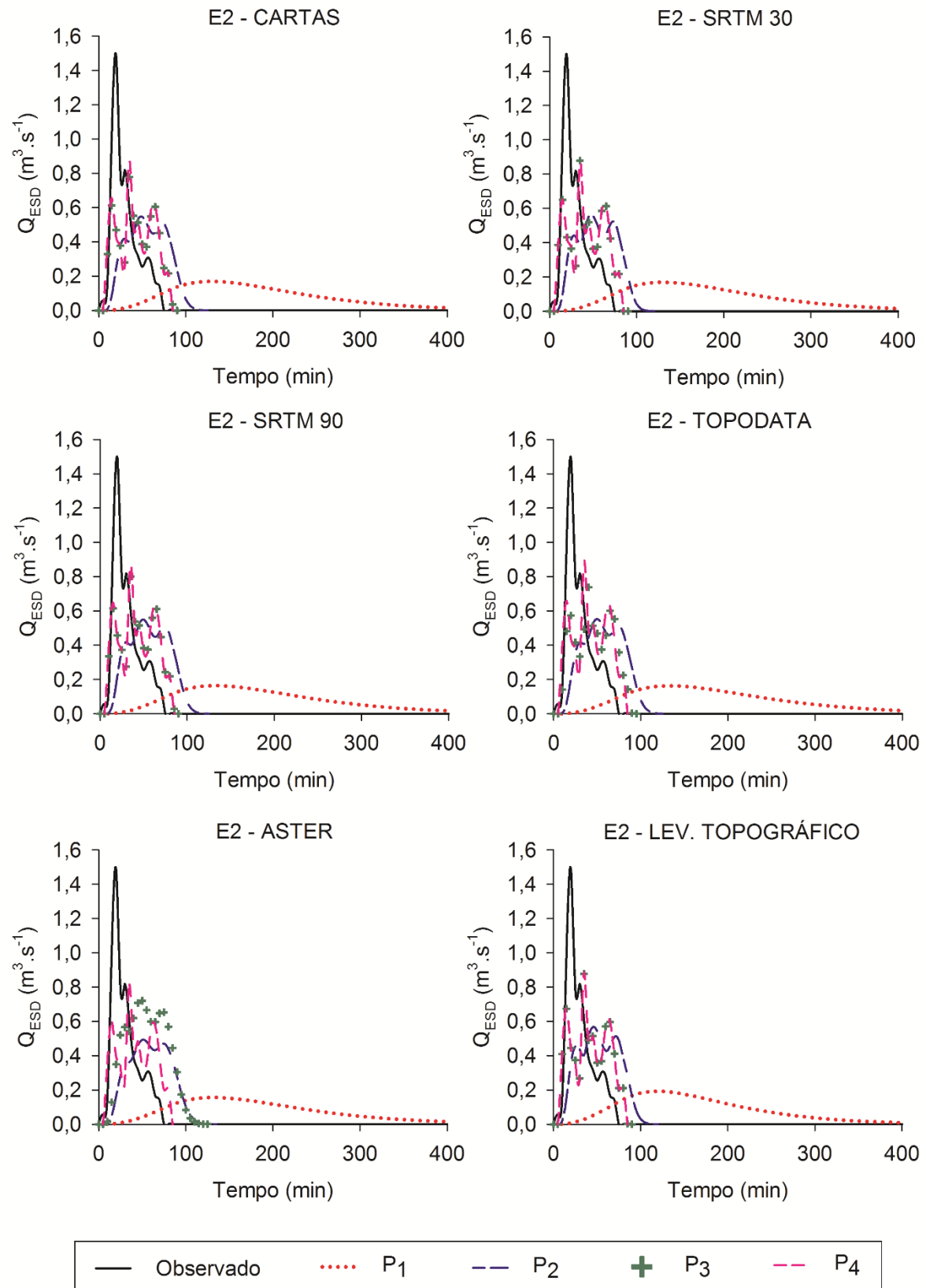


Figura B79 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHSE, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

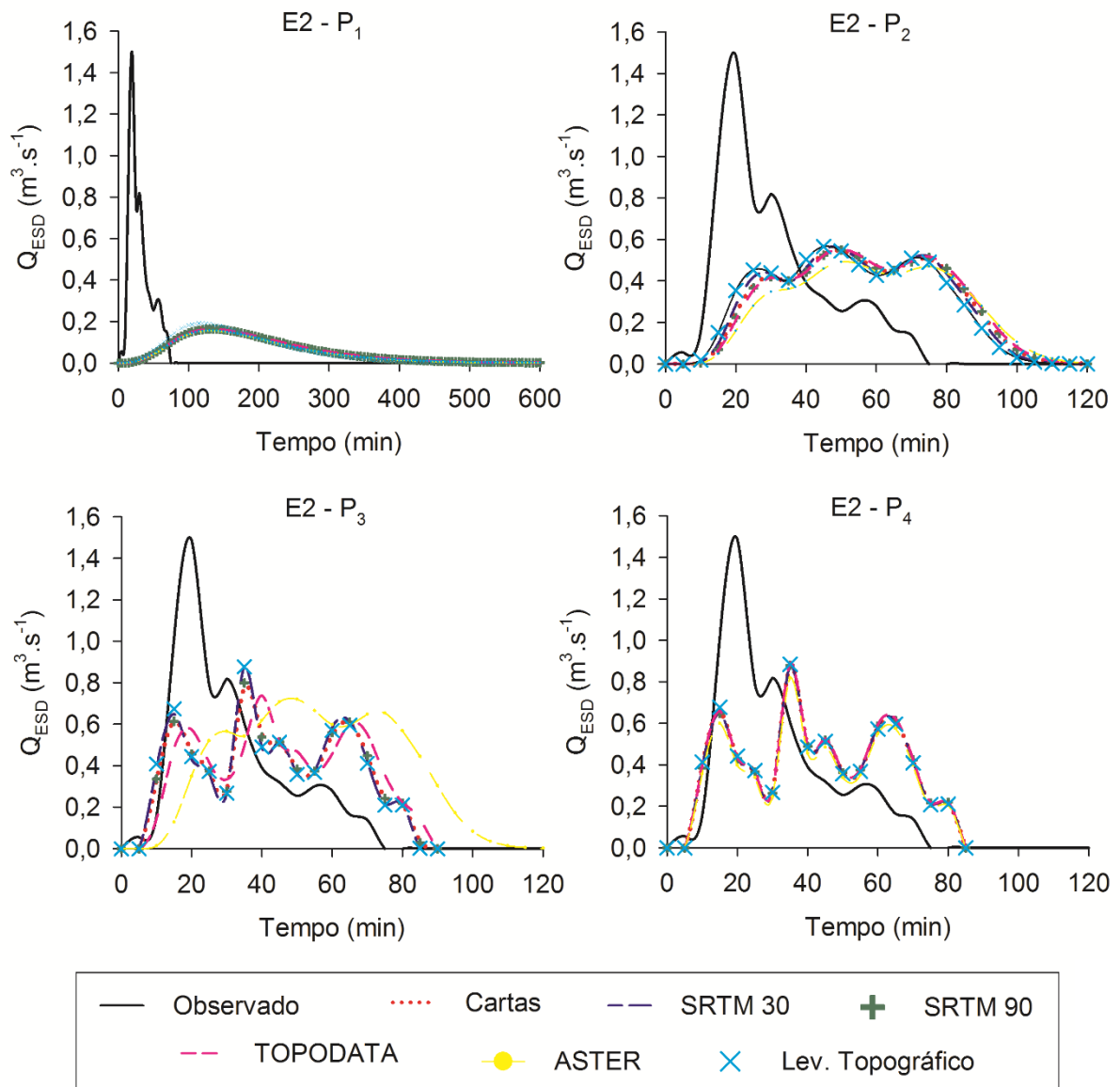


Figura B80 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 02, da BHSE, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

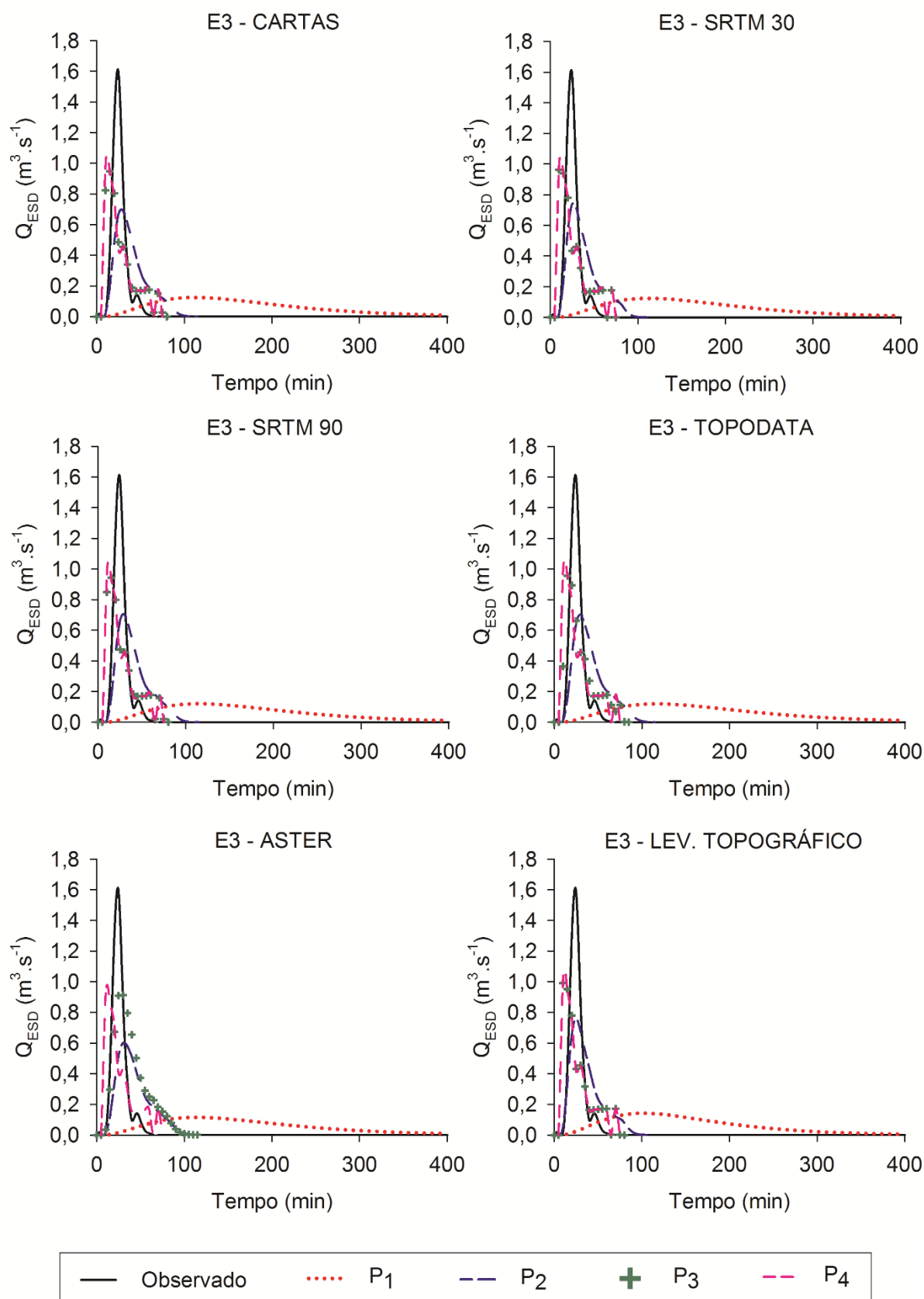


Figura B81 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHSE, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

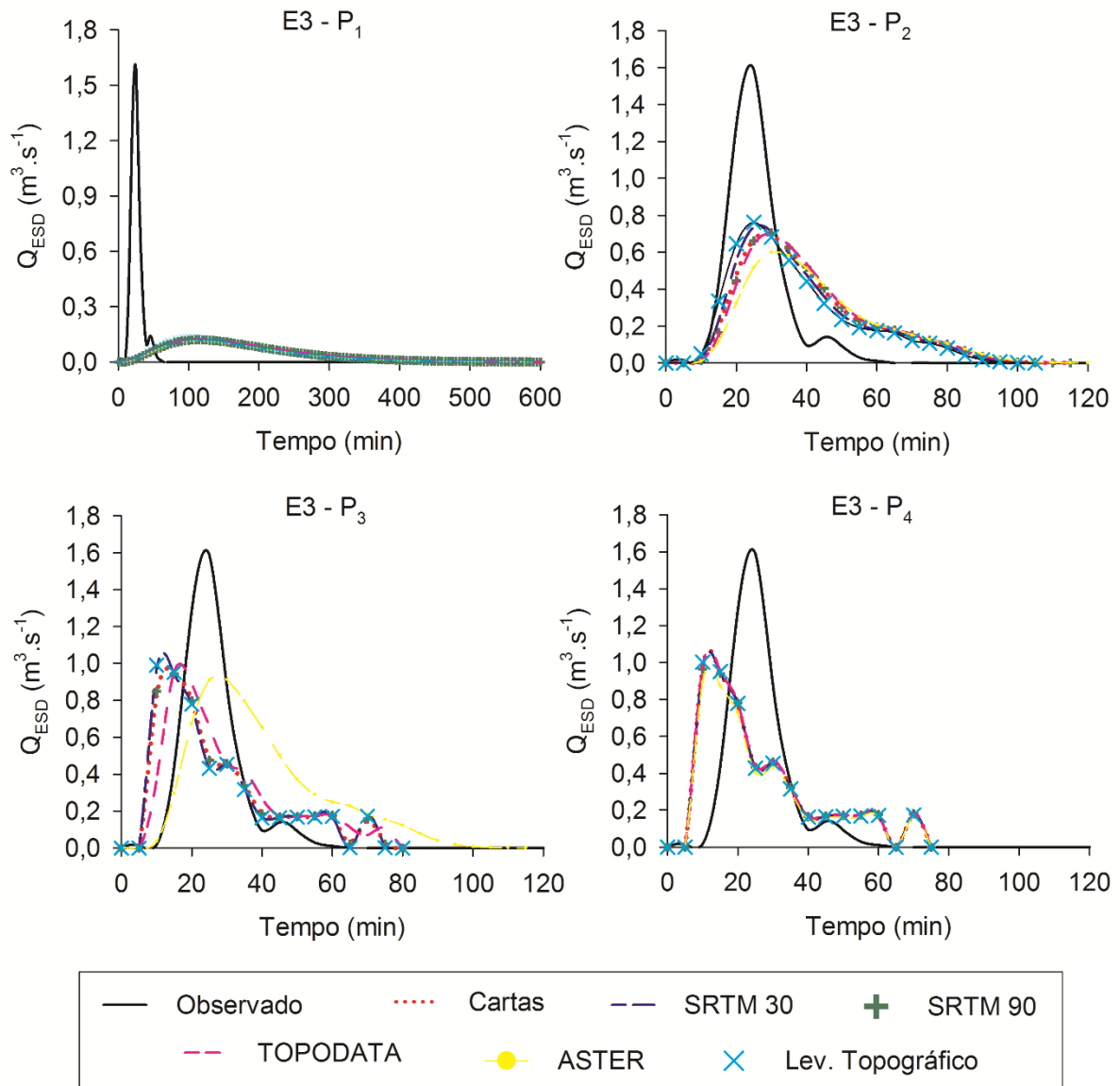


Figura B82 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 03, da BHSE, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

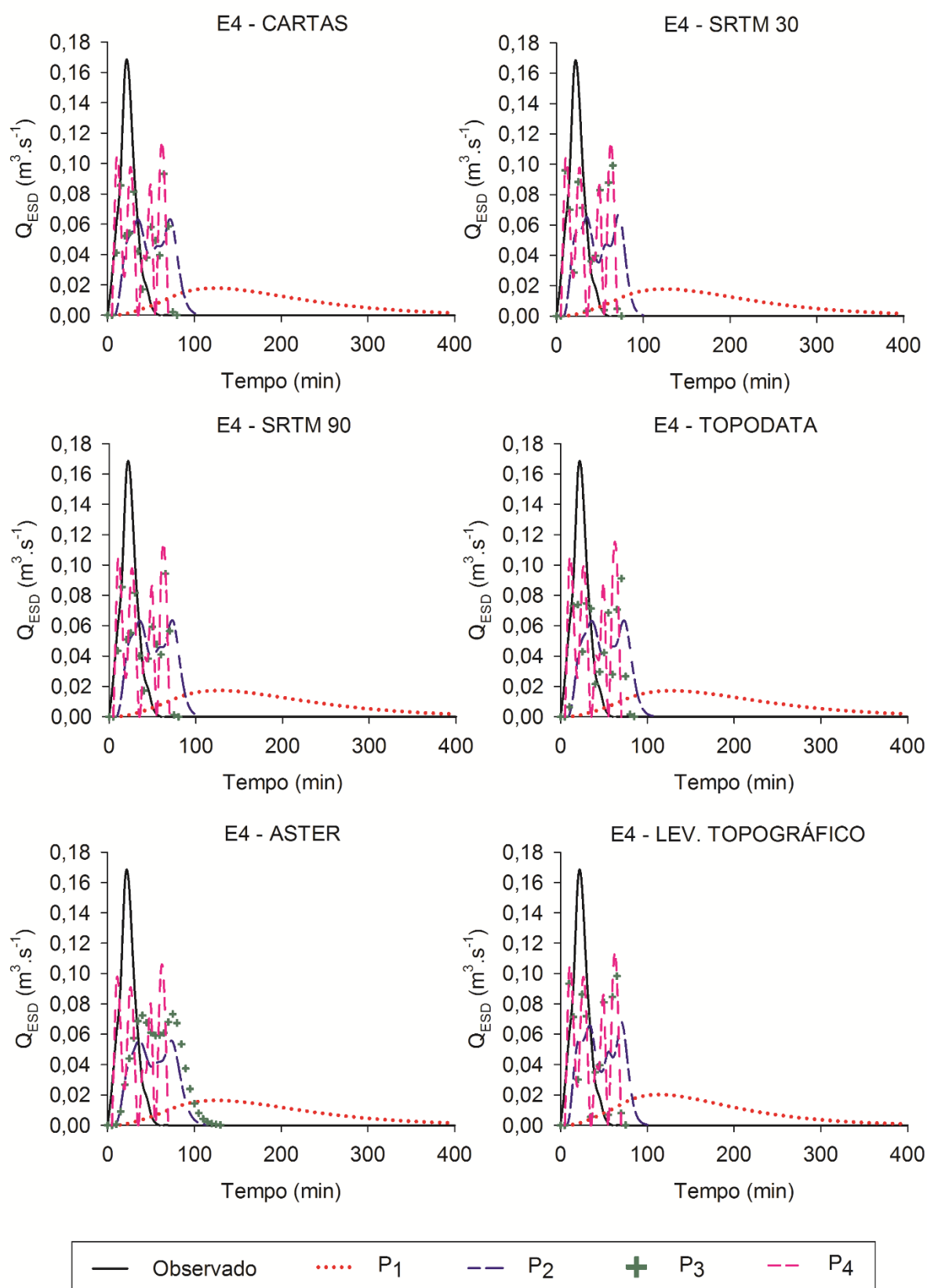


Figura B83 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHSE, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

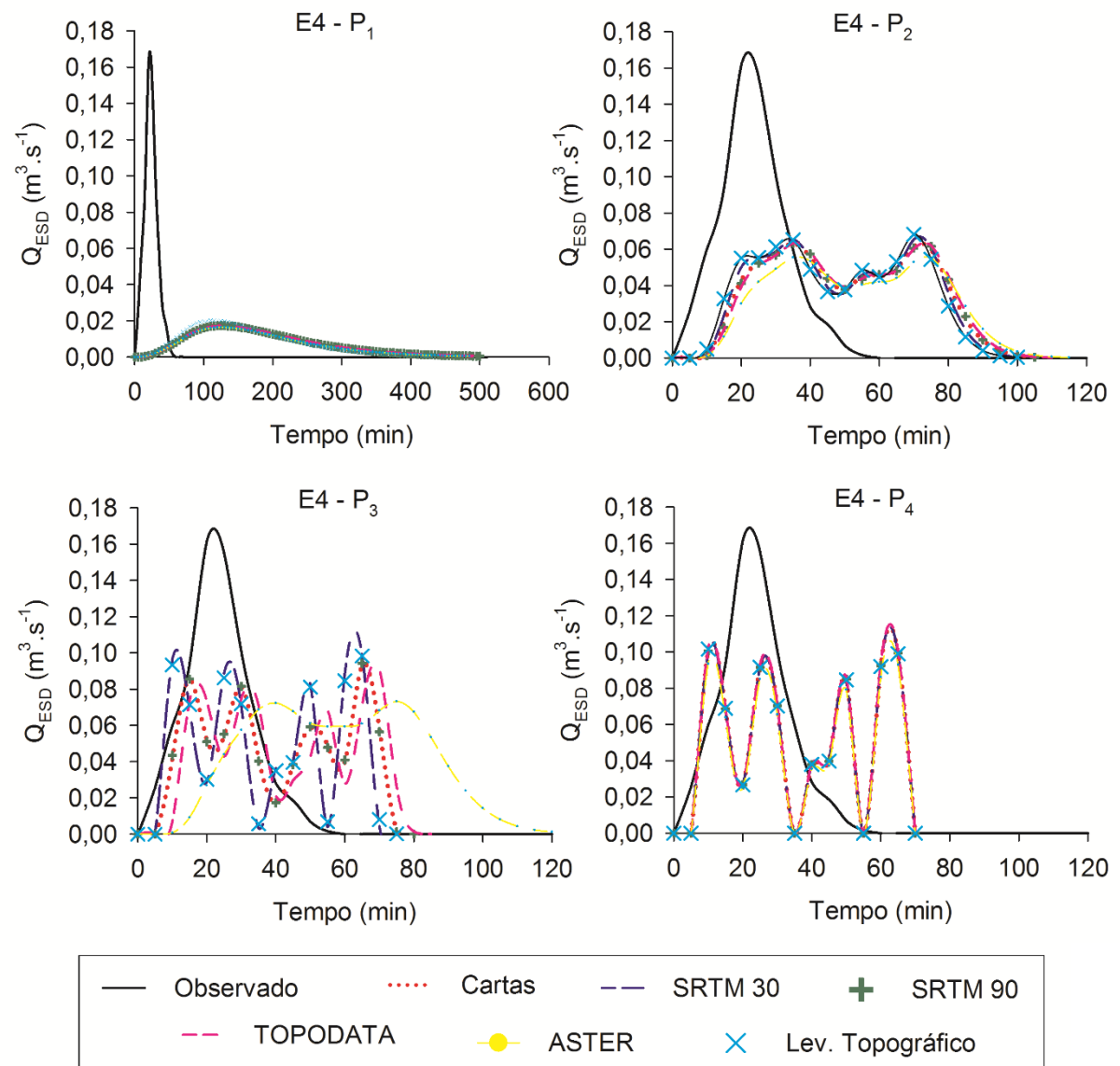


Figura B84 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 04, da BHSE, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.

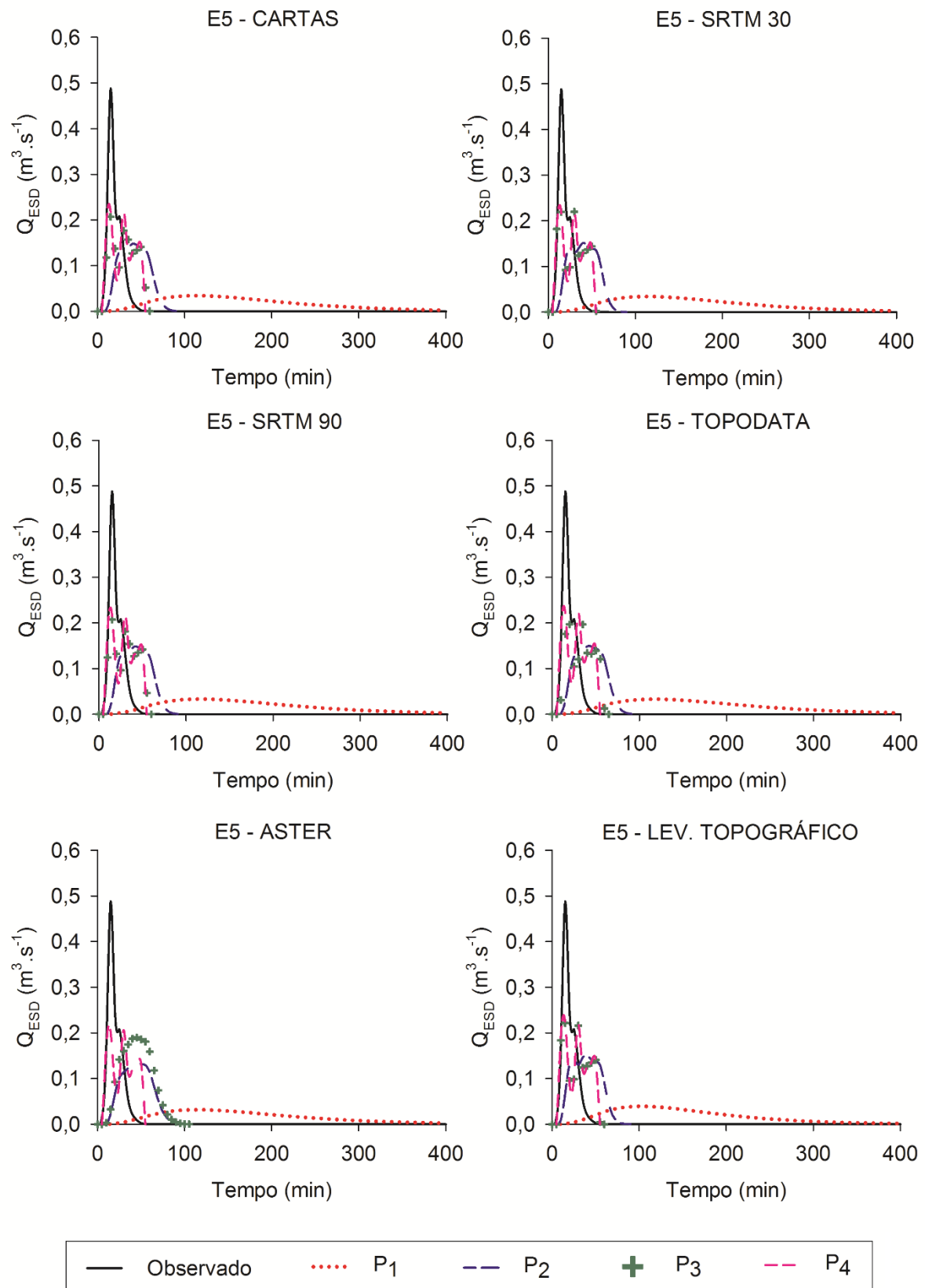


Figura B85 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHSE, fixando os MDEs e alterando as propostas geomorfológicas.

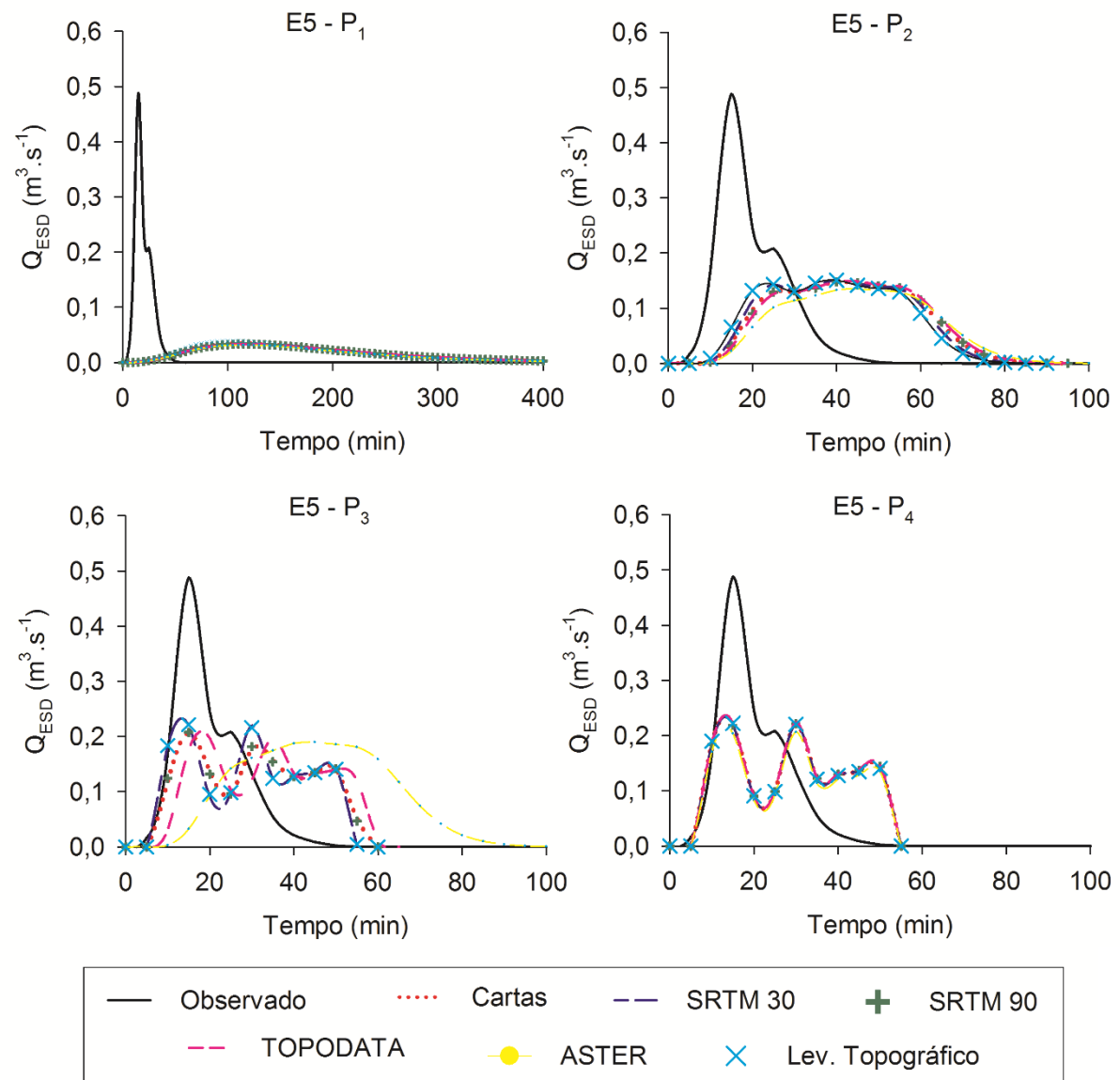


Figura B86 – Hidrogramas de ESD modelados para o Evento 05, da BHSE, fixando as propostas geomorfológicas e alterando os MDEs.