

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E EROSÃO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CHUVA E USO DO
SOLO EM BACIAS DO CARIRI PARAIBANO COM
O MODELO DISTRIBUÍDO MOSEE**

ZACARIAS CAETANO VIEIRA

Campina Grande
Data: FEVEREIRO / 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

MODELAGEM DO ESCOAMENTO E EROSÃO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CHUVA E USO DO SOLO EM
BACIAS DO CARIRI PARAIBANO COM O MODELO
DISTRIBUÍDO MOSEE

ZACARIAS CAETANO VIEIRA

CAMPINA GRANDE – PB

UFPA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UFPA/BIBLIOTECA

ZACARIAS CAETANO VIEIRA

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E EROSÃO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CHUVA E USO DO SOLO EM
BACIAS DO CARIRI PARAIBANO COM O MODELO
DISTRIBUÍDO MOSEE**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADOR: Prof. Eduardo Eneas de Figueiredo UAEC/CTRN/UFCG

CAMPINA GRANDE – PB



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

V658m Vieira, Zacarias Caetano.

Modelagem do escoamento e erosão sob diferentes condições de chuva e uso do solo em bacias do Cariri Paraibano com o modelo distribuído MOSEE / Zacarias Caetano Vieira. — Campina Grande, 2011. 145 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Ph.D. Eduardo Eneas de Figueiredo.

Referências.

1. Modelagem Hidrossedimentológica. 2. Semiárido. 3. Modelo distribuído de base física. I. Título.

CDU-551.51(043)

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E EROSÃO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CHUVA E USO DO SOLO EM
BACIAS DO CARIRI PARAÍBANO COM O MODELO
DISTRIBUÍDO MOSEE**

ZACARIAS CAETANO VIEIRA

APROVADA EM 24/02/2011

PELA SEGUINTE COMISSÃO EXAMINADORA



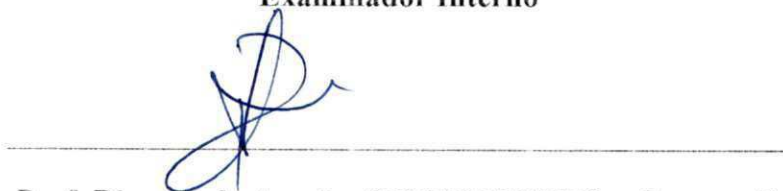
Prof. Eduardo Eneas de Figueiredo (UAEC/CTRN/UFCG – Campus I)

Presidente – Orientador



Prof. Dayse Luna Barbosa (UAEC/CTRN/UFCG – Campus I)

Examinador Interno



Prof. Ricardo de Aragão (DEC/CCET/UFS – Campus I)

Examinador Externo

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2011

“Ontem um menino que brincava me falou
Ele é semente do amanhã
Para não ter medo que este tempo vai passar
Não se desespere e nem pare de sonhar
Nunca se entregue, nasça sempre com as manhãs
Deixe a luz do sol brilhar no céu do seu olhar
Fé na vida, fé no homem, fé no que virá
Vamos lá fazer o que será”

DEDICATÓRIA

Aos meus pais adotivos, Sandoval Vieira Carneiro e Laura Carneiro de Andrade, aos meus pais biológicos José Caetano Irmão e Araci Vieira Carneiro (in memoriam) e a todos os meus irmãos, sobrinhos e demais familiares pelo imenso, verdadeiro e essencial carinho que sempre me dedicaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais adotivos, Sandoval Vieira Carneiro e Laura Carneiro de Andrade, pelo carinho que sempre me ofertaram.

Aos meus pais biológicos José Caetano Irmão e Araci Vieira Carneiro (in memoriam) pelo exemplo de honradez e decência.

Aos meus irmãos adotivos, Raimundo Vieira de Andrade, Maria Vieira de Andrade Carneiro, Luiza Vieira Carneiro, Luiz Vieira Carneiro, Zulmira Vieira Carneiro e Geralda Vieira Carneiro (in memoriam) e seus familiares.

Aos meus irmãos biológicos, Maria Vieira de Andrade, Raimundo Caetano Vieira, Iraci Vieira de Andrade, Francisca Fernandes Carneiro Neta, Pedro Caetano Vieira, Terezinha Vieira de Andrade, Josefa Vieira de Andrade, Bernadina Vieira de Andrade, João Caetano da Silva Neto, Edinete Vieira de Andrade, e seus familiares.

Aos amigos Benedito Vieira Carneiro, Expedita Basílio Carneiro, Edilson Araújo Dantas, Maria Clara Carneiro, Maria José das Chagas Sousa, Expedito Fernandes de Sousa, Lucas Gonzaga de Oliveira, Helisson dos Santos Sousa, Maria Railma Vieira de Freitas, Jeane Karla Mota, José Guimarães de Carvalho Neto, Rafael Fernandes de Andrade, e todos os demais que não foram citados, pelo apoio, incentivo, e por proporcionar momentos de alegria e diversão.

Ao professor e orientador Eduardo Enéas de Figueiredo pelo apoio, paciência e dedicação com que me orientou no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, Gledsneli Maria de Lima Lins, Carlos de Oliveira Galvão, Márcia Maria Rios Ribeiro, Janiro da Costa Rêgo, Wilson Fadlo Curi, Rosires Fadlo Curi, Iana Alexandra Alves Rufino, Dayse Luna Barbosa, e aos demais professores que me transmitiram seus conhecimentos no decorrer desses dois anos.

Ao professor Ricardo de Aragão por sua prestatividade e pelo fornecimento de dados e informações relevantes ao desenvolvimento desse trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Vera Lucia Alves Rodrigues, Alrezinha Dantas Veiga, Ismael José Pereira, Haroldo Pereira Santos, Raulino Farias de Brito, Lindimar Dantas Leite e demais funcionários da UAEC.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS DOS CAPÍTULOS

Figura 3.1 - Estrutura da bacia e representação do perfil de solo.....	16
Figura 3.2 - Fluxograma do modelo.....	17
Figura 3.3 - Representação da intensidade da precipitação.....	18
Figura 3.4 - Representação das proporções de cobertura vegetal e de rochas.....	19
Figura 3.5 - Representação da evapotranspiração do solo.....	19
Figura 3.6 - Relação entre evapotranspiração e tensão no solo.....	20
Figura 3.7 - Representação do escoamento sub-superficial.....	25
Figura 3.8 - Representação do escoamento de base.....	25
Figura 4.1 - Localização da BRS no Estado da Paraíba (divisão por Bacias Hidrográficas).....	29
Figura 4.2 - Área hidrologicamente homogênea no Nordeste.....	29
Figura 4.3 - Mapa de Solos da Bacia Representativa de Sumé.....	30
Figura 4.4 - Mapa de Relevo (em metros) da Bacia Representativa de Sumé	30
Figura 4.5 - Visão Tridimensional da Microbacia M1 da BES.....	32
Figura 4.6 - Visão Tridimensional da Microbacia M2 da BES.....	32
Figura 4.7 - Visão Tridimensional da Microbacia M3 da BES.....	33
Figura 4.8 - Visão Tridimensional da Microbacia M4 da BES.....	33
Figura 4.9 - Bacia Representativa de Sumé, sub-bacias e hidrografia.....	34
Figura 4.10 - Localização da Bacia Escola de São João do Cariri.....	35
Figura 4.11 - Delimitação da microbacia M1 da BESJC.....	37
Figura 4.12 - Delimitação das microbacias M2 e M3 da BESJC.....	37
Figura 4.13 - Bacia do Riacho Namorados (BRN) e suas sub-bacias.....	39
Figura 4.14 - Sub-bacias 1 e 2 da BRN.....	40

Figura 5.1- Curva de Capacidade de Infiltração da BRS.....	41
Figura 5.2 - Granulometria do Solo Erodido na Microbacia 3 da BRS.....	42
Figura 5.3 - Granulometria do Solo Erodido nas Microbacias da BESJC Cheia 82 (12/02/2002).....	47
Figura 5.4 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986).....	48
Figura 5.5 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986).....	48
Figura 5.6 - Erosão Observada e Simulada - M3 (1986).....	49
Figura 5.7 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1986).....	49
Figura 5.8 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984).....	50
Figura 5.9 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984).....	50
Figura 5.10 - Produção de Sedimentos Observada e Simulada - M4 (1984).....	50
Figura 5.11 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1984).....	51
Figura 5.12 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985).....	51
Figura 5.13 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985).....	51
Figura 5.14 - Erosão Observada e Simulada - M4(1985).....	52
Figura 5.15 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1985).....	52
Figura 5.16 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual - M4 (BES).....	63
Figura 5.17 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual - M4(BES).....	63
Figura 5.18 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos - M3 (BES).....	64
Figura 5.19 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos - M3(BES).....	64
Figura 5.20 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual - M1 (BESJC).....	65

Figura 5.21 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BESJC).....	66
Figura 5.22 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC).....	66
Figura 5.23 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC).....	67
Figura 5.24 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC).....	67
Figura 5.25 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC).....	68
Figura 5.26 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC).....	68
Figura 5.27 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC).....	69
Figura 5.28 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES).....	70
Figura 5.29 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES).....	70
Figura 5.30 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M3(BES).....	71
Figura 5.31 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M3(BES).....	71
Figura 5.32 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC).....	72
Figura 5.33 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC).....	72
Figura 5.34 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC).....	73
Figura 5.35 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC).....	73
Figura 5.36 - Hidrogramas diários observados e simulados – Gangorra(1977).....	74

Figura 5.37 - Hidrogramas diários observados e simulados – Jatobá(1977)	74
Figura 5.38 - Hidrogramas diários observados e simulados -- Umburana(1977).....	75
Figura 5.39 - Hidrogramas diários observados e simulados – Gangorra (1977).....	75
Figura 5.40 - Hidrogramas diários observados e simulados – Jatobá (1977).....	76
Figura 5.41 - Hidrogramas diários observados e simulados – Umburana (1977).....	76
Figura 5.42 - Efeito do Desmatamento na Geração do Escoamento(BES).....	78
Figura 5.43 - Efeito do Reflorestamento na Geração do Escoamento (BES).....	79
Figura 5.44 - Efeito do Desmatamento na Produção de Sedimentos (BES).....	79
Figura 5.45 - Efeito do Reflorestamento na Produção de Sedimentos (BES).....	79
Figura 5.46 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.47 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.48 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.49 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.50 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.51 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.52 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2006.....	83
Figura 5.53 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2006.....	83
Figura 5.54 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2004.....	83
Figura 5.55 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2004.....	84

LISTA DAS FIGURAS DO ANEXO

Figura A.1 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1986) – BES.....	98
Figura A.2 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas M1(1986) – BES.....	98
Figura A.3 - Erosão Observada e Simulada - M1 (1986) - BES.....	98
Figura A.4 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1986) – BES.....	98
Figura A.5 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1986) – BES.....	99
Figura A.6 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas – M2 (1986) - BES.....	99
Figura A.7 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1986) – BES.....	99
Figura A.8 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1986) - BES.....	99
Figura A.9 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) – BES.....	100
Figura A.10 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.11 - Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.12 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.13 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.14 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.15 - Erosão Observada e Simulada - M1 (1984)- BES.....	101
Figura A.16 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.17 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) - BES.....	102
Figura A.18 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) – BES.....	102

Figura A.19 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) –BES.....	102
Figura A.20 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) – BES.....	102
Figura A.21 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.22 - Comparação das Lâminas Observadas e Simulada - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.23 - Erosão Observada e Simulada em M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.24 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.25 - Lâminas Observadas e Simulada - M1 (1985) –BES.....	104
Figura A.26 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1985) –BES.....	104
Figura A.27 - Erosão Observada e Simulada- M1 (1985) – BES.....	104
Figura A28.- Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1985) – BES.....	104
Figura A.29 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.30 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.31 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.32 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.33 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1985) – BES.....	106
Figura A.34 - Comparação das Lâminas Observadas e Smuladas - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.35 - Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.36 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.37 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC.....	107

Figura A.38 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC.....	107
Figura A.39 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC.....	107
Figura A.40 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC.....	107
Figura A.41 - Lâminas Observadas e Simuladas em M3(2002) – BESJC.....	108
Figura A.42 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2002) – BESJC.....	108
Figura A.43 - Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC.....	108
Figura A.44 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC.....	108
Figura A.45 - Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.46 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.47 - Erosão Observada e Simulada - M3 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.48 - Comparação da Erosão Observada e Simulada em M3 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.49 - Lâminas Observadas e Simuladas em M1(2003) - BESJC.....	110
Figura A.50 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2003) - BESJC.....	110
Figura A.51 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) - BESJC.....	110
Figura A.52 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) - BESJC.....	110
Figura A.53 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC.....	111
Figura A.54 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC.....	111
Figura A.55 - Erosão Observada e Simulada - M1(2003) – BESJC.....	111

Figura A.56 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1(2003) – BESJC.....	111
Figura A.57 - Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC.....	112
Figura A.58 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC.....	112
Figura A.59 - Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC.....	112
Figura A.60 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC.....	112
Figura A.61 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.62 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.63 - Lâminas Observadas e Simuladas em M2 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.64 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.65 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.66 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.67 - Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.68 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.69 - Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.70 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.71 - Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.72 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.73 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 1984 (BES).....	116

Figura A.74 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1984 (BES).....	116
Figura A.75 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1984 (BES).....	116
Figura A.76 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M4 – 1984 (BES).....	116
Figura A.77 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 1985 (BES).....	117
Figura A.78 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1985 (BES).....	117
Figura A.79 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1985 (BES).....	117
Figura A.80 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M4 – 1985 (BES).....	117
Figura A.81 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M1 – 1986 (BES).....	118
Figura A.82 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1986 (BES).....	118
Figura A.83 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1986 (BES).....	118
Figura A.84 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M4 – 1986 (BES).....	118
Figura A.85 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.86 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.87 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.88 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 2003 (BESJC).....	119

Figura A.89 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2003 (BESJC).....	120
Figura A.90 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2003 (BESJC).....	120
Figura A.91 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 2004 (BESJC).....	120
Figura A.92 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2004 (BESJC).....	120
Figura A.93 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.94 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.95 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -SB2 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.96 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 – 2005 (BESJC).....	121
Figura A.97 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB2 – 2005 (BESJC).....	122
Figura A.98 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual SB1 – 2006 (BESJC).....	122
Figura A.99 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual SB2 – 2006 (BESJC).....	122
Figura A.100 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 – 1984 (BES).....	122
Figura A.101 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 – 1984 (BES).....	123
Figura A.102 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 – 1984 (BES).....	123
Figura A.103 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1984 (BES).....	123

Figura A.104 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 1985 (BES).....	123
Figura A.105 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 1985 (BES).....	124
Figura A.106 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 1985 (BES).....	124
Figura A.107 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1985 (BES).....	124
Figura A.108 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 1986 (BES).....	124
Figura A.109 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 1986 (BES).....	125
Figura A.110 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 1986 (BES).....	125
Figura A.111 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1986 (BES).....	125
Figura A.112 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2002 (BESJC).....	125
Figura A.113 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2002 (BESJC).....	126
Figura A.114 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2002 (BESJC).....	126
Figura A.115 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2003 (BESJC).....	126
Figura A.116 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2003 (BESJC).....	126
Figura A.117 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2003 (BESJC).....	127
Figura A.118 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2004 (BESJC).....	127
Figura A.119 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2004 (BESJC).....	127

Figura A.120 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2004 (BESJC).....	127
Figura A.121 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2004 (BESJC).....	128
Figura A.122 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2004 (BESJC).....	128
Figura A.123 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2005 (BESJC).....	128
Figura A.124 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2005 (BESJC).....	128
Figura A.125 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2006 (BESJC).....	129
Figura A.126 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2006 (BESJC).....	129
Figura A.127 – Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1984 (BES).....	129
Figura A.128 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1984 (BES).....	129
Figura A.129 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1984 (BES).....	130
Figura A.130 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1984 (BES).....	130
Figura A.131 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1985 (BES).....	130
Figura A.132 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1985 (BES).....	130
Figura A.133 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1985 (BES).....	131
Figura A.134 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1985 (BES).....	131

Figura A.135 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1986 (BES).....	131
Figura A.136 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1986 (BES).....	131
Figura A.137 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1986 (BES).....	132
Figura A.138 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 1986 (BES).....	132
Figura A.139 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2002 (BESJC).....	132
Figura A.140 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2002 (BESJC).....	132
Figura A.141 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2002 (BESJC).....	133
Figura A.142 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.143 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.144 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.145 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.146 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.147 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.148 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1- 1984 (BES).....	134
Figura A.149 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2- 1984 (BES).....	135
Figura A.150 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1984 (BES).....	135

Figura A.151 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1984 (BES).....	135
Figura A.152 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1985 (BES).....	135
Figura A.153 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1985 (BES).....	136
Figura A.154 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1985 (BES).....	136
Figura A.155 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1985 (BES).....	136
Figura A.156 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1986 (BES).....	136
Figura A.157 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1986 (BES).....	137
Figura A.158 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1986 (BES).....	137
Figura A.159 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1986 (BES).....	137
Figura A.160 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2002 (BESJC).....	137
Figura A.161 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2002 (BESJC).....	138
Figura A.162 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2002 (BESJC).....	138
Figura A.163 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2003 (BESJC).....	138
Figura A.164 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2003 (BESJC).....	138
Figura A.165 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2003 (BESJC).....	139

Figura A.166 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.167 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.168 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.169 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BES).....	140
Figura A.170 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BES).....	140
Figura A.171 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BES).....	140
Figura A.172 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M1 (BES).....	140
Figura A.173 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M2 (BES).....	141
Figura A.174 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M4 (BES).....	141
Figura A.175 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BESJC).....	141
Figura A.176 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BESJC).....	141
Figura A.177 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico – M2 (BESJC).....	142
Figura A.178 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico – M3 (BESJC).....	142
Figura A.179 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na lâmina anual – SB1 (BESJC).....	142
Figura A.180 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico - SB1- (BESJC).....	142

Figura A.181 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BES).....	143
Figura A.182 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M2(BES).....	143
Figura A.183 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M4(BES).....	143
Figura A.184 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M1(BES).....	143
Figura A.185 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M2 (BES).....	144
Figura A.186 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M4(BES).....	144
Figura A.187 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M2(BESJC).....	144
Figura A.188 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BESJC).....	144
Figura A.189 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M2(BESJC).....	145
Figura A.190 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M3(BESJC).....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tamanhos e denominações das partículas de sedimento.....	9
Tabela 4.1 - Características das microbacias.....	31
Tabela 4.2 - Características da BRS.....	34
Tabela 4.3 - Características das microbacias da BESJC.....	36
Tabela 5.1 - Declividade média da bacia, declividade e comprimento dos rios.....	45
Tabela 5.2 - Textura do solo das microbacias (BESJC).....	46
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados da modelagem (ano de 1986) – BES.....	47
Tabela 5.4 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) – BES.....	48
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados da validação (ano de 1984) – BES.....	52
Tabela 5.6 - Resumo dos resultados da validação (ano de 1985) – BES.....	53
Tabela 5.7 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) – BESJC.....	53
Tabela 5.8 - Resultados sem calibração (ano de 2002) – BESJC.....	53
Tabela 5.9 - Resultados sem calibração (ano de 2003) – BESJC.....	53
Tabela 5.10 - Resultados sem calibração (ano de 2004) – BESJC.....	53
Tabela 5.11 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1984 (BES).....	54
Tabela 5.12 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1985 (BES).....	54
Tabela 5.13 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1986 (BES).....	55
Tabela 5.14 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2002 (BESJC).....	55
Tabela 5.15 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2003 (BESJC).....	55
Tabela 5.16 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC).....	55

Tabela 5.17 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC).....	56
Tabela 5.18 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2005 (BESJC).....	56
Tabela 5.19 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2006 (BESJC).....	56
Tabela 5.20 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1984 (BES).....	56
Tabela 5.21 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1985 (BES).....	57
Tabela 5.22 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1986 (BES).....	57
Tabela 5.23 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2002 (BESJC).....	57
Tabela 5.24 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2003 (BESJC).....	57
Tabela 5.25 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC).....	58
Tabela 5.26 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC).....	58
Tabela 5.27 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2005 (BESJC).....	58
Tabela 5.28 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2006 (BESJC).....	58
Tabela 5.29 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1984 (BES).....	59
Tabela 5.30 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1985 (BES).....	59
Tabela 5.31 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1986 (BES).....	59
Tabela 5.32 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2002 (BESJC).....	60
Tabela 5.33 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2003 (BESJC).....	60
Tabela 5.34 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2004 (BESJC).....	60
Tabela 5.35 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1984 (BES).....	61
Tabela 5.36 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1985 (BES).....	61
Tabela 5.37 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1986 (BES).....	61

Tabela 5.38 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2002 (BESJC).....	61
Tabela 5.39 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2003 (BESJC).....	62
Tabela 5.40 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2004 (BESJC).....	62
Tabela 5.41 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 1984 a 1986 (BES).....	63
Tabela 5.42 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.41).....	63
Tabela 5.43 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 1984 a 1986 (BES).....	64
Tabela 5.44 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.43).....	64
Tabela 5.45 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC).....	65
Tabela 5.46 - Resultados obtidos usando parâmetros médios da Tabela 5.45.....	65
Tabela 5.47 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC).....	66
Tabela 5.48 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.47).....	66
Tabela 5.49 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2004 a 2006 (BESJC).....	67
Tabela 5.50 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.49).....	67
Tabela 5.51 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2004 a 2006 (BESJC).....	68
Tabela 5.52 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.51).....	68
Tabela 5.53 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 1984 a 1986 (BES).....	69
Tabela 5.54 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.53).....	69
Tabela 5.55 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 1984 a 1986 (BES).....	70
Tabela 5.56 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.55).....	70

Tabela 5.57 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_{r(\text{méd})}$) – 2002 a 2004 (BES).....	71
Tabela 5.58 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{méd})}$ (Tabela 5.57).....	71
Tabela 5.59 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_{r(\text{méd})}$) – 2002 a 2004 (BES).....	72
Tabela 5.60 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{méd})}$ (Tabela 5.59).....	72
Tabela 5.61 - Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M1.....	77
Tabela 5.62 - Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M2.....	78
Tabela 5.63 - Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M3.....	78
Tabela 5.64 - Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M4.....	78
Tabela 5.65 - Resultados Anuais para as condições, vegetadas e não vegetada, das bacias hidrográficas.....	79
Tabela 5.66 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	80
Tabela 5.67 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	80
Tabela 5.68 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Tabela 5.69 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 e SB2 (BESJC) – ano de 2006.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

%C – percentagem de argila

%S – percentagem de areia

ϕ - porosidade do solo (m^3/m^3)

θ - umidade volumétrica do solo (m^3/m^3)

ψ_{10} – tensão de entrada de ar no solo (kPa)

Δt - intervalo de tempo

a e b são coeficientes da expressão que calcula a tensão crítica do sedimentos (-)

A, B – parâmetros da equação de Saxton et al (1986)

A_b - área da bacia, (km^2)

$C = \Delta t/t_c$ - coeficiente de propagação do escoamento (-)

C - parâmetro da expressão potencial para cálculo da capacidade de infiltração (mm/h)

C_1, C_2 e C_3 - coeficientes de Muskingum (-)

C_g e C_r - proporções de cobertura do solo pela vegetação e rochas

C_S - concentração de sedimentos disponível para transporte

C_t - concentração de sedimentos na capacidade de transporte (m^3/m^3)

d - diâmetro do sedimento (m)

d - diâmetro da gota que cai da vegetação (m)

D- expoente da expressão potencial para cálculo da capacidade de infiltração (-)

D_{50} - diâmetro mediano do sedimento (m)

D_f - desprendimento de solo pelo escoamento ($kg/m^2.s$)

d_m - diâmetro representativo da gota de chuva (m)

D_r - erosão pelo impacto da chuva ($kg/m^2.s$)

D_{rg} - drenagem da cobertura vegetal (mm/h)

D_s - densidade do solo

E_a - evapotranspiração real (mm)

E_p - evapotranspiração (mm)

f - capacidade de infiltração média do solo (mm/h)

f_0, f_c - capacidade de infiltração inicial e final na equação exponencial (mm/h)

f_{ar} - fator de aprisionamento de ar

F_w - fator de redução da erosão pelo incremento da lâmina do escoamento

g - aceleração da gravidade ($9,806 \text{ m/s}^2$)

h - profundidade do fluxo (m)

$h(\theta)$ - lâmina correspondente a umidade θ ($\theta > \theta_{cc}$)

h_A, h_B, h_C - espessura das camadas A, B e C (cm)

h_c é a profundidade de fluxo no canal (m)

h_{gw} - carga freática (m)

h_r - carga do rio (m)

I - escoamento total no trecho de rio (l/s)

i - intensidade da chuva (mm/h)

I_b - escoamento de base (l/s)

I_s - escoamento superficial de entrada no trecho do rio (l/s)

I_{sb} - escoamento sub-superficial (l/s)

$I_{t+\Delta t}$ - escoamento atual na entrada do trecho do rio (l/s)

K - tempo de translação do hidrograma (min)

k - parâmetro de recessão da expressão para cálculo da capacidade de infiltração (-)

$K(\theta)$ - condutividade hidráulica em função do teor de umidade do solo (mm/h)

K_A, K_B e K_C - condutividade hidráulica das camadas A, B e C (mm/h)

K_f - coeficiente de erosividade do fluxo ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

K_m - menor condutividade hidráulica entre camadas adjacentes (mm/h)

- K_r - coeficiente de erosividade da chuva ($s^2/kg.m^2$)
- K_s - condutividade hidráulica saturada (mm/h)
- L - extensão do trecho de rio (km)
- L_d - proporção da drenagem (D_{rg}) que cai das folhas
- M/β e Y - termos da expressão para cálculo da velocidade das gotas que caem da vegetação
- M_d - momento quadrado da gota de chuva que cai da vegetação [$(kg.m/s)^2 m^{-2}s^{-1}$]
- M_r - momento quadrado da chuva por unidade de área e de tempo [$(kg.m/s)^2 m^{-2}s^{-1}$]
- n - rugosidade do trecho do rio
- P_i - alturas de chuva (mm)
- q - fluxo vertical por unidade de área ($cm^3/s/cm^2$)
- Q_t - escoamento no trecho de rio (l/s)
- $Q_{t+\Delta t}$ - escoamento atual na saída do trecho do rio (l/s)
- R^* - número de Reynolds da partícula
- S - declividade do trecho de rio (m/m)
- S - declividade da bacia (m/m)
- S_e - saturação relativa (-)
- S_s - densidade do sedimento, igual a 2,65
- t - tempo
- t_c - tempo de concentração do trecho de rio (min)
- u - velocidade média do fluxo (m/s)
- V - velocidade das gotas que caem da vegetação
- X - fator de forma da equação de Muskingum
- z - distância vertical a partir da superfície
- α - um fator local da equação (3.1)
- α e β - parâmetros da equação do momento quadrado da chuva

γ - peso específico da água (9806 N/m³)

η - expoente da saturação relativa

$\theta_{A(t+\Delta t)} - \theta_{A(t)}$ - variação do teor de umidade na camada A no tempo (m³/m³)

$\theta_{Amin}, \theta_{Bmin}$ - teor mínimo de umidade das camadas A e B, que permite que haja percolação entre as camadas

$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)}$ - variação do teor de umidade na camada B no tempo (m³/m³)

$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)}$ - variação do teor de umidade na camada C no tempo (m³/m³)

θ_{cc} - umidade da capacidade de campo (m³/m³)

θ_{fc} - umidade volumétrica na capacidade de campo (m³/m³)

θ_r - umidade residual (m³/m³)

θ_s - umidade de saturação (m³/m³)

$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t \pm \Delta\theta$ - umidade atual da camada de solo (m³/m³)

θ_{wp} - umidade volumétrica no ponto de murcha (m³/m³)

ν - viscosidade cinemática do fluido (8,94 x 10⁻⁷ N.s/m²)

ρ - massa específica da água (1000 kg/m³)

ρ_s - massa específica do sedimento (2650 kg/m³)

τ e τ_c - tensões de cisalhamento do fluxo e crítica do sedimento

ψ - tensão do solo (kPa)

SUMÁRIO

Dedicatória	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de Figuras dos Capítulos.....	iv
Lista de Figuras do Anexo.....	viii
Lista de Tabelas.....	xx
Lista de Símbolos.....	xxiv
Sumário.....	xxviii
Resumo	xxxii
Abstract.....	xxxiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problemática.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Estrutura da Dissertação.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Escoamento Superficial.....	4
2.2 Erosão do Solo e Produção de Sedimentos.....	4
2.2.1 Erosão nos Planos.....	5
2.2.2 Erosão nos Canais.....	6
2.2.3 Estimativa da Erosão.....	6
2.3 Transporte e Deposição de Sedimentos.....	6
2.3.1 Carga Dissolvida, Carga no Leito, Carga em Suspensão e Carga Total.....	7
2.3.2 Propriedades dos Sedimentos.....	8
2.4 Modelos Hidrológicos.....	10
2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos.....	11
2.5 Escalas Temporais e Espaciais nos Modelos Matemáticos.....	12
2.6 Modelos Hidrossedimentológicos.....	13
3 MODELO DISTRIBUÍDO MOSEE.....	16
3.1 Descrição Sumária do Modelo.....	16

3.2 Componentes do Modelo e Processos.....	18
3.3 Componente de Fluxo.....	18
3.3.1 Precipitação e Intercepção.....	18
3.3.2 Evapotranspiração.....	19
3.3.3 Infiltração.....	20
3.3.4 Percolação.....	21
3.3.4.1 Tensão no solo.....	21
3.3.4.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada.....	23
3.3.4.3 Condutividade Hidráulica Saturada.....	23
3.3.4.4 Teor de Umidade dos Solos.....	24
3.3.5 Escoamentos Superficial, Sub-Superficial e Subterrâneo.....	24
3.3.6 Propagação do Escoamento.....	26
3.4 Componente de Erosão do Solo.....	26
3.4.1 Erosão pela Chuva.....	26
3.4.2 Erosão pelo Escoamento.....	27
3.4.3 Carga Total de Sedimento Disponível para Transporte.....	27
3.4.4 Capacidade de Transporte de Sedimentos pelo Fluxo.....	27
4 ÁREA DE ESTUDO E DADOS OBSERVADOS.....	29
4.1 Bacia Experimental e Representativa de Sumé (BES e BRS).....	29
4.1.1 Localização.....	29
4.1.2 Características Físico-Climáticas.....	30
4.1.3 As Unidades Experimentais.....	31
4.1.3.1 Microbacias.....	31
4.1.3.2 Bacia Representativa de Sumé.....	34
4.2 Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC).....	35
4.2.1 Localização.....	35
4.2.2 Características Físico-Climáticas.....	35
4.2.3 As Unidades Experimentais da BESJC.....	36
4.2.3.1 Microbacias.....	36
4.2.3.2 Sub-bacias.....	38
4.3 Dados Disponíveis e Utilizados.....	40
5 MODELAGEM E RESULTADOS.....	41
5.1 Bacia Experimental de Sumé.....	41
5.1.1 Modelagem do Escoamento.....	41
5.1.2 Modelagem da Erosão do Solo.....	42
5.2 Bacia Representativa de Sumé (BRS).....	43
5.2.1 Parâmetros da bacia de Gangorra (BRS).....	43
5.2.2 Parâmetros da bacia de Jatobá.....	44
5.2.3 Parâmetros da bacia de Umburana.....	44
5.3 Bacia Experimental de São João do Cariri.....	45
5.3.1 Modelagem do Escoamento.....	45

5.3.2	Modelagem da Erosão do solo.....	46
5.4	Calibração e Validação.....	47
5.5	Calibração do Coeficiente de Propagação do Escoamento.....	54
5.5.1	Calibração de C para ajuste da Lâmina Anual – BES (Microbacias).....	54
5.5.2	Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Microbacias).....	55
5.5.3	Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Sub- bacias).....	55
5.5.4	Calibração de C para ajuste dos Picos – BES (Microbacias).....	56
5.5.5	Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Microbacias).....	57
5.5.6	Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Sub-bacias).....	58
5.6	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva.....	58
5.6.1	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BES (Microbacias).....	59
5.6.2	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BESJC (Microbacias).....	60
5.6.3	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BES (Microbacias).....	60
5.6.4	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BESJC (Microbacias).....	61
5.7	Simulação dos Processos de Escoamento e Erosão com parâmetros médios.....	62
5.7.1	Simulação do Escoamento com $C_{médio}$ (BES).....	62
5.7.2	Simulação do Escoamento com $C_{médio}$ - Microbacias (BESJC).....	65
5.7.3	Simulação do Escoamento com $C_{médio}$ - Sub-bacias (BESJC).....	67
5.7.4	Simulação da Produção de Sedimentos com $K_{r(médio)}$ (BES).....	69
5.7.5	Simulação da Produção de Sedimentos com $K_{r(médio)}$ – (BESJC).....	71
5.8	Simulações na BRS.....	73
5.9	Análise do Efeito da Cobertura Vegetal na Geração do Escoamento e Erosão do Solo.....	77
5.9.1	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BES).....	77
5.9.2	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Subbacias (BES).....	79
5.9.3	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BESJC).....	80

5.9.4	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Sub-bacias (BESJC).....	82
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	85
6.1	Escoamento Superficial.....	85
6.2	Produção de Sedimentos.....	86
6.3	Simulações com diferentes proporções de cobertura vegetal.....	87
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
7.1	Conclusões.....	89
7.2	Recomendações.....	90
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	ANEXO A.....	98
	ANEXO B.....	146

RESUMO

A crescente demanda por recursos hídricos, as mudanças climáticas e atividades humanas têm afetado bastante os processos de escoamento e erosão do solo, os quais requerem quantificação e avaliação. Nesse sentido, bacias representativas e experimentais foram instrumentadas em vários lugares para obtenção de dados e análise dos processos. No estado da Paraíba, a partir dos anos 1980, várias iniciativas foram tomadas para aquisição de dados em bacias experimentais e representativas, e para modelagem dos processos de escoamento e erosão do solo usando, principalmente, modelos orientados a eventos, os quais mostraram seu potencial para representar esses processos em base de eventos. No entanto, para avaliar o efeito de mudanças climáticas e do uso do solo sobre as respostas de bacias é necessário utilizar modelos apropriados tais como os modelos contínuos de base física. Nesta pesquisa o modelo contínuo de base física MOSEE, modelo para simulação do escoamento e erosão do solo, foi aplicado em microbacias da Bacia Representativa de Sumé (BRS) e suas sub-bacias, e em microbacias da Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) e suas sub-bacias, na simulação do escoamento e erosão do solo utilizando dados naturais de precipitação e considerando diferentes proporções de desmatamento e reflorestamento. Os resultados obtidos com o modelo mostraram-se consistentes com os processos observados (escoamento e erosão), os efeitos do desmatamento sobre as respostas foram relevantes, principalmente sobre a erosão devido ao aumento do desprendimento do solo, escoamento e transporte de sedimentos, enquanto que, o reflorestamento teve grande impacto em reduzir o escoamento e a erosão do solo. Os resultados do modelo também mostraram grande sensibilidade dos processos quanto a variabilidade da chuva.

ABSTRACT

The growing demands for water resources and the climatic changes and human activities have been affecting a great deal the runoff and soil erosion processes, which require quantification and evaluation. In this sense, representative and experimental basins have been instrumented everywhere for data acquisition, and analysis of these processes. In the state of Paraíba, from the 80s on, several initiatives have been taken to acquire data in experimental and representative catchments, and model relevant hydrologic and erosion processes using, principally, event-oriented models, which have been given evidence of their importance to represent the processes at an event basis. However, to evaluate the effect of climatic and land use changes on basin responses it is necessary to use appropriate models such as physically based continuous models. In this research the continuous physically based model MOSEE, a model for soil erosion estimation, was applied to micro-basins in the representative basins of Sumé (RBS) and its sub-basins, to micro-basins in the experimental basin of São João do Cariri (BESJC) and its sub-basins, to simulate runoff and soil erosion using observed data of natural rainfall considering different proportions of deforestation and afforestation. The model results agreed quite well with the observed values, and the effects of deforestation on responses were relevant, mainly on the soil erosion due to the increasing soil detachment and runoff and sediment transport, while the afforestation had great impact in reducing runoff and soil erosion. The model results also demonstrated to be very sensitive to the rainfall variability.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Atualmente com a crescente demanda dos recursos hídricos, principalmente para o abastecimento humano, indústria e atividades agropecuárias, tem-se colocado a questão do processo de decisão por parte dos gestores como essencial para a sustentabilidade hídrica. Além do crescimento da demanda hídrica, as alterações climáticas e a intervenção humana na natureza perturbam consideravelmente o ciclo hidrológico.

A hidrologia é uma ciência multidisciplinar que tem como objeto de estudo o ciclo hidrológico, ou seja, a ocorrência, circulação e distribuição da água, levando em consideração suas propriedades e interação com o meio ambiente. Para que se tenha um eficaz processo de gestão desses recursos, faz-se necessário a simulação de processos naturais, sua quantificação e, posteriormente, a caracterização dos impactos sofridos pelo meio ambiente. Nesse sentido, a modelagem hidrológica apresenta-se como uma ferramenta indispensável, sendo cada vez mais utilizada, principalmente na simulação do escoamento superficial e da erosão dos solos em bacias hidrográficas.

Escoamento superficial é o processo de deslocamento da água na superfície da bacia até encontrar um calha definida, sendo este processo resultado da interação entre a precipitação e bacia hidrográfica. O escoamento superficial provoca o arraste de partículas do solo e juntamente com as chuvas causam a chamada erosão hídrica.

Erosão é o processo de desprendimento e arraste das partículas do solo ocasionadas, principalmente, pela ação do vento (erosão eólica) e da água (erosão hídrica) (Carvalho, 1994). Esse processo vem sendo acelerado pelo homem, quando o mesmo passa a ocupar as terras de forma inadequada e intervir de forma mais intensa sobre as mesmas. A erosão hídrica é o resultado da ação conjunta do impacto das gotas de chuva (desprendimento) e das enxurradas (arraste de partículas) provenientes das águas que não foram retidas ou infiltradas no solo, se constituindo na principal forma de degradação dos solos.

Para um melhor entendimento dos processos de escoamento e erosão, e das alterações que estes provocam ao meio ambiente, utilizam-se atualmente, com bastante frequência duas alternativas: a) a análise via experimentos dos processos hidrossedimentológicos em bacias representativas e experimentais; b) a simulação desses processos através do uso de modelos adequados e capazes de quantificar os efeitos de mudanças que possam ocorrer no clima e no uso do solo sobre os processos naturais (Aragão, 2000).

A consideração de diferentes condições de chuva e uso do solo é importante para o resultado da modelagem e na quantificação do escoamento superficial e erosão do solo. Nesse contexto, o presente trabalho visa utilizar o modelo distribuído denominado

MOSEE – Modelo de Simulação do Escoamento e Erosão (Figueiredo, 2009), que leva em conta esses aspectos.

1.1 – Problemática

Modelos matemáticos têm sido utilizados para simulação dos processos hidrossedimentológicos (escoamento e erosão do solo) desde os anos 60. Inicialmente, os modelos empíricos e semiconceituais foram os mais utilizados até meados dos anos 80. Como exemplos pode-se citar a equação universal da perda do solo – USLE (Wischmeier, 1960), juntamente com os modelos semiconceituais combinados com a USLE (e.g. Williams, 1975). Posteriormente, novos modelos, denominados modelos de base física, foram desenvolvidos, apresentando uma maior complexidade. Dentre estes modelos podem ser citados, o modelo WESP (Lopes, 1987) e o SHE (Abbott et al., 1986a,b) com suas versões avançadas SHRED (Bathurst et al., 1995; Wicks e Bathurst, 1996), SHERTRAN (Bathurst e Purnama, 1991; Ewen et al., 2000), e KINEROS (Woolhiser et al., 1990).

Os modelos de base física usam leis físicas e contêm parâmetros com significado físico que podem ser estimados ou calibrados, tornando-se assim mais apropriados para investigar os impactos da mudança de clima, da cobertura vegetal, do uso do solo, escala, e do relevo e hidrografia na resposta da bacia hidrográfica. Apresentam como vantagem, o fato de requererem poucos dados de precipitação, mas em contrapartida a validação deve ser feita de forma diferenciada. Tais modelos são geralmente distribuídos, sendo a bacia dividida conforme o clima, relevo, cobertura vegetal, tipo de solo, etc., em sub-bacias, planos ou quadrículas.

O grande número de parâmetros utilizados, a simulação em grandes escalas e a representação espacial da bacia hidrográfica, tem sido apontado com limitações destes modelos, implicando em incertezas quanto aos resultados obtidos com seu uso. Além do mais, modelos como o WESP(Lopes, 1987) e KINEROS2(Woolhiser et al., 1990) consideram os eventos isoladamente e não consideram o processo de evapotranspiração o que não permite a atualização da umidade entre os eventos.

1.2 – Objetivos

Modelar o escoamento e erosão do solo de maneira contínua, utilizando o modelo MOSEE, sob diferentes condições de precipitação e uso do solo em bacias do Cariri paraibano.

Como objetivos específicos destacam-se: a) Escolher diferentes condições de precipitação na região do Cariri paraibano e preparar o banco de dados para simulação do escoamento e erosão do solo; b) Parametrizar o modelo sob diferentes condições de uso do solo; c) Testar a parametrização em pequenas áreas (microbacias); d) Verificar a parametrização testada em nível de eventos, na simulação contínua de múltiplos eventos

em condições diferentes de chuva; e) Validar a parametrização em outras escalas e condições de chuva; f) Avaliar o efeito do desmatamento e reflorestamento sobre os processos hidrossedimentológicos; g) Estabelecer o padrão de erosão (taxas) relativo às escalas investigadas e ao regime de chuvas a partir dos resultados obtidos.

1.3 – Justificativa

As regiões semiáridas em geral, e em particular a do Cariri no Estado da Paraíba, apresentam condições naturais que, por si só, já representam um problema para a conservação dos seus rasos solos, como por exemplo, chuvas irregulares e mal distribuídas, em geral intensas, alto índice de evaporação, vegetação pobre do tipo rasteira arbustiva com árvores típicas bastante espaçadas, baixas capacidades de infiltração e armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, escoamentos rápidos. Esses fatores, conjuntamente com o uso do solo, favorecem a erosão da camada superficial por desprendimento, devido à energia da chuva, e pelo escoamento superficial. Iniciativas no sentido de mensurar os processos de escoamento e erosão começaram notadamente nos anos 80 na região do Cariri paraibano (Cadier e Freitas, 1982; Cadier et al, 1983). A modelagem desses processos tem sido feita através de modelos distribuídos, tanto orientado a eventos (Woolhiser et al., 1990; Srinivasan et al., 2004) quanto contínuos (Figueiredo, 1998; Figueiredo e Davi, 2006; Figueiredo, 2008) considerando a bacia dividida em quadriculas (Bathurst et al., 1995) ou planos e canais (Lopes, 1987; Lopes, 2003). Os resultados obtidos com aplicação desses modelos indicam o potencial dos mesmos na simulação dos processos. No entanto, uma avaliação dos efeitos da variabilidade da chuva e uso do solo ainda precisa ser feita com um modelo contínuo.

1.4 – Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta de mais 6 capítulos além da Introdução (Capítulo 1), organizados da seguinte forma: No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, onde são apresentados conceitos ligados ao escoamento superficial e erosão do solo, modelos hidrológicos e modelagem hidrossedimentológica. No Capítulo 3, o modelo utilizado é descrito, com seus componentes (escoamento e erosão) e os seus processos, assim como as equações utilizadas. No Capítulo 4, descrevem-se as unidades experimentais e os dados utilizados no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 5 é apresentada a modelagem, e conjuntamente, a calibração e validação do modelo. No Capítulo 6, faz-se a análise e discussão dos resultados. No Capítulo 7, finalmente, são feitas as conclusões acerca da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - escoamento Superficial

Dos processos que compõem o ciclo hidrológico, provavelmente o mais importante para o engenheiro seja o escoamento superficial, visto que é um processo complexo resultante da interação entre os outros processos hidrológicos. Além do mais, a maioria dos estudos em engenharia de recursos hídricos busca o aproveitamento dessa água ou a atenuação dos efeitos do seu deslocamento.

De acordo com Figueiredo (1998) o escoamento superficial é basicamente gerado por dois mecanismos: a) quando há um excesso de precipitação sobre a capacidade de infiltração do solo, denominado de fluxo Hortoniano, b) quando ocorre a saturação do solo. O primeiro mecanismo é característico das precipitações intensas, enquanto o segundo, dos eventos chuvosos de longa duração.

Em regiões áridas e semiáridas que apresentam uma camada de solo extremamente rasa, vindo logo em seguida uma camada rochosa, pode se perceber que o principal mecanismo de geração do escoamento é o fluxo Hortoniano (Aragão, 2000). Segundo Chow *et al* (1988) solos mais profundos, com maior teor de areia e maior porosidade apresentam uma maior capacidade de infiltração sendo menos suscetíveis a geração do escoamento.

O escoamento sofre a influência de vários fatores que vão facilitar ou dificultar a sua formação. Tais fatores podem ser de natureza climática, relacionada à precipitação (intensidade, duração e precipitação antecedente), de natureza fisiográfica, ligada às características físicas da bacia (área, forma, permeabilidade, capacidade de infiltração e topografia da bacia) e/ou de natureza antrópica, seja pelo desmatamento, reflorestamento, ou através de obras hidráulicas, tais como uma barragem (Villega e Mattos, 1975).

2.2 - Erosão do Solo e Produção de Sedimentos

A erosão causada pela água da chuva caracteriza-se como um processo complexo no qual o impacto das gotas de chuva e o arraste provocado pelo escoamento superficial provocam o desprendimento e o transporte de partículas de solo. O deflúvio superficial causa erosão através das tensões de atrito da água em movimento ou através da turbulência do escoamento (Righetto, 1998). Tal processo tem sido acelerado pela ação antrópica, principalmente pela retirada da cobertura vegetal. Dentre os vários danos causados pela erosão tem-se: sedimentação dos rios e reservatórios, aumento do risco de desertificação e a remoção da camada fértil de zonas agrícolas (Guerra *et al.*, 1999).

Regiões de clima tropical apresentam um processo erosivo mais intenso do que outras regiões, e em algumas áreas a erosão é agravada pelo fato das chuvas se concentrarem em certas estações do ano (Guerra *et al.*, 1999). Segundo Figueiredo (1998) a fina camada superficial de solo, característica de regiões semiáridas, é extremamente susceptível à erosão. Tal processo tem sido acelerado pelo desmatamento, uma vez que a chuva incide diretamente sobre o solo desprotegido. Outro fator importante para aceleração do processo de erosão e que deve ser considerado é a questão da açudagem. Para Figueiredo & Srinivasan (1999) a construção de açudes exige que a vegetação nativa seja retirada deixando o solo ao seu redor desprotegido e vulnerável aos efeitos erosivos da chuva.

Segundo Foster (1982) a erosão origina-se nos planos e canais e justamente nessas áreas ocorrem os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos.

A produção de sedimentos é definida como o total de descarga de sedimento de uma área de contribuição determinado em um ponto referencial por um período específico de tempo (Vanoni, 1977). Compreende os processos de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos. O impacto das gotas de chuva é o principal responsável pelo desprendimento das partículas do solo, deixando o material desprendido suscetível de ser transportado, seja pela ação do vento, do escoamento ou ação de outras precipitações. O carregamento dos sedimentos pelo escoamento ocorre de várias formas, definidas pelas características das partículas e capacidade do fluxo..

2.2.1 Erosão nos Planos

Nos planos podemos citar três estágios básicos de erosão hídrica.

O impacto das gotas de chuva possui um potencial erosivo, visto que irão primeiramente desagregar a partícula do solo, e em seguida, expulsar o material do local de origem, deixando-o exposto a ação do escoamento superficial (Ramos, 1995).

Quando a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, inicia-se o escoamento superficial que irá remover os sedimentos em uma fina camada do solo, recebendo a denominação de erosão laminar. Quando o escoamento se concentra em caminhos preferenciais surge à erosão em sulcos, propiciando o aparecimento de pequenas rugas ou sulcos que irão concentrar cada vez mais o fluxo. A variação da resistência do solo aliada as declividades do terreno fazem com que a formação dos sulcos ocorra de forma aleatória. Quando a erosão em sulcos se desenvolve e atinge determinadas proporções temos o estágio final denominado de erosão em ravinas (Vanoni, 1975).

A erosão laminar apresenta maior abrangência, podendo atingir grandes áreas, e conseqüentemente ter assim uma contribuição significativa. Contrariamente, as erosões

em sulcos e em ravinas apresentam menor abrangência, caracterizando-se como um processo localizado.

2.2.2 Erosão nos Canais

O fluxo em um canal gera uma força de cisalhamento nas suas superfícies laterais e no seu leito provocando o processo erosivo, que ocorre de forma contínua. Para Carvalho (1994) a erosão fluvial explica a formação dos rios e da rede de drenagem, sendo a responsável pelo aprofundamento e alargamento do leito dos rios. O transporte do material erodido nos planos aumenta a disponibilidade de material a ser transportado pelo escoamento, sendo que em determinadas situações pode ocorrer a deposição temporária desse material. Fatores como a quantidade de material disponível para transporte e características do material que compõem o leito e as laterais do curso d'água determinarão, dependendo do escoamento, o transporte de sedimentos.

Quando ocorre um aprofundamento do canal, a água infiltra nos planos aumentando sua umidade e conseqüentemente diminuindo a resistência do solo, e em alguns casos, pela ação da gravidade poderá ocorrer o deslizamento dos taludes dos canais (Figueiredo, 1998).

2.2.3 Estimativa da Erosão

A modelagem do processo de erosão do solo tem sido uma ferramenta indispensável para a estimativa da perda de solo, sendo extremamente útil no planejamento de ações de controle e combate dos efeitos desse fenômeno. A modelagem da erosão do solo pode ser feita, atualmente, através de muitas fórmulas tais como a USLE, MUSLE, KINEROS2 (Aragão, 2000), as quais foram desenvolvidas para diferentes condições de fluxo e características da bacia, diferindo consideravelmente nas taxas de erosão simuladas. Conseqüentemente, a escolha de uma ou outra metodologia para previsão da quantidade de sedimentos erodida constitui-se numa tarefa extremamente difícil e deve ser feita com base nos objetivos, precisão e principalmente disponibilidade de dados.

2.3 - Transporte e Deposição de Sedimentos

A carga de sedimentos em rios caracteriza-se como uma mistura de partículas de vários tipos, formas e tamanhos. O tipo da partícula é determinado por sua densidade, o tamanho por seu diâmetro e a forma por seu coeficiente de esfericidade (Christofoletti, 1981).

Sabemos que uma parte dos sedimentos tem origem na ação erosiva da água sobre as margens e o fundo do leito denominado de carga do leito; enquanto que a outra parte origina-se nas vertentes sendo denominada de carga em suspensão.

Segundo Vanoni (1977) a carga de sedimentos diz respeito ao tipo de material transportado, e o termo “descarga sólida” ou “descarga de sedimentos” refere-se a massa total de sedimentos que passa numa seção do rio em um determinado intervalo de tempo, sendo geralmente expressa em toneladas por dia.

De acordo com Carvalho (1994) o transporte de sedimentos apresenta as seguintes formas: a) Carga Sólida de Arrasto – as partículas rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d’água; b) Carga Sólida Saltante – as partículas pulam ao longo do curso d’água por efeito da correnteza ou impacto com outras partículas; e c) Carga Sólida em Suspensão – formado pelas partículas mais finas e que estão sempre em suspensão no meio do leito, acima do leito. Denomina-se de capacidade de transporte de sedimentos a máxima quantidade de sedimentos que o fluxo é capaz de transportar. Quando no fluxo tivermos uma quantidade de partículas superior a sua capacidade de transporte ocorre o fenômeno da deposição, que é mais notado em baixas velocidades de escoamento.

2.3.1 Carga Dissolvida, Carga no Leito, Carga em Suspensão e Carga Total

No processo de transporte de sedimentos pelo rio três tipos de cargas podem ser distinguidas: carga dissolvida, carga em suspensão e carga no leito (Santos et al., 2001).

A carga dissolvida compõe-se basicamente de constituintes intemperizados das rochas que são transportados pelo escoamento subterrâneo. Mas existem determinadas situações em que o escoamento superficial pode contribuir através de um processo denominado de poluição difusa, por exemplo, no carreamento de fertilizantes de uma área agrícola. Soma-se a isso, o aporte de cargas dissolvidas provenientes de fontes poluidoras. Assim, a quantidade de material em suspensão depende da contribuição do escoamento subterrâneo e superficial para a vazão do rio, sendo altamente variável temporal e espacialmente. Geralmente, o estudo da carga dissolvida está mais relacionado com a qualidade da água (Santos et al., 2001).

A carga em suspensão é constituída pelos sedimentos mais finos, como silte, argila, e areia em determinadas faixas granulométricas, sendo estas transportadas no fluxo turbulento e misturadas à água na forma de solução heterogênea. Em transporte de sedimentos, esta é a carga mais estudada, devido à maior importância comparada com a carga dissolvida e maior facilidade de medição em comparação com a carga do leito. Na maioria das vezes, determina-se o que é chamado de “sólidos totais”, ou seja, a soma das cargas em suspensão e dissolvida (Santos, et al., 2001).

A determinação da descarga sólida em suspensão é realizada através de medições, ou amostragens, dividindo a seção transversal em segmentos, uma vez que os sedimentos não apresentam uma distribuição uniforme. Para essa medição as amostras devem ser coletadas de forma a representar a média na seção transversal do rio no tocante à sua concentração e granulometria. Após a coleta dessas amostras, podemos

determinar apenas a carga em suspensão através da filtração, ou se queremos determinar os sedimentos em suspensão e dissolvidos, utilizamos em laboratório a técnica da secagem. Importante ressaltar que o amostrador não deve tocar no fundo do rio para não coletar sedimento de arraste e não agitar o sedimento presente no fundo do rio. Por isso, existe uma zona denominada de “zona não amostrada” que tem sua espessura determinada em função do tipo de amostrador e da natureza do leito.

A carga do leito é aquela composta de partículas de maiores diâmetros, e por esse motivo, permanecem sempre junto ao fundo do rio. Seu transporte ocorre de duas maneiras, através do arraste e da saltação. Na saltação, as partículas mantêm-se próximas do leito e a colisão entre elas mantém a sua densidade, que serve como transicional entre a carga que sempre está em contato com o leito (carga do leito) e a carga em suspensão. No arraste o transporte é realizado pelo efeito da tensão tangencial exercida pelo movimento do fluido, sendo que nesse processo as partículas sempre estão em contato com o leito (Santos et al., 2001).

Os métodos de medição direta da carga do leito não são métodos práticos, pois apresentam uma difícil operacionalização. Dentre esses métodos podemos destacar a medição por meio de armadilhas, o uso de amostradores portáteis e o uso de radioisótopos (traçadores). Segundo Carvalho (1994) existe muitas fórmulas para o cálculo da carga do leito, o que leva a escolha de uma ou outra metodologia há ser bastante criteriosa, considerando aspectos do curso d'água, como adequação da metodologia e facilidade de aplicação.

A determinação do valor da descarga sólida total pode ser feita através de métodos diretos ou indiretos. Segundo Carvalho (1994) pelo fato de não existir uma divisão física entre as principais descargas sólidas – a de suspensão e de arrasto- os métodos e equações desenvolvidos não apresentam resultados satisfatórios. Diretamente pode se determinar a descarga sólida total fazendo com que todo o sedimento fique em suspensão; e indiretamente, essa medição pode ser efetuada através de alguns processos: a) soma da descarga em suspensão com a de arrasto, e mais uma parcela que considera a descarga não amostrada, b) processos de cálculo como o método modificado de Einstein, e c) levantamento batimétrico do reservatório.

2.3.2 Propriedades dos Sedimentos

Estudam-se as propriedades das partículas dos sedimentos dadas a sua importância nos processos de erosão dos solos e transporte dos sedimentos; sendo, portanto, fundamental para a modelagem computacional, visto que determinadas propriedades como o diâmetro, forma e fator de forma influenciam esses processos. A classificação dos sedimentos que mais interessa são aquelas baseadas em seu tamanho, sua forma, sua densidade e velocidade de queda ou sedimentação.

O tamanho caracteriza-se como a propriedade mais utilizada e mais importante, podendo ser definido por seu volume e peso (peso específico), diâmetro representativo e velocidade de queda entre outras. A seguir é apresentada a classificação aceita pelo Subcomitê sobre Terminologia de Sedimentos da União Geofísica Americana.

Tabela 2.1 – Tamanhos e denominações das partículas de sedimento.

Tamanho (mm)	Denominação
4096 - 2048	Matacão muito grande
2048 - 1024	Matacão grande
1024 - 512	Matacão médio
512- 256	Matacão pequeno
256 - 128	Pedregulho grande
128 - 64	Pedregulho pequeno
64 - 32	Cascalho muito grosso
32 - 16	Cascalho grosso
16-8	Cascalho médio
8-4	Cascalho fino
4-2	Cascalho muito fino
2-1	Areia muito grossa
1 - 1/2	Areia grossa
1/2 - 1/4	Areia média
1/4 - 1/8	Areia Fina
1/8 - 1/16	Areia muito fina
1/16 - 1/32	Silte grosso
1/32 - 1/64	Silte médio
1/64 - 1/128	Silte fino
1/128 - 1/256	Silte muito fino
1/256 - 1/512	Argila grossa
1/512 - 1/1024	Argila média
1/1024 - 1/2048	Argila fina
1/2048 - 1/4096	Argila muito fina

Fonte: Garde & Ranga Raju (1985)

A forma das partículas de sedimentos varia de acordo com a porosidade, permeabilidade e coesividade dos solos; sendo utilizados coeficientes baseados no seu volume, na área projetada e nos eixos maior, intermediário e menor dos sedimentos. (Siviero, 1999). Segundo Suguio (2003) a forma influencia a velocidade de transporte, a velocidade de queda, a estabilidade dos taludes, etc.

A densidade das partículas é uma função de sua composição mineralógica, apresentando um intervalo característico de valores, sendo o valor de 2,65 utilizado como referência, e este afeta o transporte de sedimentos por segregação. Este valor provém de sedimentos compostos, principalmente por feldspato e quartzo.

A velocidade de queda ou sedimentação é uma função do tamanho, forma e densidade das partículas, além de outros fatores tais como, número de Reynolds, proximidade das paredes laterais do canal e concentração de sedimentos. A velocidade

de queda é de suma importância, visto que esta caracteriza a interação existente entre o transporte de sedimentos, o leito, as margens e o perfil de concentração. Quando em um regime estacionário, esta recebe a denominação de velocidade terminal (velocidade constante sob ação da gravidade) e apresenta um equilíbrio entre a força resistente (de arrastamento, devido ao atrito) e o peso submerso.

Partículas que apresentam forma irregular têm sua dimensão representada pelo diâmetro esférico equivalente, considerando-se então, os diâmetros nominais, de peneiração, de sedimentação e de queda. A seguir são apresentadas as descrições feitas por Souza (2007), as quais regem o processo de erosão e transporte dos sedimentos e são fundamentais para obtenção dos bons resultados com a aplicação dos modelos hidrossedimentológicos.

- a) Diâmetro nominal: diâmetro da esfera de densidade e volume iguais aos da partícula; (útil quando é fácil a medição do volume da partícula);
- b) Diâmetro de peneiração: diâmetro da esfera que, como a partícula, passa sem folga pela rede (malha) de uma peneira;
- c) Diâmetro de sedimentação: diâmetro da esfera de densidade igual à partícula, que atinge a “velocidade terminal”, igual a da partícula, nas mesmas condições (útil para areias finas, siltes e argilas);
- d) Diâmetro de queda: diâmetro da esfera de densidade 2,65, que atinge a mesma velocidade terminal da partícula, em água destilada à temperatura de 24°C. (útil para areias finas, siltes e argilas).

2.4 Modelos Hidrológicos

Um modelo representa algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, objetivando entendê-lo e buscando suas respostas para diferentes entradas. Um modelo hidrológico constitui-se numa ferramenta que pode ser utilizada para o monitoramento do comportamento da bacia hidrográfica, ou seja, a previsão de suas respostas as mais diversas ações, tais como, modificações no uso do solo, chuvas intensas, construção de açudes, urbanização da bacia, estiagens, entre outras (Tucci, 2006).

Os modelos hidrológicos visam representar os fenômenos naturais, mesmo que de forma aproximada; visto que variáveis hidrológicas, como vazão, precipitação ou produção de sedimentos provavelmente será prevista apresentando sempre uma determinada incerteza. Outro fator preponderante é o fato de que os fenômenos hidrológicos apresentam variações em três dimensões, e além do mais, ainda variam no tempo. Daí, a consideração das incertezas inerentes aos modelos, das variações nas três dimensões e no tempo torna-se extremamente complexa. Portanto, adota-se na maioria dos modelos somente uma ou duas dessas fontes de variação (Chow et al., 1988).

2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos

A denominação recebida pelos modelos está ligada ao seu objetivo principal. Assim sendo, os modelos que objetivam calcular as vazões de uma bacia hidrográfica a partir da precipitação ocorrida sobre a mesma são denominados de modelos chuva-vazão. Aqueles que são utilizados para calcular as vazões numa seção do rio, mas a jusante, a partir de um ponto mais a montante, recebem a denominação de modelos vazão-vazão. Os que visam sintetizar o movimento e a disponibilidade de água subterrânea a partir de dados de realimentação, bombeamento e características hidrodinâmicas do aquífero são chamados de modelos de água subterrânea. Existem ainda, os modelos voltados para a modelagem da qualidade de água e os modelos hidrossedimentológicos que simulam o escoamento e a erosão do solo, entre outros. Um modelo hidrossedimentológico será o objeto de estudo desse trabalho.

Segundo Tucci (2006) os modelos utilizados no gerenciamento de recursos hídricos podem ser classificados em modelos de comportamento, de otimização e de planejamento. Os modelos de comportamento criam um prognóstico da resposta de um sistema quando este é submetido a diferentes entradas ou modificações em suas características. Os modelos de otimização têm sua utilização voltada para a obtenção das melhores soluções nos problemas tratados. Finalmente, os modelos de planejamento são voltados para determinar as soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas, sempre considerando também aspectos sócio-econômicos e ambientais.

Vários outros critérios são adotados para a classificação de um modelo, como por exemplo o tipo de variáveis utilizadas na modelagem, as relações existentes entre as variáveis, a forma de apresentação dos dados, as relações espaciais, e finalmente, a dependência temporal existente. Existe uma extensa literatura que trata exhaustivamente das classificações e conceituações dos modelos hidrológicos, sendo que algumas discussões sobre os aspectos ligados à classificação dos modelos podem ser encontradas em Maidment (1993), Vertessy et al (1993) e Tucci (2006).

Analisando as variáveis que compõem o modelo, este pode ser classificado em estocástico ou determinístico. Quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tiver sua probabilidade de ocorrência levada em consideração, ou seja, apresentar um comportamento aleatório, possuindo uma distribuição de probabilidade, trata-se um modelo estocástico. Caso contrário, se a probabilidade de ocorrência das variáveis for ignorada e o modelo seguir uma lei definida que não seja uma lei de probabilidades este será determinístico. Vale salientar que, mesmo que a variável possua um caráter aleatório, mas se para cada valor de entrada o modelo produzir uma única resposta, o mesmo será determinístico.

Os modelos são denominados de empíricos ou conceituais, quando se analisa as relações existentes entre as variáveis. Modelo empírico é aquele no qual os dados calculados são ajustados aos dados observados, através de funções que não representam

explicitamente os processos físicos ocorridos na bacia, podendo nesse sentido apresentar uma característica regionalista. Contrariamente, os modelos conceituais utilizam funções que descrevem os processos físicos, os quais podem conter parâmetros, que geralmente, necessitam de calibração.

De acordo com o intervalo de tempo considerado na simulação os modelos podem ser discretos ou contínuos. Muitas vezes os fenômenos naturais são representados por modelos discretos mesmo apresentando uma variação contínua ao longo do tempo. O fenômeno que será estudado, a disponibilidade dos dados e a precisão requerida nos resultados determinarão o intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado. Muitas vezes quando se almeja uma maior precisão dos resultados, utiliza-se um menor intervalo de tempo, mesmo que isso implique em um maior custo operacional (Rennó, 2000).

Considerando a análise da variabilidade espacial da variável de entrada são ditos como concentrados ou distribuídos. Os modelos ditos concentrados não levam em consideração a variação espacial da bacia, ou seja, as variáveis de entrada e saídas são representativas de toda a área estudada. Os modelos ditos distribuídos levam em consideração a variação espacial das variáveis do modelo, apresentando um grau de detalhamento intrinsecamente relacionado com as informações disponíveis e a precisão desejada para representar a bacia. De acordo com Tucci (2006), na prática não encontramos um modelo puramente distribuído, visto que, sempre realizamos algum tipo de discretização, transformando um modelo dito distribuído em concentrado numa pequena subdivisão da bacia. Para Lacroix (2002) a incorporação da variação espacial das características hidrológicas significativas dentro da bacia será determinada pela discretização realizada.

Finalmente, temos a classificação dos modelos em estáticos ou dinâmicos. O modelo classifica-se em estático quando o mesmo produz para um único conjunto de dados de entrada um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo. Quando os modelos utilizam o resultado de uma interação como entrada para uma próxima interação, são denominados de dinâmicos (Rennó, 2000).

2.5 Escalas Temporais e Espaciais nos Modelos Matemáticos

Pesquisas são realizadas em bacias experimentais que possuem pequenas e médias dimensões. No entanto, em bacias de grandes dimensões há uma carência de dados, o que cria a necessidade de adoção de uma metodologia de transferência de informações de pequenas para grandes bacias. De acordo com Figueiredo (1998) e Lopes (2003) um entrave para esse processo é o efeito que a variação de escala proporciona aos parâmetros do modelo.

Modelos podem simular processos em curtos espaços de tempo e em escala espacial bastante detalhada, no entanto, os resultados podem ser gerados para intervalos

de tempo maiores e escala espacial com menor detalhamento. A generalização espacial dos resultados pode ser conseguida pelo uso do geoprocessamento e dados de sensoriamento remoto (Steyaert, 1993).

Estudos em diferentes escalas podem ser realizados através de uma abordagem estocástica ou determinística de base física. A abordagem estocástica usa funções de distribuição de probabilidades. A abordagem determinística de base física é mais complexa, mas é capaz de capturar as variabilidades da bacia hidrográfica e leva em conta leis fundamentais (conservação da massa). O ideal seria a observação do evento na mesma escala em que ocorrem, derivando a relação que melhor descreveria o fenômeno físico (Pimentel da Silva e Ewen, 2000).

2.6 Modelos Hidrossedimentológicos

A análise da erosão dos solos com base na ação dos processos hidrológicos constitui tema recorrente no setor da modelagem, apresentando uma ampla gama de modelos. Existe uma diversidade de modelos que simulam a hidrologia e os processos erosivos, tais como AGNPS, KINEROS, WEPP, SWAT, entre outros (Christofoletti, 1999).

Os recursos hídricos de uma bacia têm sua conservação dependente de ações tais como, uso adequado do solo, conservação da vegetação, entre outras, tornando necessário o conhecimento do potencial hídrico da bacia e os efeitos das intervenções humanas. Nesse sentido, Braga et al (2002) e Markowitz et al (2003) afirmam que o monitoramento hidrossedimentológico é indispensável para o desenvolvimento dos recursos hídricos dentro de uma base sustentável.

Segundo Aragão (2000) a modelagem da produção de sedimentos é mais complexa do que os outros tipos de modelagem hidrológica, visto que no modelo de erosão existe uma dependência na resposta pelo modelo hidrológico; além do mais, depende das fases que compõem o processo de erosão (desagregação, transporte e sedimentação) e do que acontece em cada elemento da bacia.

No início do século XIX, os EUA deram uma grande atenção ao estudo de erosão do solo e ao desenvolvimento de previsão desse processo; e nas primeiras décadas do século XX, foram implantadas as primeiras parcelas padrão experimentais para a determinação da taxa de erosão do solo sob determinadas condições. Por volta de 1940 começou o desenvolvimento dos modelos para cálculo da perda de solo. (Checchia, 2005).

Um número grande de modelos por ser encontrado na literatura. Lopes (1987) elenca alguns de erosão dividindo-os em classes: a) os modelos baseados na USLE (Universal Soil Loss Equation) ou MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), por exemplo, PTR (Pesticide Transport and Runoff) Crawford e Donigian (1973),

ACTMO (Agricultural Chemical Transport Model) Frere et al.,(1975), ANSWERS (Beasley et al, 1980); b) modelos baseados em processos físicos, citando os trabalhos de Bennett (1974), Simons et al (1975), Smith (1976), Li (1979), Borah et al (1981), Smith et al. (1981) e Alonso e Decoursey (1983).

Nas áreas utilizadas neste trabalho, vários modelos têm sido utilizados para realização de estudos.

Aragão (2000) estudou a relação existente entre os parâmetros do modelo WESP com as características físicas da Bacia Experimental de Sumé (BES) e com as condições físicas do solo; além de avaliar a transferência dos parâmetros calibrados para uma área hidrologicamente semelhante.

Lopes (2003) simulou, comparou e analisou os resultados do escoamento e erosão do solo utilizando os modelos WESP e KINEROS nas sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé, e nas parcelas e microbacias da Bacia Experimental de Sumé (BES); e, estudou o efeito de escala nesses processos.

Cruz (2004) aplicou o modelo WEPP em diferentes escalas de produção (parcelas de 100 m² e microbacias em torno de 5000 m²) nas Bacias Experimentais de São João do Cariri (BESJC) e Sumé (BES) avaliando a variabilidade dos parâmetros do modelo entre as unidades experimentais dessas bacias; e analisando o efeito de escala nos processos (escoamento e erosão) variando de parcelas até a Bacia Representativa de Sumé (BRS).

Davi (2004) concebeu um modelo de base física para simulação hidrossedimentológica em pequena escala (MOFIPE- Modelo Concentrado de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão do Solo em Pequena Escala), contínuo que considera, na sua estrutura, a chuva natural, parâmetros físicos da bacia e as condições de umidade do solo entre os eventos.

Sousa (2007) desenvolveu a partir do MOFIPE (Davi, 2004) um Modelo Distribuído de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão – MODFIPE. Este se diferencia, pois permite simular em bacias heterogêneas, considerando o sistema de drenagem da bacia, discretizado em planos e canais.

Santos (2008) verificou o desempenho dos modelos KINEROS2, WESP e WEPP na modelagem dos processos de chuva, vazão e erosão na Bacia Experimental de São João do Cariri em diferentes escalas para avaliar os efeitos de escala sobre os parâmetros dos modelos.

Paiva (2008) realizou um estudo comparativo entre os modelos WESP, Kineros2 e WEPP aplicados a áreas experimentais de diferentes escalas de produção, utilizando

dados de vazão e erosão de duas áreas hidrologicamente semelhantes, a Bacia Experimental de Sumé (BES) e a Bacia Experimental de São João do Cariri.

Tais estudos trouxeram significativas contribuições para o entendimento dos processos de escoamento e erosão do solo em regiões semi-áridas. Entretanto, é importante que os modelos sejam capazes de simular o escoamento e a erosão do solo de maneira distribuída com base nos parâmetros físicos, e que simule os efeitos da variabilidade dos fatores climáticos (e.g. chuva) e uso do solo (e.g., desmatamento) sobre os processos. O presente trabalho com o modelo MOSEE, aborda essas questões, através da realização e simulação dos processos de forma contínua.

III - MODELO DISTRIBUÍDO MOSEE

3.1 Descrição Sumária do Modelo

O modelo MOSEE - Modelo de Simulação do Escoamento e Erosão do Solo (Figueiredo, 2009) é uma versão avançada do modelo MOFIPE- Modelo de Base Física para Simulação Hidrossedimentológica em Pequena Escala (Figueiredo e Davi, 2006), tendo sido codificado em Fortran G77.

A primeira versão do modelo foi desenvolvida para simulação do escoamento e erosão em pequenas escalas, no qual a bacia pode ser considerada homogênea, precipitação espacialmente uniforme e sistema de canais insignificantes. A versão atual do modelo leva em conta a distribuição espacial das precipitações, simula o escoamento em escala de bacia hidrográfica dividida em sub-bacias (ver Figura 3.1). Considera a interceptação vegetal, a evapotranspiração e o fluxo vertical e horizontal no interior do solo, no processo de geração e propagação do escoamento e na erosão do solo. Os parâmetros das manchas horizontais de solo e do perfil vertical do solo, limitado a três camadas, são estabelecidos com base na textura do solo.

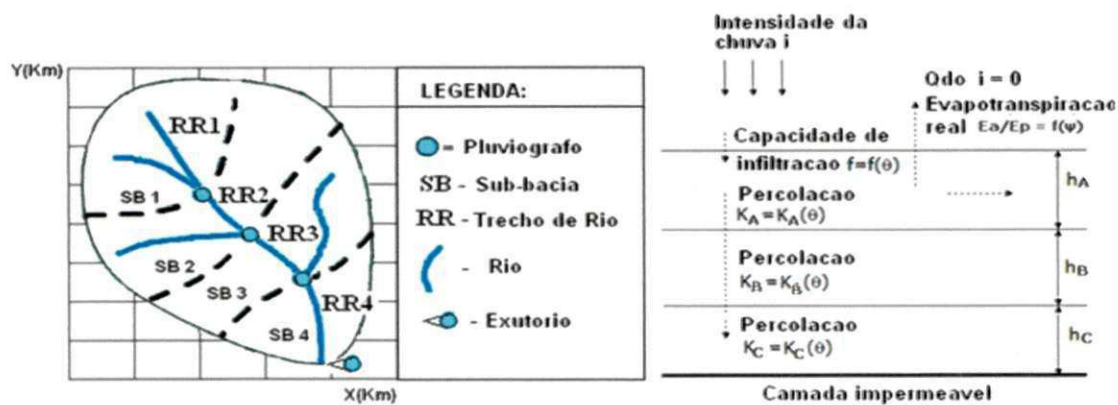


Figura 3.1- Estrutura da bacia e representação do perfil de solo no modelo

Considera-se que a precipitação seja variável espacialmente (mas uniforme em cada sub-bacia); a interceptação é função do tipo de vegetação, a evapotranspiração ocorre apenas entre eventos de precipitação (durante um evento de precipitação o ar está saturado, não ocorrendo evapotranspiração); o escoamento superficial é gerado quando a intensidade da precipitação é maior do que a capacidade de infiltração do solo, quando a camada superficial do solo está saturada, ou em ambas as situações. Foram introduzidas no modelo diferentes metodologias (e.g., Saxton et al., 1986) com base na textura do solo para sua parametrização. A erosão do solo devido à precipitação (impacto das gotas de chuva) ao escoamento (tensão de cisalhamento do fluxo) ou ambos, e o transporte dos sedimentos se baseia na capacidade de transporte pelo fluxo, que é modelado por diferentes métodos presentes na literatura (e.g., Engelund & Hansen, 1967). A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do modelo.

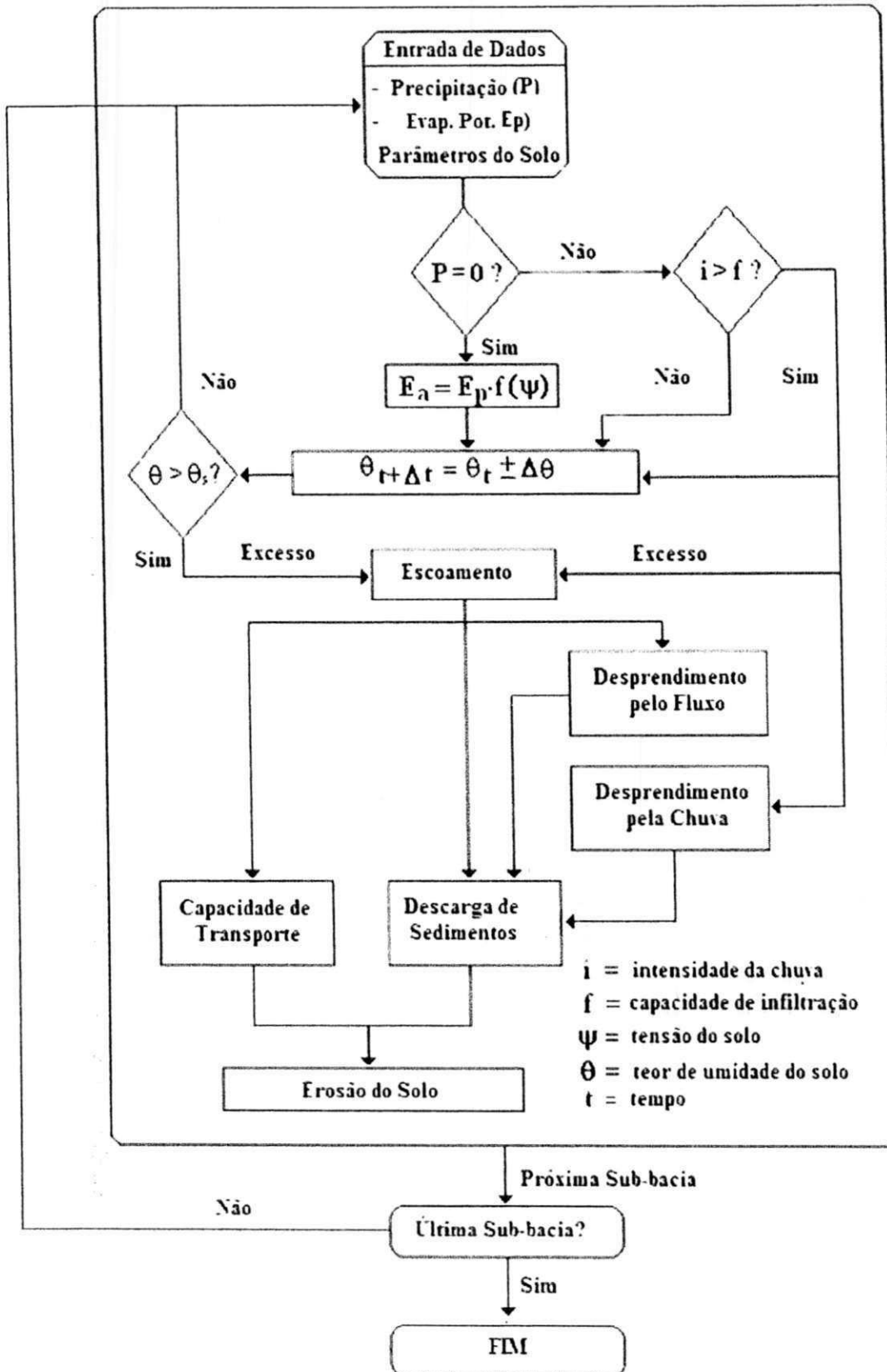


Figura 3.2 – Fluxograma do modelo (adaptado de Figueiredo , 2009)

3.2 Componentes do Modelo e Processos

O modelo MOSEE possui duas componentes básicas:

- Uma componente de Fluxo onde são simulados os processos de precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, escoamento sub-superficial, escoamento subterrâneo e propagação do escoamento.

- Uma Componente de Erosão onde são simulados os processos de erosão pela chuva, erosão pelo escoamento, capacidade de transporte pelo fluxo, transporte e deposição de sedimentos.

3.3 Componente de Fluxo

3.3.1 Precipitação e Interceptação

A componente de fluxo tem como entrada na bacia hidrográfica as intensidades das precipitações, as quais são calculadas com as alturas de chuva (P_i) e os intervalos de tempo correspondentes Δt_i (min) conforme a mudança de intensidade da chuva. As alturas das chuvas também podem ser determinadas de modo a considerar um intervalo de tempo fino (e.g. 1 minuto) mantendo-se a intensidade constante dentro do intervalo total (Figura 3.3), sendo depois inseridas no arquivo de dados de chuva. Para considerar a variabilidade espacial da precipitação na bacia, um pluviógrafo é atribuído para cada sub-bacia.

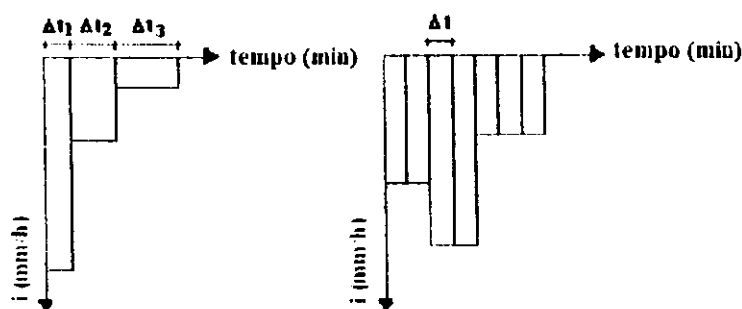


Figura 3.3- Representação da intensidade da precipitação


Para a interceptação, valores típicos de altura de interceptação podem ser informados conforme seja os tipos de vegetação na bacia. Segundo Horton (1919) a altura de interceptação varia de 0,5 a 5 mm, dependendo do tipo de vegetação e da altura de precipitação. Valores típicos de altura de interceptação para diferentes tipos de vegetação tropical podem ser encontrados em Jetten (1996). Figueiredo (1998) e Medeiros et al (2009) através de modelagem, obtiveram a capacidade de armazenamento da folhagem em áreas semiáridas da ordem de 0,5 mm. Além da altura de interceptação, dois parâmetros consideram a distribuição da cobertura em cada sub-bacia: C_g que representa a proporção de vegetação ($0 < C_g < 1$) e C_r que representa a proporção de rochas que afloram à superfície ($0 < C_r < 1$) (Figura 3.4).

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E EROSÃO SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE CHUVA E USO DO SOLO EM
BACIAS DO CARIRI PARAÍBANO COM O MODELO
DISTRIBUÍDO MOSEE**

ZACARIAS CAETANO VIEIRA

APROVADA EM 24/02/2011

PELA SEGUINTE COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Eduardo Eneas de Figueiredo (UAEC/CTRN/UFCG – Campus I)

Presidente – Orientador



Prof. Dayse Luna Barbosa (UAEC/CTRN/UFCG – Campus I)

Examinador Interno



Prof. Ricardo de Aragão (DEC/CCET/UFS – Campus I)

Examinador Externo

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2011

“Ontem um menino que brincava me falou
Ele é semente do amanhã
Para não ter medo que este tempo vai passar
Não se desespere e nem pare de sonhar
Nunca se entregue, nasça sempre com as manhãs
Deixe a luz do sol brilhar no céu do seu olhar
Fé na vida, fé no homem, fé no que virá
Vamos lá fazer o que será”

DEDICATÓRIA

Aos meus pais adotivos, Sandoval Vieira Carneiro e Laura Carneiro de Andrade, aos meus pais biológicos José Caetano Irmão e Araci Vieira Carneiro (in memoriam) e a todos os meus irmãos, sobrinhos e demais familiares pelo imenso, verdadeiro e essencial carinho que sempre me dedicaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais adotivos, Sandoval Vieira Carneiro e Laura Carneiro de Andrade, pelo carinho que sempre me ofertaram.

Aos meus pais biológicos José Caetano Irmão e Araci Vieira Carneiro (in memoriam) pelo exemplo de honradez e decência.

Aos meus irmãos adotivos, Raimundo Vieira de Andrade, Maria Vieira de Andrade Carneiro, Luiza Vieira Carneiro, Luiz Vieira Carneiro, Zulmira Vieira Carneiro e Geralda Vieira Carneiro (in memoriam) e seus familiares.

Aos meus irmãos biológicos, Maria Vieira de Andrade, Raimundo Caetano Vieira, Iraci Vieira de Andrade, Francisca Fernandes Carneiro Neta, Pedro Caetano Vieira, Terezinha Vieira de Andrade, Josefa Vieira de Andrade, Bernadina Vieira de Andrade, João Caetano da Silva Neto, Edinete Vieira de Andrade, e seus familiares.

Aos amigos Benedito Vieira Carneiro, Expedita Basílio Carneiro, Edilson Araújo Dantas, Maria Clara Carneiro, Maria José das Chagas Sousa, Expedito Fernandes de Sousa, Lucas Gonzaga de Oliveira, Helisson dos Santos Sousa, Maria Railma Vieira de Freitas, Jeane Karla Mota, José Guimarães de Carvalho Neto, Rafael Fernandes de Andrade, e todos os demais que não foram citados, pelo apoio, incentivo, e por proporcionar momentos de alegria e diversão.

Ao professor e orientador Eduardo Enéas de Figueiredo pelo apoio, paciência e dedicação com que me orientou no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, Gledseli Maria de Lima Lins, Carlos de Oliveira Galvão, Márcia Maria Rios Ribeiro, Janiro da Costa Rêgo, Wilson Fadlo Curi, Rosires Fadlo Curi, Iana Alexandra Alves Rufino, Dayse Luna Barbosa, e aos demais professores que me transmitiram seus conhecimentos no decorrer desses dois anos.

Ao professor Ricardo de Aragão por sua prestatividade e pelo fornecimento de dados e informações relevantes ao desenvolvimento desse trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Vera Lucia Alves Rodrigues, Alrezinha Dantas Veiga, Ismael José Pereira, Haroldo Pereira Santos, Raulino Farias de Brito, Lindimar Dantas Leite e demais funcionários da UAEC.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS DOS CAPÍTULOS

Figura 3.1 - Estrutura da bacia e representação do perfil de solo.....	16
Figura 3.2 - Fluxograma do modelo.....	17
Figura 3.3 - Representação da intensidade da precipitação.....	18
Figura 3.4 - Representação das proporções de cobertura vegetal e de rochas.....	19
Figura 3.5 - Representação da evapotranspiração do solo.....	19
Figura 3.6 - Relação entre evapotranspiração e tensão no solo.....	20
Figura 3.7 - Representação do escoamento sub-superficial.....	25
Figura 3.8 - Representação do escoamento de base.....	25
Figura 4.1 - Localização da BRS no Estado da Paraíba (divisão por Bacias Hidrográficas).....	29
Figura 4.2 - Área hidrologicamente homogênea no Nordeste.....	29
Figura 4.3 - Mapa de Solos da Bacia Representativa de Sumé.....	30
Figura 4.4 - Mapa de Relevo (em metros) da Bacia Bepresentativa de Sumé	30
Figura 4.5 - Visão Tridimensional da Microbacia M1 da BES.....	32
Figura 4.6 - Visão Tridimensional da Microbacia M2 da BES.....	32
Figura 4.7 - Visão Tridimensional da Microbacia M3 da BES.....	33
Figura 4.8 - Visão Tridimensional da Microbacia M4 da BES.....	33
Figura 4.9 - Bacia Representativa de Sumé, sub-bacias e hidrografia.....	34
Figura 4.10 - Localização da Bacia Escola de São João do Cariri.....	35
Figura 4.11 - Delimitação da microbacia M1 da BESJC.....	37
Figura 4.12 - Delimitação das microbacias M2 e M3 da BESJC.....	37
Figura 4.13 - Bacia do Riacho Namorados (BRN) e suas sub-bacias.....	39
Figura 4.14 - Sub-bacias 1 e 2 da BRN.....	40

Figura 5.1- Curva de Capacidade de Infiltração da BRS.....	41
Figura 5.2 - Granulometria do Solo Erodido na Microbacia 3 da BRS.....	42
Figura 5.3 - Granulometria do Solo Erodido nas Microbacias da BESJC Cheia 82 (12/02/2002).....	47
Figura 5.4 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986).....	48
Figura 5.5 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986).....	48
Figura 5.6 - Erosão Observada e Simulada - M3 (1986).....	49
Figura 5.7 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1986).....	49
Figura 5.8 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984).....	50
Figura 5.9 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984).....	50
Figura 5.10 - Produção de Sedimentos Observada e Simulada - M4 (1984).....	50
Figura 5.11 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1984).....	51
Figura 5.12 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985).....	51
Figura 5.13 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985).....	51
Figura 5.14 - Erosão Observada e Simulada - M4(1985).....	52
Figura 5.15 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1985).....	52
Figura 5.16 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M4 (BES).....	63
Figura 5.17 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M4(BES).....	63
Figura 5.18 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M3 (BES).....	64
Figura 5.19 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M3(BES).....	64
Figura 5.20 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BESJC).....	65

Figura 5.21 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BESJC).....	66
Figura 5.22 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC).....	66
Figura 5.23 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC).....	67
Figura 5.24 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC).....	67
Figura 5.25 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC).....	68
Figura 5.26 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC).....	68
Figura 5.27 - Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC).....	69
Figura 5.28 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES).....	70
Figura 5.29 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES).....	70
Figura 5.30 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M3(BES).....	71
Figura 5.31 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M3(BES).....	71
Figura 5.32 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC).....	72
Figura 5.33 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC).....	72
Figura 5.34 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC).....	73
Figura 5.35 - Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(médio)}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC).....	73
Figura 5.36 - Hidrogramas diários observados e simulados – Gangorra(1977).....	74

Figura 5.37 - Hidrogramas diários observados e simulados – Jatobá(1977)	74
Figura 5.38 - Hidrogramas diários observados e simulados – Umburana(1977).....	75
Figura 5.39 - Hidrogramas diários observados e simulados – Gangorra (1977).....	75
Figura 5.40 - Hidrogramas diários observados e simulados – Jatobá (1977).....	76
Figura 5.41 - Hidrogramas diários observados e simulados – Umburana (1977).....	76
Figura 5.42 - Efeito do Desmatamento na Geração do Escoamento(BES).....	78
Figura 5.43 - Efeito do Reflorestamento na Geração do Escoamento (BES).....	79
Figura 5.44 - Efeito do Desmatamento na Produção de Sedimentos (BES).....	79
Figura 5.45 - Efeito do Reflorestamento na Produção de Sedimentos (BES).....	79
Figura 5.46 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.47 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.48 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Figura 5.49 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.50 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.51 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	82
Figura 5.52 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2006.....	83
Figura 5.53 - Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2006.....	83
Figura 5.54 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2004.....	83
Figura 5.55 - Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2004.....	84

LISTA DAS FIGURAS DO ANEXO

Figura A.1 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1986) – BES.....	98
Figura A.2 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas M1(1986) – BES.....	98
Figura A.3 - Erosão Observada e Simulada - M1 (1986) - BES.....	98
Figura A.4 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1986) – BES.....	98
Figura A.5 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1986) – BES.....	99
Figura A.6 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas – M2 (1986) - BES.....	99
Figura A.7 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1986) – BES.....	99
Figura A.8 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1986) - BES.....	99
Figura A.9 - Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) – BES.....	100
Figura A.10 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.11 - Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.12 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) - BES.....	100
Figura A.13 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.14 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.15 - Erosão Observada e Simulada - M1 (1984)- BES.....	101
Figura A.16 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1984) – BES.....	101
Figura A.17 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) - BES.....	102
Figura A.18 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) – BES.....	102

Figura A.19 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) –BES.....	102
Figura A.20 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) – BES.....	102
Figura A.21 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.22 - Comparação das Lâminas Observadas e Simulada - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.23 - Erosão Observada e Simulada em M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.24 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1984) – BES.....	103
Figura A.25 - Lâminas Observadas e Simulada - M1 (1985) –BES.....	104
Figura A.26 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1985) –BES.....	104
Figura A.27 - Erosão Observada e Simulada- M1 (1985) – BES.....	104
Figura A28.- Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1985) – BES.....	104
Figura A.29 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.30 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.31 - Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.32 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES.....	105
Figura A.33 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1985) – BES.....	106
Figura A.34 - Comparação das Lâminas Observadas e Smuladas - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.35 - Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.36 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES.....	106
Figura A.37 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC.....	107

Figura A.38 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC.....	107
Figura A.39 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC.....	107
Figura A.40 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC.....	107
Figura A.41 - Lâminas Observadas e Simuladas em M3(2002) – BESJC.....	108
Figura A.42 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2002) – BESJC.....	108
Figura A.43 - Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC.....	108
Figura A.44 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC.....	108
Figura A.45 - Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.46 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.47 - Erosão Observada e Simulada - M3 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.48 - Comparação da Erosão Observada e Simulada em M3 (2002) – BESJC.....	109
Figura A.49 - Lâminas Observadas e Simuladas em M1(2003) - BESJC.....	110
Figura A.50 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2003) - BESJC.....	110
Figura A.51 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) - BESJC.....	110
Figura A.52 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) - BESJC.....	110
Figura A.53 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC.....	111
Figura A.54 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC.....	111
Figura A.55 - Erosão Observada e Simulada - M1(2003) – BESJC.....	111

Figura A.56 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1(2003) – BESJC.....	111
Figura A.57 - Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC.....	112
Figura A.58 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC.....	112
Figura A.59 - Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC.....	112
Figura A.60 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC.....	112
Figura A.61 - Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.62 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.63 - Lâminas Observadas e Simuladas em M2 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.64 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (2004) – BESJC.....	113
Figura A.65 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.66 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.67 - Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.68 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC.....	114
Figura A.69 - Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.70 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.71 - Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.72 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC.....	115
Figura A.73 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 1984 (BES).....	116

Figura A.74 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1984 (BES).....	116
Figura A.75 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1984 (BES).....	116
Figura A.76 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M4 – 1984 (BES).....	116
Figura A.77 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 1985 (BES).....	117
Figura A.78 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1985 (BES).....	117
Figura A.79 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1985 (BES).....	117
Figura A.80 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M4 – 1985 (BES).....	117
Figura A.81 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -M1 – 1986 (BES).....	118
Figura A.82 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 1986 (BES).....	118
Figura A.83 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 1986 (BES).....	118
Figura A.84 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M4 – 1986 (BES).....	118
Figura A.85 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.86 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.87 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2002 (BESJC).....	119
Figura A.88 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 2003 (BESJC).....	119

Figura A.89 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2003 (BESJC).....	120
Figura A.90 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2003 (BESJC).....	120
Figura A.91 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 – 2004 (BESJC).....	120
Figura A.92 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2004 (BESJC).....	120
Figura A.93 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.94 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.95 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual -SB2 – 2004 (BESJC).....	121
Figura A.96 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 – 2005 (BESJC).....	121
Figura A.97 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB2 – 2005 (BESJC).....	122
Figura A.98 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual SB1 – 2006 (BESJC).....	122
Figura A.99 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual SB2 – 2006 (BESJC).....	122
Figura A.100 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 – 1984 (BES).....	122
Figura A.101 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 – 1984 (BES).....	123
Figura A.102 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 – 1984 (BES).....	123
Figura A.103 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1984 (BES).....	123

Figura A.104 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 1985 (BES).....	123
Figura A.105 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 1985 (BES).....	124
Figura A.106 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 1985 (BES).....	124
Figura A.107 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1985 (BES).....	124
Figura A.108 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 1986 (BES).....	124
Figura A.109 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 1986 (BES).....	125
Figura A.110 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 1986 (BES).....	125
Figura A.111 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M4 – 1986 (BES).....	125
Figura A.112 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2002 (BESJC).....	125
Figura A.113 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2002 (BESJC).....	126
Figura A.114 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2002 (BESJC).....	126
Figura A.115 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2003 (BESJC).....	126
Figura A.116 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2003 (BESJC).....	126
Figura A.117 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2003 (BESJC).....	127
Figura A.118 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M1 – 2004 (BESJC).....	127
Figura A.119 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M2 – 2004 (BESJC).....	127

Figura A.120 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico M3 – 2004 (BESJC).....	127
Figura A.121 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2004 (BESJC).....	128
Figura A.122 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2004 (BESJC).....	128
Figura A.123 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2005 (BESJC).....	128
Figura A.124 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2005 (BESJC).....	128
Figura A.125 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB1 – 2006 (BESJC).....	129
Figura A.126 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico SB2 – 2006 (BESJC).....	129
Figura A.127 – Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1984 (BES).....	129
Figura A.128 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1984 (BES).....	129
Figura A.129 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1984 (BES).....	130
Figura A.130 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1984 (BES).....	130
Figura A.131 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1985 (BES).....	130
Figura A.132 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1985 (BES).....	130
Figura A.133 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1985 (BES).....	131
Figura A.134 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1985 (BES).....	131

Figura A.135 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1986 (BES).....	131
Figura A.136 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1986 (BES).....	131
Figura A.137 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1986 (BES).....	132
Figura A.138 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 1986 (BES).....	132
Figura A.139 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2002 (BESJC).....	132
Figura A.140 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2002 (BESJC).....	132
Figura A.141 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2002 (BESJC).....	133
Figura A.142 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.143 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.144 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2003 (BESJC).....	133
Figura A.145 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.146 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.147 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2004 (BESJC).....	134
Figura A.148 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1- 1984 (BES).....	134
Figura A.149 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2- 1984 (BES).....	135
Figura A.150 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1984 (BES).....	135

Figura A.151 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1984 (BES).....	135
Figura A.152 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1985 (BES).....	135
Figura A.153 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1985 (BES).....	136
Figura A.154 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1985 (BES).....	136
Figura A.155 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1985 (BES).....	136
Figura A.156 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1986 (BES).....	136
Figura A.157 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1986 (BES).....	137
Figura A.158 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1986 (BES).....	137
Figura A.159 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1986 (BES).....	137
Figura A.160 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2002 (BESJC).....	137
Figura A.161 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2002 (BESJC).....	138
Figura A.162 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2002 (BESJC).....	138
Figura A.163 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2003 (BESJC).....	138
Figura A.164 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2003 (BESJC).....	138
Figura A.165 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2003 (BESJC).....	139

Figura A.166 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.167 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.168 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2004 (BESJC).....	139
Figura A.169 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BES).....	140
Figura A.170 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BES).....	140
Figura A.171 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BES).....	140
Figura A.172 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M1 (BES).....	140
Figura A.173 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M2 (BES).....	141
Figura A.174 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M4 (BES).....	141
Figura A.175 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BESJC).....	141
Figura A.176 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BESJC).....	141
Figura A.177 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico – M2 (BESJC).....	142
Figura A.178 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico – M3 (BESJC).....	142
Figura A.179 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na lâmina anual – SB1 (BESJC).....	142
Figura A.180 - Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado no pico - SB1- (BESJC).....	142

Figura A.181 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BES).....	143
Figura A.182 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M2(BES).....	143
Figura A.183 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M4(BES).....	143
Figura A.184 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M1(BES).....	143
Figura A.185 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M2 (BES).....	144
Figura A.186 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M4(BES).....	144
Figura A.187 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M2(BESJC).....	144
Figura A.188 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BESJC).....	144
Figura A.189 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M2(BESJC).....	145
Figura A.190 - Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M3(BESJC).....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tamanhos e denominações das partículas de sedimento.....	9
Tabela 4.1 - Características das microbacias.....	31
Tabela 4.2 - Características da BRS.....	34
Tabela 4.3 - Características das microbacias da BESJC.....	36
Tabela 5.1 - Declividade média da bacia, declividade e comprimento dos rios.....	45
Tabela 5.2 - Textura do solo das microbacias (BESJC).....	46
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados da modelagem (ano de 1986) – BES.....	47
Tabela 5.4 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) – BES.....	48
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados da validação (ano de 1984) – BES.....	52
Tabela 5.6 - Resumo dos resultados da validação (ano de 1985) – BES.....	53
Tabela 5.7 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) – BESJC.....	53
Tabela 5.8 - Resultados sem calibração (ano de 2002) – BESJC.....	53
Tabela 5.9 - Resultados sem calibração (ano de 2003) – BESJC.....	53
Tabela 5.10 - Resultados sem calibração (ano de 2004) – BESJC.....	53
Tabela 5.11 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1984 (BES).....	54
Tabela 5.12 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1985 (BES).....	54
Tabela 5.13 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1986 (BES).....	55
Tabela 5.14 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2002 (BESJC).....	55
Tabela 5.15 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2003 (BESJC).....	55
Tabela 5.16 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC).....	55

Tabela 5.17 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC).....	56
Tabela 5.18 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2005 (BESJC).....	56
Tabela 5.19 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2006 (BESJC).....	56
Tabela 5.20 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1984 (BES).....	56
Tabela 5.21 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1985 (BES).....	57
Tabela 5.22 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1986 (BES).....	57
Tabela 5.23 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2002 (BESJC).....	57
Tabela 5.24 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2003 (BESJC).....	57
Tabela 5.25 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC).....	58
Tabela 5.26 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC).....	58
Tabela 5.27 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2005 (BESJC).....	58
Tabela 5.28 - Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2006 (BESJC).....	58
Tabela 5.29 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1984 (BES).....	59
Tabela 5.30 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1985 (BES).....	59
Tabela 5.31 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1986 (BES).....	59
Tabela 5.32 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2002 (BESJC).....	60
Tabela 5.33 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2003 (BESJC).....	60
Tabela 5.34 - Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2004 (BESJC).....	60
Tabela 5.35 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1984 (BES).....	61
Tabela 5.36 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1985 (BES).....	61
Tabela 5.37 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1986 (BES).....	61

Tabela 5.38 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2002 (BESJC).....	61
Tabela 5.39 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2003 (BESJC).....	62
Tabela 5.40 - Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2004 (BESJC).....	62
Tabela 5.41 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 1984 a 1986 (BES).....	63
Tabela 5.42 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.41).....	63
Tabela 5.43 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 1984 a 1986 (BES).....	64
Tabela 5.44 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.43).....	64
Tabela 5.45 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC).....	65
Tabela 5.46 - Resultados obtidos usando parâmetros médios da Tabela 5.45.....	65
Tabela 5.47 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC).....	66
Tabela 5.48 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.47).....	66
Tabela 5.49 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2004 a 2006 (BESJC).....	67
Tabela 5.50 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.49).....	67
Tabela 5.51 - Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2004 a 2006 (BESJC).....	68
Tabela 5.52 - Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.51).....	68
Tabela 5.53 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 1984 a 1986 (BES).....	69
Tabela 5.54 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.53).....	69
Tabela 5.55 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 1984 a 1986 (BES).....	70
Tabela 5.56 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.55).....	70

Tabela 5.57 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 2002 a 2004 (BES).....	71
Tabela 5.58 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.57).....	71
Tabela 5.59 - Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 2002 a 2004 (BES).....	72
Tabela 5.60 - Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.59).....	72
Tabela 5.61 - Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M1.....	77
Tabela 5.62 - Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M2.....	78
Tabela 5.63 - Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M3.....	78
Tabela 5.64 - Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M4.....	78
Tabela 5.65 - Resultados Anuais para as condições, vegetadas e não vegetada, das bacias hidrográficas.....	79
Tabela 5.66 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002.....	80
Tabela 5.67 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002.....	80
Tabela 5.68 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002.....	81
Tabela 5.69 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 e SB2 (BESJC) – ano de 2006.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

%C – percentagem de argila

%S – percentagem de areia

ϕ - porosidade do solo (m^3/m^3)

θ - umidade volumétrica do solo (m^3/m^3)

ψ_{10} – tensão de entrada de ar no solo (kPa)

Δt - intervalo de tempo

α e b são coeficientes da expressão que calcula a tensão crítica do sedimentos (-)

A, B – parâmetros da equação de Saxton et al (1986)

A_b - área da bacia, (km^2)

$C = \Delta t/t_c$ - coeficiente de propagação do escoamento (-)

C - parâmetro da expressão potencial para cálculo da capacidade de infiltração (mm/h)

C_1 , C_2 e C_3 - coeficientes de Muskingum (-)

C_g e C_r - proporções de cobertura do solo pela vegetação e rochas

C_S - concentração de sedimentos disponível para transporte

C_t - concentração de sedimentos na capacidade de transporte (m^3/m^3)

d - diâmetro do sedimento (m)

d - diâmetro da gota que cai da vegetação (m)

D- expoente da expressão potencial para cálculo da capacidade de infiltração (-)

D_{50} - diâmetro mediano do sedimento (m)

D_r - desprendimento de solo pelo escoamento ($kg/m^2.s$)

d_m - diâmetro representativo da gota de chuva (m)

D_r - erosão pelo impacto da chuva ($kg/m^2.s$)

D_{rg} - drenagem da cobertura vegetal (mm/h)

D_s - densidade do solo

E_a - evapotranspiração real (mm)

E_p - evapotranspiração (mm)

f - capacidade de infiltração média do solo (mm/h)

f_0, f_c - capacidade de infiltração inicial e final na equação exponencial (mm/h)

f_{ar} - fator de aprisionamento de ar

F_w - fator de redução da erosão pelo incremento da lâmina do escoamento

g - aceleração da gravidade ($9,806 \text{ m/s}^2$)

h - profundidade do fluxo (m)

$h(\theta)$ - lâmina correspondente a umidade θ ($\theta > \theta_{cc}$)

h_A, h_B, h_C - espessura das camadas A, B e C (cm)

h_c é a profundidade de fluxo no canal (m)

h_{gw} - carga freática (m)

h_r - carga do rio (m)

I - escoamento total no trecho de rio (l/s)

i - intensidade da chuva (mm/h)

I_b - escoamento de base (l/s)

I_s - escoamento superficial de entrada no trecho do rio (l/s)

I_{sb} - escoamento sub-superficial (l/s)

$I_{t+\Delta t}$ - escoamento atual na entrada do trecho do rio (l/s)

K - tempo de translação do hidrograma (min)

k - parâmetro de recessão da expressão para cálculo da capacidade de infiltração (-)

$K(\theta)$ - condutividade hidráulica em função do teor de umidade do solo (mm/h)

K_A, K_B e K_C - condutividade hidráulica das camadas A, B e C (mm/h)

K_f - coeficiente de erosividade do fluxo ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

K_m - menor condutividade hidráulica entre camadas adjacentes (mm/h)

K_r - coeficiente de erosividade da chuva ($s^2/kg.m^2$)

K_s - condutividade hidráulica saturada (mm/h)

L - extensão do trecho de rio (km)

L_d - proporção da drenagem (D_{rg}) que cai das folhas

M/β e Y - termos da expressão para cálculo da velocidade das gotas que caem da vegetação

M_d - momento quadrado da gota de chuva que cai da vegetação [$(kg.m/s)^2 m^{-2}s^{-1}$]

M_r - momento quadrado da chuva por unidade de área e de tempo [$(kg.m/s)^2 m^{-2}s^{-1}$]

n - rugosidade do trecho do rio

P_i - alturas de chuva (mm)

q - fluxo vertical por unidade de área ($cm^3/s/cm^2$)

Q_t - escoamento no trecho de rio (l/s)

$Q_{t+\Delta t}$ - escoamento atual na saída do trecho do rio (l/s)

R^* - número de Reynolds da partícula

S - declividade do trecho de rio (m/m)

S - declividade da bacia (m/m)

S_e - saturação relativa (-)

S_s - densidade do sedimento, igual a 2,65

t - tempo

t_c - tempo de concentração do trecho de rio (min)

u - velocidade média do fluxo (m/s)

V - velocidade das gotas que caem da vegetação

X - fator de forma da equação de Muskingum

z - distância vertical a partir da superfície

α - um fator local da equação (3.1)

α e β - parâmetros da equação do momento quadrado da chuva

γ - peso específico da água (9806 N/m³)

η - expoente da saturação relativa

$\theta_{A(t+\Delta t)} - \theta_{A(t)}$ - variação do teor de umidade na camada A no tempo (m³/m³)

$\theta_{Amin}, \theta_{Bmin}$ - teor mínimo de umidade das camadas A e B, que permite que haja percolação entre as camadas

$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)}$ - variação do teor de umidade na camada B no tempo (m³/m³)

$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)}$ - variação do teor de umidade na camada C no tempo (m³/m³)

θ_{cc} - umidade da capacidade de campo (m³/m³)

θ_{fc} - umidade volumétrica na capacidade de campo (m³/m³)

θ_r - umidade residual (m³/m³)

θ_s - umidade de saturação (m³/m³)

$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t \pm \Delta\theta$ - umidade atual da camada de solo (m³/m³)

θ_{wp} - umidade volumétrica no ponto de murcha (m³/m³)

ν - viscosidade cinemática do fluido (8,94 x 10⁻⁷ N.s/m²)

ρ - massa específica da água (1000 kg/m³)

ρ_s - massa específica do sedimento (2650 kg/m³)

τ e τ_c - tensões de cisalhamento do fluxo e crítica do sedimento

ψ - tensão do solo (kPa)

SUMÁRIO

Dedicatória	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de Figuras dos Capítulos.....	iv
Lista de Figuras do Anexo.....	viii
Lista de Tabelas.....	xx
Lista de Símbolos.....	xxiv
Sumário.....	xxviii
Resumo	xxxii
Abstract.....	xxxiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problemática.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Estrutura da Dissertação.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Escoamento Superficial.....	4
2.2 Erosão do Solo e Produção de Sedimentos.....	4
2.2.1 Erosão nos Planos.....	5
2.2.2 Erosão nos Canais.....	6
2.2.3 Estimativa da Erosão.....	6
2.3 Transporte e Deposição de Sedimentos.....	6
2.3.1 Carga Dissolvida, Carga no Leito, Carga em Suspensão e Carga Total.....	7
2.3.2 Propriedades dos Sedimentos.....	8
2.4 Modelos Hidrológicos.....	10
2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos.....	11
2.5 Escalas Temporais e Espaciais nos Modelos Matemáticos.....	12
2.6 Modelos Hidrossedimentológicos.....	13
3 MODELO DISTRIBUÍDO MOSEE.....	16
3.1 Descrição Sumária do Modelo.....	16

3.2 Componentes do Modelo e Processos.....	18
3.3 Componente de Fluxo.....	18
3.3.1 Precipitação e Intercepção.....	18
3.3.2 Evapotranspiração.....	19
3.3.3 Infiltração.....	20
3.3.4 Percolação.....	21
3.3.4.1 Tensão no solo.....	21
3.3.4.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada.....	23
3.3.4.3 Condutividade Hidráulica Saturada.....	23
3.3.4.4 Teor de Umidade dos Solos.....	24
3.3.5 Escoamentos Superficial, Sub-Superficial e Subterrâneo.....	24
3.3.6 Propagação do Escoamento.....	26
3.4 Componente de Erosão do Solo.....	26
3.4.1 Erosão pela Chuva.....	26
3.4.2 Erosão pelo Escoamento.....	27
3.4.3 Carga Total de Sedimento Disponível para Transporte.....	27
3.4.4 Capacidade de Transporte de Sedimentos pelo Fluxo.....	27
4 ÁREA DE ESTUDO E DADOS OBSERVADOS.....	29
4.1 Bacia Experimental e Representativa de Sumé (BES e BRS).....	29
4.1.1 Localização.....	29
4.1.2 Características Físico-Climáticas.....	30
4.1.3 As Unidades Experimentais.....	31
4.1.3.1 Microbacias.....	31
4.1.3.2 Bacia Representativa de Sumé.....	34
4.2 Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC).....	35
4.2.1 Localização.....	35
4.2.2 Características Físico-Climáticas.....	35
4.2.3 As Unidades Experimentais da BESJC.....	36
4.2.3.1 Microbacias.....	36
4.2.3.2 Sub-bacias.....	38
4.3 Dados Disponíveis e Utilizados.....	40
5 MODELAGEM E RESULTADOS.....	41
5.1 Bacia Experimental de Sumé.....	41
5.1.1 Modelagem do Escoamento.....	41
5.1.2 Modelagem da Erosão do Solo.....	42
5.2 Bacia Representativa de Sumé (BRS).....	43
5.2.1 Parâmetros da bacia de Gangorra (BRS).....	43
5.2.2 Parâmetros da bacia de Jatobá.....	44
5.2.3 Parâmetros da bacia de Umburana.....	44
5.3 Bacia Experimental de São João do Cariri.....	45
5.3.1 Modelagem do Escoamento.....	45

5.3.2	Modelagem da Erosão do solo.....	46
5.4	Calibração e Validação.....	47
5.5	Calibração do Coeficiente de Propagação do Escoamento.....	54
5.5.1	Calibração de C para ajuste da Lâmina Anual – BES (Microbacias).....	54
5.5.2	Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Microbacias).....	55
5.5.3	Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Sub-bacias).....	55
5.5.4	Calibração de C para ajuste dos Picos – BES (Microbacias).....	56
5.5.5	Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Microbacias).....	57
5.5.6	Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Sub-bacias).....	58
5.6	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva.....	58
5.6.1	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BES (Microbacias).....	59
5.6.2	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BESJC (Microbacias).....	60
5.6.3	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BES (Microbacias).....	60
5.6.4	Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BESJC (Microbacias).....	61
5.7	Simulação dos Processos de Escoamento e Erosão com parâmetros médios.....	62
5.7.1	Simulação do Escoamento com $C_{\text{médio}}$ (BES).....	62
5.7.2	Simulação do Escoamento com $C_{\text{médio}}$ - Microbacias (BESJC).....	65
5.7.3	Simulação do Escoamento com $C_{\text{médio}}$ - Sub-bacias (BESJC).....	67
5.7.4	Simulação da Produção de Sedimentos com $Kr_{(\text{médio})}$ (BES).....	69
5.7.5	Simulação da Produção de Sedimentos com $Kr_{(\text{médio})}$ – (BESJC).....	71
5.8	Simulações na BRS.....	73
5.9	Análise do Efeito da Cobertura Vegetal na Geração do Escoamento e Erosão do Solo.....	77
5.9.1	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BES).....	77
5.9.2	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Subbacias (BES).....	79
5.9.3	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BESJC).....	80

5.9.4	Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Sub-bacias (BESJC).....	82
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	85
6.1	Escoamento Superficial.....	85
6.2	Produção de Sedimentos.....	86
6.3	Simulações com diferentes proporções de cobertura vegetal.....	87
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
7.1	Conclusões.....	89
7.2	Recomendações.....	90
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
	ANEXO A.....	98
	ANEXO B.....	146

RESUMO

A crescente demanda por recursos hídricos, as mudanças climáticas e atividades humanas têm afetado bastante os processos de escoamento e erosão do solo, os quais requerem quantificação e avaliação. Nesse sentido, bacias representativas e experimentais foram instrumentadas em vários lugares para obtenção de dados e análise dos processos. No estado da Paraíba, a partir dos anos 1980, várias iniciativas foram tomadas para aquisição de dados em bacias experimentais e representativas, e para modelagem dos processos de escoamento e erosão do solo usando, principalmente, modelos orientados a eventos, os quais mostraram seu potencial para representar esses processos em base de eventos. No entanto, para avaliar o efeito de mudanças climáticas e do uso do solo sobre as respostas de bacias é necessário utilizar modelos apropriados tais como os modelos contínuos de base física. Nesta pesquisa o modelo contínuo de base física MOSEE, modelo para simulação do escoamento e erosão do solo, foi aplicado em microbacias da Bacia Representativa de Sumé (BRS) e suas sub-bacias, e em microbacias da Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) e suas sub-bacias, na simulação do escoamento e erosão do solo utilizando dados naturais de precipitação e considerando diferentes proporções de desmatamento e reflorestamento. Os resultados obtidos com o modelo mostraram-se consistentes com os processos observados (escoamento e erosão), os efeitos do desmatamento sobre as respostas foram relevantes, principalmente sobre a erosão devido ao aumento do desprendimento do solo, escoamento e transporte de sedimentos, enquanto que, o reflorestamento teve grande impacto em reduzir o escoamento e a erosão do solo. Os resultados do modelo também mostraram grande sensibilidade dos processos quanto a variabilidade da chuva.

ABSTRACT

The growing demands for water resources and the climatic changes and human activities have been affecting a great deal the runoff and soil erosion processes, which require quantification and evaluation. In this sense, representative and experimental basins have been instrumented everywhere for data acquisition, and analysis of these processes. In the state of Paraíba, from the 80s on, several initiatives have been taken to acquire data in experimental and representative catchments, and model relevant hydrologic and erosion processes using, principally, event-oriented models, which have been given evidence of their importance to represent the processes at an event basis. However, to evaluate the effect of climatic and land use changes on basin responses it is necessary to use appropriate models such as physically based continuous models. In this research the continuous physically based model MOSEE, a model for soil erosion estimation, was applied to micro-basins in the representative basins of Sumé (RBS) and its sub-basins, to micro-basins in the experimental basin of São João do Cariri (BESJC) and its sub-basins, to simulate runoff and soil erosion using observed data of natural rainfall considering different proportions of deforestation and afforestation. The model results agreed quite well with the observed values, and the effects of deforestation on responses were relevant, mainly on the soil erosion due to the increasing soil detachment and runoff and sediment transport, while the afforestation had great impact in reducing runoff and soil erosion. The model results also demonstrated to be very sensitive to the rainfall variability.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Atualmente com a crescente demanda dos recursos hídricos, principalmente para o abastecimento humano, indústria e atividades agropecuárias, tem-se colocado a questão do processo de decisão por parte dos gestores como essencial para a sustentabilidade hídrica. Além do crescimento da demanda hídrica, as alterações climáticas e a intervenção humana na natureza perturbam consideravelmente o ciclo hidrológico.

A hidrologia é uma ciência multidisciplinar que tem como objeto de estudo o ciclo hidrológico, ou seja, a ocorrência, circulação e distribuição da água, levando em consideração suas propriedades e interação com o meio ambiente. Para que se tenha um eficaz processo de gestão desses recursos, faz-se necessário a simulação de processos naturais, sua quantificação e, posteriormente, a caracterização dos impactos sofridos pelo meio ambiente. Nesse sentido, a modelagem hidrológica apresenta-se como uma ferramenta indispensável, sendo cada vez mais utilizada, principalmente na simulação do escoamento superficial e da erosão dos solos em bacias hidrográficas.

Escoamento superficial é o processo de deslocamento da água na superfície da bacia até encontrar um calha definida, sendo este processo resultado da interação entre a precipitação e bacia hidrográfica. O escoamento superficial provoca o arraste de partículas do solo e juntamente com as chuvas causam a chamada erosão hídrica.

Erosão é o processo de desprendimento e arraste das partículas do solo ocasionadas, principalmente, pela ação do vento (erosão eólica) e da água (erosão hídrica) (Carvalho, 1994). Esse processo vem sendo acelerado pelo homem, quando o mesmo passa a ocupar as terras de forma inadequada e intervir de forma mais intensa sobre as mesmas. A erosão hídrica é o resultado da ação conjunta do impacto das gotas de chuva (desprendimento) e das enxurradas (arraste de partículas) provenientes das águas que não foram retidas ou infiltradas no solo, se constituindo na principal forma de degradação dos solos.

Para um melhor entendimento dos processos de escoamento e erosão, e das alterações que estes provocam ao meio ambiente, utilizam-se atualmente, com bastante frequência duas alternativas: a) a análise via experimentos dos processos hidrossedimentológicos em bacias representativas e experimentais; b) a simulação desses processos através do uso de modelos adequados e capazes de quantificar os efeitos de mudanças que possam ocorrer no clima e no uso do solo sobre os processos naturais (Aragão, 2000).

A consideração de diferentes condições de chuva e uso do solo é importante para o resultado da modelagem e na quantificação do escoamento superficial e erosão do solo. Nesse contexto, o presente trabalho visa utilizar o modelo distribuído denominado

MOSEE – Modelo de Simulação do Escoamento e Erosão (Figueiredo, 2009), que leva em conta esses aspectos.

1.1 – Problemática

Modelos matemáticos têm sido utilizados para simulação dos processos hidrossedimentológicos (escoamento e erosão do solo) desde os anos 60. Inicialmente, os modelos empíricos e semiconceituais foram os mais utilizados até meados dos anos 80. Como exemplos pode-se citar a equação universal da perda do solo – USLE (Wischmeier, 1960), juntamente com os modelos semiconceituais combinados com a USLE (e.g. Williams, 1975). Posteriormente, novos modelos, denominados modelos de base física, foram desenvolvidos, apresentando uma maior complexidade. Dentre estes modelos podem ser citados, o modelo WESP (Lopes, 1987) e o SHE (Abbott et al., 1986a,b) com suas versões avançadas SHERED (Bathurst et al., 1995; Wicks e Bathurst, 1996), SHERTRAN (Bathurst e Purnama, 1991; Ewen et al., 2000), e KINEROS (Woolhiser et al., 1990).

Os modelos de base física usam leis físicas e contêm parâmetros com significado físico que podem ser estimados ou calibrados, tornando-se assim mais apropriados para investigar os impactos da mudança de clima, da cobertura vegetal, do uso do solo, escala, e do relevo e hidrografia na resposta da bacia hidrográfica. Apresentam como vantagem, o fato de requererem poucos dados de precipitação, mas em contrapartida a validação deve ser feita de forma diferenciada. Tais modelos são geralmente distribuídos, sendo a bacia dividida conforme o clima, relevo, cobertura vegetal, tipo de solo, etc., em sub-bacias, planos ou quadriculas.

O grande número de parâmetros utilizados, a simulação em grandes escalas e a representação espacial da bacia hidrográfica, tem sido apontado com limitações destes modelos, implicando em incertezas quanto aos resultados obtidos com seu uso. Além do mais, modelos como o WESP (Lopes, 1987) e KINEROS2 (Woolhiser et al., 1990) consideram os eventos isoladamente e não consideram o processo de evapotranspiração o que não permite a atualização da umidade entre os eventos.

1.2 – Objetivos

Modelar o escoamento e erosão do solo de maneira contínua, utilizando o modelo MOSEE, sob diferentes condições de precipitação e uso do solo em bacias do Cariri paraibano.

Como objetivos específicos destacam-se: a) Escolher diferentes condições de precipitação na região do Cariri paraibano e preparar o banco de dados para simulação do escoamento e erosão do solo; b) Parametrizar o modelo sob diferentes condições de uso do solo; c) Testar a parametrização em pequenas áreas (microbacias); d) Verificar a parametrização testada em nível de eventos, na simulação contínua de múltiplos eventos

em condições diferentes de chuva; e) Validar a parametrização em outras escalas e condições de chuva; f) Avaliar o efeito do desmatamento e reflorestamento sobre os processos hidrossedimentológicos; g) Estabelecer o padrão de erosão (taxas) relativo às escalas investigadas e ao regime de chuvas a partir dos resultados obtidos.

1.3 – Justificativa

As regiões semiáridas em geral, e em particular a do Cariri no Estado da Paraíba, apresentam condições naturais que, por si só, já representam um problema para a conservação dos seus rasos solos, como por exemplo, chuvas irregulares e mal distribuídas, em geral intensas, alto índice de evaporação, vegetação pobre do tipo rasteira arbustiva com árvores típicas bastante espaçadas, baixas capacidades de infiltração e armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, escoamentos rápidos. Esses fatores, conjuntamente com o uso do solo, favorecem a erosão da camada superficial por desprendimento, devido à energia da chuva, e pelo escoamento superficial. Iniciativas no sentido de mensurar os processos de escoamento e erosão começaram notadamente nos anos 80 na região do Cariri paraibano (Cadier e Freitas, 1982; Cadier et al, 1983). A modelagem desses processos tem sido feita através de modelos distribuídos, tanto orientado a eventos (Woolhiser et al., 1990; Srinivasan et al., 2004) quanto contínuos (Figueiredo, 1998; Figueiredo e Davi, 2006; Figueiredo, 2008) considerando a bacia dividida em quadriculas (Bathurst et al., 1995) ou planos e canais (Lopes, 1987; Lopes, 2003). Os resultados obtidos com aplicação desses modelos indicam o potencial dos mesmos na simulação dos processos. No entanto, uma avaliação dos efeitos da variabilidade da chuva e uso do solo ainda precisa ser feita com um modelo contínuo.

1.4 – Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta de mais 6 capítulos além da Introdução (Capítulo 1), organizados da seguinte forma: No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, onde são apresentados conceitos ligados ao escoamento superficial e erosão do solo, modelos hidrológicos e modelagem hidrossedimentológica. No Capítulo 3, o modelo utilizado é descrito, com seus componentes (escoamento e erosão) e os seus processos, assim como as equações utilizadas. No Capítulo 4, descrevem-se as unidades experimentais e os dados utilizados no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 5 é apresentada a modelagem, e conjuntamente, a calibração e validação do modelo. No Capítulo 6, faz-se a análise e discussão dos resultados. No Capítulo 7, finalmente, são feitas as conclusões acerca da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - escoamento Superficial

Dos processos que compõem o ciclo hidrológico, provavelmente o mais importante para o engenheiro seja o escoamento superficial, visto que é um processo complexo resultante da interação entre os outros processos hidrológicos. Além do mais, a maioria dos estudos em engenharia de recursos hídricos busca o aproveitamento dessa água ou a atenuação dos efeitos do seu deslocamento.

De acordo com Figueiredo (1998) o escoamento superficial é basicamente gerado por dois mecanismos: a) quando há um excesso de precipitação sobre a capacidade de infiltração do solo, denominado de fluxo Hortoniano, b) quando ocorre a saturação do solo. O primeiro mecanismo é característico das precipitações intensas, enquanto o segundo, dos eventos chuvosos de longa duração.

Em regiões áridas e semiáridas que apresentam uma camada de solo extremamente rasa, vindo logo em seguida uma camada rochosa, pode se perceber que o principal mecanismo de geração do escoamento é o fluxo Hortoniano (Aragão, 2000). Segundo Chow *et al* (1988) solos mais profundos, com maior teor de areia e maior porosidade apresentam uma maior capacidade de infiltração sendo menos suscetíveis a geração do escoamento.

O escoamento sofre a influência de vários fatores que vão facilitar ou dificultar a sua formação. Tais fatores podem ser de natureza climática, relacionada à precipitação (intensidade, duração e precipitação antecedente), de natureza fisiográfica, ligada às características físicas da bacia (área, forma, permeabilidade, capacidade de infiltração e topografia da bacia) e/ou de natureza antrópica, seja pelo desmatamento, reflorestamento, ou através de obras hidráulicas, tais como uma barragem (Villela e Mattos, 1975).

2.2 - Erosão do Solo e Produção de Sedimentos

A erosão causada pela água da chuva caracteriza-se como um processo complexo no qual o impacto das gotas de chuva e o arraste provocado pelo escoamento superficial provocam o desprendimento e o transporte de partículas de solo. O deflúvio superficial causa erosão através das tensões de atrito da água em movimento ou através da turbulência do escoamento (Righetto, 1998). Tal processo tem sido acelerado pela ação antrópica, principalmente pela retirada da cobertura vegetal. Dentre os vários danos causados pela erosão tem-se: sedimentação dos rios e reservatórios, aumento do risco de desertificação e a remoção da camada fértil de zonas agrícolas (Guerra *et al.*, 1999).

Regiões de clima tropical apresentam um processo erosivo mais intenso do que outras regiões, e em algumas áreas a erosão é agravada pelo fato das chuvas se concentrarem em certas estações do ano (Guerra *et al.*, 1999). Segundo Figueiredo (1998) a fina camada superficial de solo, característica de regiões semiáridas, é extremamente susceptível à erosão. Tal processo tem sido acelerado pelo desmatamento, uma vez que a chuva incide diretamente sobre o solo desprotegido. Outro fator importante para aceleração do processo de erosão e que deve ser considerado é a questão da açudagem. Para Figueiredo & Srinivasan (1999) a construção de açudes exige que a vegetação nativa seja retirada deixando o solo ao seu redor desprotegido e vulnerável aos efeitos erosivos da chuva.

Segundo Foster (1982) a erosão origina-se nos planos e canais e justamente nessas áreas ocorrem os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos.

A produção de sedimentos é definida como o total de descarga de sedimento de uma área de contribuição determinado em um ponto referencial por um período específico de tempo (Vanoni, 1977). Compreende os processos de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos. O impacto das gotas de chuva é o principal responsável pelo desprendimento das partículas do solo, deixando o material desprendido suscetível de ser transportado, seja pela ação do vento, do escoamento ou ação de outras precipitações. O carregamento dos sedimentos pelo escoamento ocorre de várias formas, definidas pelas características das partículas e capacidade do fluxo..

2.2.1 Erosão nos Planos

Nos planos podemos citar três estágios básicos de erosão hídrica.

O impacto das gotas de chuva possui um potencial erosivo, visto que irão primeiramente desagregar a partícula do solo, e em seguida, expulsar o material do local de origem, deixando-o exposto a ação do escoamento superficial (Ramos, 1995).

Quando a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, inicia-se o escoamento superficial que irá remover os sedimentos em uma fina camada do solo, recebendo a denominação de erosão laminar. Quando o escoamento se concentra em caminhos preferenciais surge à erosão em sulcos, propiciando o aparecimento de pequenas rugas ou sulcos que irão concentrar cada vez mais o fluxo. A variação da resistência do solo aliada as declividades do terreno fazem com que a formação dos sulcos ocorra de forma aleatória. Quando a erosão em sulcos se desenvolve e atinge determinadas proporções temos o estágio final denominado de erosão em ravinas (Vanoni, 1975).

A erosão laminar apresenta maior abrangência, podendo atingir grandes áreas, e conseqüentemente ter assim uma contribuição significativa. Contrariamente, as erosões

em sulcos e em ravinas apresentam menor abrangência, caracterizando-se como um processo localizado.

2.2.2 Erosão nos Canais

O fluxo em um canal gera uma força de cisalhamento nas suas superfícies laterais e no seu leito provocando o processo erosivo, que ocorre de forma contínua. Para Carvalho (1994) a erosão fluvial explica a formação dos rios e da rede de drenagem, sendo a responsável pelo aprofundamento e alargamento do leito dos rios. O transporte do material erodido nos planos aumenta a disponibilidade de material a ser transportado pelo escoamento, sendo que em determinadas situações pode ocorrer a deposição temporária desse material. Fatores como a quantidade de material disponível para transporte e características do material que compõem o leito e as laterais do curso d'água determinarão, dependendo do escoamento, o transporte de sedimentos.

Quando ocorre um aprofundamento do canal, a água infiltra nos planos aumentando sua umidade e conseqüentemente diminuindo a resistência do solo, e em alguns casos, pela ação da gravidade poderá ocorrer o deslizamento dos taludes dos canais (Figueiredo, 1998).

2.2.3 Estimativa da Erosão

A modelagem do processo de erosão do solo tem sido uma ferramenta indispensável para a estimativa da perda de solo, sendo extremamente útil no planejamento de ações de controle e combate dos efeitos desse fenômeno. A modelagem da erosão do solo pode ser feita, atualmente, através de muitas fórmulas tais como a USLE, MUSLE, KINEROS2 (Aragão, 2000), as quais foram desenvolvidas para diferentes condições de fluxo e características da bacia, diferindo consideravelmente nas taxas de erosão simuladas. Conseqüentemente, a escolha de uma ou outra metodologia para previsão da quantidade de sedimentos erodida constitui-se numa tarefa extremamente difícil e deve ser feita com base nos objetivos, precisão e principalmente disponibilidade de dados.

2.3 - Transporte e Deposição de Sedimentos

A carga de sedimentos em rios caracteriza-se como uma mistura de partículas de vários tipos, formas e tamanhos. O tipo da partícula é determinado por sua densidade, o tamanho por seu diâmetro e a forma por seu coeficiente de esfericidade (Christofolletti, 1981).

Sabemos que uma parte dos sedimentos tem origem na ação erosiva da água sobre as margens e o fundo do leito denominado de carga do leito; enquanto que a outra parte origina-se nas vertentes sendo denominada de carga em suspensão.

Segundo Vanoni (1977) a carga de sedimentos diz respeito ao tipo de material transportado, e o termo “descarga sólida” ou “descarga de sedimentos” refere-se a massa total de sedimentos que passa numa seção do rio em um determinado intervalo de tempo, sendo geralmente expressa em toneladas por dia.

De acordo com Carvalho (1994) o transporte de sedimentos apresenta as seguintes formas: a) Carga Sólida de Arrasto – as partículas rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d’água; b) Carga Sólida Saltante – as partículas pulam ao longo do curso d’água por efeito da correnteza ou impacto com outras partículas; e c) Carga Sólida em Suspensão – formada pelas partículas mais finas e que estão sempre em suspensão no meio do leito, acima do leito. Denomina-se de capacidade de transporte de sedimentos a máxima quantidade de sedimentos que o fluxo é capaz de transportar. Quando no fluxo tivermos uma quantidade de partículas superior a sua capacidade de transporte ocorre o fenômeno da deposição, que é mais notado em baixas velocidades de escoamento.

2.3.1 Carga Dissolvida, Carga no Leito, Carga em Suspensão e Carga Total

No processo de transporte de sedimentos pelo rio três tipos de cargas podem ser distinguidas: carga dissolvida, carga em suspensão e carga no leito (Santos et al., 2001).

A carga dissolvida compõe-se basicamente de constituintes intemperizados das rochas que são transportados pelo escoamento subterrâneo. Mas existem determinadas situações em que o escoamento superficial pode contribuir através de um processo denominado de poluição difusa, por exemplo, no carreamento de fertilizantes de uma área agrícola. Soma-se a isso, o aporte de cargas dissolvidas provenientes de fontes poluidoras. Assim, a quantidade de material em suspensão depende da contribuição do escoamento subterrâneo e superficial para a vazão do rio, sendo altamente variável temporal e espacialmente. Geralmente, o estudo da carga dissolvida está mais relacionado com a qualidade da água (Santos et al., 2001).

A carga em suspensão é constituída pelos sedimentos mais finos, como silte, argila, e areia em determinadas faixas granulométricas, sendo estas transportadas no fluxo turbulento e misturadas à água na forma de solução heterogênea. Em transporte de sedimentos, esta é a carga mais estudada, devido à maior importância comparada com a carga dissolvida e maior facilidade de medição em comparação com a carga do leito. Na maioria das vezes, determina-se o que é chamado de “sólidos totais”, ou seja, a soma das cargas em suspensão e dissolvida (Santos, et al., 2001).

A determinação da descarga sólida em suspensão é realizada através de medições, ou amostragens, dividindo a seção transversal em segmentos, uma vez que os sedimentos não apresentam uma distribuição uniforme. Para essa medição as amostras devem ser coletadas de forma a representar a média na seção transversal do rio no tocante à sua concentração e granulometria. Após a coleta dessas amostras, podemos

determinar apenas a carga em suspensão através da filtração, ou se queremos determinar os sedimentos em suspensão e dissolvidos, utilizamos em laboratório a técnica da secagem. Importante ressaltar que o amostrador não deve tocar no fundo do rio para não coletar sedimento de arraste e não agitar o sedimento presente no fundo do rio. Por isso, existe uma zona denominada de “zona não amostrada” que tem sua espessura determinada em função do tipo de amostrador e da natureza do leito.

A carga do leito é aquela composta de partículas de maiores diâmetros, e por esse motivo, permanecem sempre junto ao fundo do rio. Seu transporte ocorre de duas maneiras, através do arraste e da saltação. Na saltação, as partículas mantêm-se próximas do leito e a colisão entre elas mantém a sua densidade, que serve como transicional entre a carga que sempre está em contato com o leito (carga do leito) e a carga em suspensão. No arraste o transporte é realizado pelo efeito da tensão tangencial exercida pelo movimento do fluido, sendo que nesse processo as partículas sempre estão em contato com o leito (Santos et al., 2001).

Os métodos de medição direta da carga do leito não são métodos práticos, pois apresentam uma difícil operacionalização. Dentre esses métodos podemos destacar a medição por meio de armadilhas, o uso de amostradores portáteis e o uso de radioisótopos (traçadores). Segundo Carvalho (1994) existe muitas fórmulas para o cálculo da carga do leito, o que leva a escolha de uma ou outra metodologia há ser bastante criteriosa, considerando aspectos do curso d'água, como adequação da metodologia e facilidade de aplicação.

A determinação do valor da descarga sólida total pode ser feita através de métodos diretos ou indiretos. Segundo Carvalho (1994) pelo fato de não existir uma divisão física entre as principais descargas sólidas – a de suspensão e de arrasto- os métodos e equações desenvolvidos não apresentam resultados satisfatórios. Diretamente pode se determinar a descarga sólida total fazendo com que todo o sedimento fique em suspensão; e indiretamente, essa medição pode ser efetuada através de alguns processos: a) soma da descarga em suspensão com a de arrasto, e mais uma parcela que considera a descarga não amostrada, b) processos de cálculo como o método modificado de Einstein, e c) levantamento batimétrico do reservatório.

2.3.2 Propriedades dos Sedimentos

Estudam-se as propriedades das partículas dos sedimentos dadas a sua importância nos processos de erosão dos solos e transporte dos sedimentos; sendo, portanto, fundamental para a modelagem computacional, visto que determinadas propriedades como o diâmetro, forma e fator de forma influenciam esses processos. A classificação dos sedimentos que mais interessa são aquelas baseadas em seu tamanho, sua forma, sua densidade e velocidade de queda ou sedimentação.

O tamanho caracteriza-se como a propriedade mais utilizada e mais importante, podendo ser definido por seu volume e peso (peso específico), diâmetro representativo e velocidade de queda entre outras. A seguir é apresentada a classificação aceita pelo Subcomitê sobre Terminologia de Sedimentos da União Geofísica Americana.

Tabela 2.1 – Tamanhos e denominações das partículas de sedimento.

Tamanho (mm)	Denominação
4096 - 2048	Matacão muito grande
2048 - 1024	Matacão grande
1024 - 512	Matacão médio
512- 256	Matacão pequeno
256 - 128	Pedregulho grande
128 - 64	Pedregulho pequeno
64 – 32	Cascalho muito grosso
32 - 16	Cascalho grosso
16-8	Cascalho médio
8-4	Cascalho fino
4-2	Cascalho muito fino
2-1	Areia muito grossa
1 – 1/2	Areia grossa
1/2 – 1/4	Areia média
1/4 – 1/8	Areia Fina
1/8 – 1/16	Areia muito fina
1/16 - 1/32	Silte grosso
1/32 – 1/64	Silte médio
1/64 - 1/128	Silte fino
1/128 – 1/256	Silte muito fino
1/256 – 1/512	Argila grossa
1/512 – 1/1024	Argila média
1/1024 – 1/2048	Argila fina
1/2048 – 1/4096	Argila muito fina

Fonte: Garde & Ranga Raju (1985)

A forma das partículas de sedimentos varia de acordo com a porosidade, permeabilidade e coesividade dos solos; sendo utilizados coeficientes baseados no seu volume, na área projetada e nos eixos maior, intermediário e menor dos sedimentos. (Siviero, 1999). Segundo Suguio (2003) a forma influencia a velocidade de transporte, a velocidade de queda, a estabilidade dos taludes, etc.

A densidade das partículas é uma função de sua composição mineralógica, apresentando um intervalo característico de valores, sendo o valor de 2,65 utilizado como referência, e este afeta o transporte de sedimentos por segregação. Este valor provém de sedimentos compostos, principalmente por feldspato e quartzo.

A velocidade de queda ou sedimentação é uma função do tamanho, forma e densidade das partículas, além de outros fatores tais como, número de Reynolds, proximidade das paredes laterais do canal e concentração de sedimentos. A velocidade

de queda é de suma importância, visto que esta caracteriza a interação existente entre o transporte de sedimentos, o leito, as margens e o perfil de concentração. Quando em um regime estacionário, esta recebe a denominação de velocidade terminal (velocidade constante sob ação da gravidade) e apresenta um equilíbrio entre a força resistente (de arrastamento, devido ao atrito) e o peso submerso.

Partículas que apresentam forma irregular têm sua dimensão representada pelo diâmetro esférico equivalente, considerando-se então, os diâmetros nominais, de peneiração, de sedimentação e de queda. A seguir são apresentadas as descrições feitas por Souza (2007), as quais regem o processo de erosão e transporte dos sedimentos e são fundamentais para obtenção dos bons resultados com a aplicação dos modelos hidrossedimentológicos.

- a) Diâmetro nominal: diâmetro da esfera de densidade e volume iguais aos da partícula; (útil quando é fácil a medição do volume da partícula);
- b) Diâmetro de peneiração: diâmetro da esfera que, como a partícula, passa sem folga pela rede (malha) de uma peneira;
- c) Diâmetro de sedimentação: diâmetro da esfera de densidade igual à partícula, que atinge a “velocidade terminal”, igual a da partícula, nas mesmas condições (útil para areias finas, siltes e argilas);
- d) Diâmetro de queda: diâmetro da esfera de densidade 2,65, que atinge a mesma velocidade terminal da partícula, em água destilada à temperatura de 24°C. (útil para areias finas, siltes e argilas).

2.4 Modelos Hidrológicos

Um modelo representa algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, objetivando entendê-lo e buscando suas respostas para diferentes entradas. Um modelo hidrológico constitui-se numa ferramenta que pode ser utilizada para o monitoramento do comportamento da bacia hidrográfica, ou seja, a previsão de suas respostas as mais diversas ações, tais como, modificações no uso do solo, chuvas intensas, construção de açudes, urbanização da bacia, estiagens, entre outras (Tucci, 2006).

Os modelos hidrológicos visam representar os fenômenos naturais, mesmo que de forma aproximada; visto que variáveis hidrológicas, como vazão, precipitação ou produção de sedimentos provavelmente será prevista apresentando sempre uma determinada incerteza. Outro fator preponderante é o fato de que os fenômenos hidrológicos apresentam variações em três dimensões, e além do mais, ainda variam no tempo. Daí, a consideração das incertezas inerentes aos modelos, das variações nas três dimensões e no tempo torna-se extremamente complexa. Portanto, adota-se na maioria dos modelos somente uma ou duas dessas fontes de variação (Chow et al., 1988).

2.4.1 Classificação dos Modelos Hidrológicos

A denominação recebida pelos modelos está ligada ao seu objetivo principal. Assim sendo, os modelos que objetivam calcular as vazões de uma bacia hidrográfica a partir da precipitação ocorrida sobre a mesma são denominados de modelos chuva-vazão. Aqueles que são utilizados para calcular as vazões numa seção do rio, mas a jusante, a partir de um ponto mais a montante, recebem a denominação de modelos vazão-vazão. Os que visam sintetizar o movimento e a disponibilidade de água subterrânea a partir de dados de realimentação, bombeamento e características hidrodinâmicas do aquífero são chamados de modelos de água subterrânea. Existem ainda, os modelos voltados para a modelagem da qualidade de água e os modelos hidrossedimentológicos que simulam o escoamento e a erosão do solo, entre outros. Um modelo hidrossedimentológico será o objeto de estudo desse trabalho.

Segundo Tucci (2006) os modelos utilizados no gerenciamento de recursos hídricos podem ser classificados em modelos de comportamento, de otimização e de planejamento. Os modelos de comportamento criam um prognóstico da resposta de um sistema quando este é submetido a diferentes entradas ou modificações em suas características. Os modelos de otimização têm sua utilização voltada para a obtenção das melhores soluções nos problemas tratados. Finalmente, os modelos de planejamento são voltados para determinar as soluções hidráulicas, hidrológicas e econômicas, sempre considerando também aspectos sócio-econômicos e ambientais.

Vários outros critérios são adotados para a classificação de um modelo, como por exemplo o tipo de variáveis utilizadas na modelagem, as relações existentes entre as variáveis, a forma de apresentação dos dados, as relações espaciais, e finalmente, a dependência temporal existente. Existe uma extensa literatura que trata exhaustivamente das classificações e conceituações dos modelos hidrológicos, sendo que algumas discussões sobre os aspectos ligados à classificação dos modelos podem ser encontradas em Maidment (1993), Vertessy et al (1993) e Tucci (2006).

Analisando as variáveis que compõem o modelo, este pode ser classificado em estocástico ou determinístico. Quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tiver sua probabilidade de ocorrência levada em consideração, ou seja, apresentar um comportamento aleatório, possuindo uma distribuição de probabilidade, trata-se um modelo estocástico. Caso contrário, se a probabilidade de ocorrência das variáveis for ignorada e o modelo seguir uma lei definida que não seja uma lei de probabilidades este será determinístico. Vale salientar que, mesmo que a variável possua um caráter aleatório, mas se para cada valor de entrada o modelo produzir uma única resposta, o mesmo será determinístico.

Os modelos são denominados de empíricos ou conceituais, quando se analisa as relações existentes entre as variáveis. Modelo empírico é aquele no qual os dados calculados são ajustados aos dados observados, através de funções que não representam

explicitamente os processos físicos ocorridos na bacia, podendo nesse sentido apresentar uma característica regionalista. Contrariamente, os modelos conceituais utilizam funções que descrevem os processos físicos, os quais podem conter parâmetros, que geralmente, necessitam de calibração.

De acordo com o intervalo de tempo considerado na simulação os modelos podem ser discretos ou contínuos. Muitas vezes os fenômenos naturais são representados por modelos discretos mesmo apresentando uma variação contínua ao longo do tempo. O fenômeno que será estudado, a disponibilidade dos dados e a precisão requerida nos resultados determinarão o intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado. Muitas vezes quando se almeja uma maior precisão dos resultados, utiliza-se um menor intervalo de tempo, mesmo que isso implique em um maior custo operacional (Rennó, 2000).

Considerando a análise da variabilidade espacial da variável de entrada são ditos como concentrados ou distribuídos. Os modelos ditos concentrados não levam em consideração a variação espacial da bacia, ou seja, as variáveis de entrada e saídas são representativas de toda a área estudada. Os modelos ditos distribuídos levam em consideração a variação espacial das variáveis do modelo, apresentando um grau de detalhamento intrinsecamente relacionado com as informações disponíveis e a precisão desejada para representar a bacia. De acordo com Tucci (2006), na prática não encontramos um modelo puramente distribuído, visto que, sempre realizamos algum tipo de discretização, transformando um modelo dito distribuído em concentrado numa pequena subdivisão da bacia. Para Lacroix (2002) a incorporação da variação espacial das características hidrológicas significativas dentro da bacia será determinada pela discretização realizada.

Finalmente, temos a classificação dos modelos em estáticos ou dinâmicos. O modelo classifica-se em estático quando o mesmo produz para um único conjunto de dados de entrada um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo. Quando os modelos utilizam o resultado de uma interação como entrada para uma próxima interação, são denominados de dinâmicos (Rennó, 2000).

2.5 Escalas Temporais e Espaciais nos Modelos Matemáticos

Pesquisas são realizadas em bacias experimentais que possuem pequenas e médias dimensões. No entanto, em bacias de grandes dimensões há uma carência de dados, o que cria a necessidade de adoção de uma metodologia de transferência de informações de pequenas para grandes bacias. De acordo com Figueiredo (1998) e Lopes (2003) um entrave para esse processo é o efeito que a variação de escala proporciona aos parâmetros do modelo.

Modelos podem simular processos em curtos espaços de tempo e em escala espacial bastante detalhada, no entanto, os resultados podem ser gerados para intervalos

de tempo maiores e escala espacial com menor detalhamento. A generalização espacial dos resultados pode ser conseguida pelo uso do geoprocessamento e dados de sensoriamento remoto (Steyaert, 1993).

Estudos em diferentes escalas podem ser realizados através de uma abordagem estocástica ou determinística de base física. A abordagem estocástica usa funções de distribuição de probabilidades. A abordagem determinística de base física é mais complexa, mas é capaz de capturar as variabilidades da bacia hidrográfica e leva em conta leis fundamentais (conservação da massa). O ideal seria a observação do evento na mesma escala em que ocorrem, derivando a relação que melhor descreveria o fenômeno físico (Pimentel da Silva e Ewen, 2000).

2.6 Modelos Hidrossedimentológicos

A análise da erosão dos solos com base na ação dos processos hidrológicos constitui tema recorrente no setor da modelagem, apresentando uma ampla gama de modelos. Existe uma diversidade de modelos que simulam a hidrologia e os processos erosivos, tais como AGNPS, KINEROS, WEPP, SWAT, entre outros (Christofoletti, 1999).

Os recursos hídricos de uma bacia têm sua conservação dependente de ações tais como, uso adequado do solo, conservação da vegetação, entre outras, tornando necessário o conhecimento do potencial hídrico da bacia e os efeitos das intervenções humanas. Nesse sentido, Braga et al (2002) e Markowitz et al (2003) afirmam que o monitoramento hidrossedimentológico é indispensável para o desenvolvimento dos recursos hídricos dentro de uma base sustentável.

Segundo Aragão (2000) a modelagem da produção de sedimentos é mais complexa do que os outros tipos de modelagem hidrológica, visto que no modelo de erosão existe uma dependência na resposta pelo modelo hidrológico; além do mais, depende das fases que compõem o processo de erosão (desagregação, transporte e sedimentação) e do que acontece em cada elemento da bacia.

No início do século XIX, os EUA deram uma grande atenção ao estudo de erosão do solo e ao desenvolvimento de previsão desse processo; e nas primeiras décadas do século XX, foram implantadas as primeiras parcelas padrão experimentais para a determinação da taxa de erosão do solo sob determinadas condições. Por volta de 1940 começou o desenvolvimento dos modelos para cálculo da perda de solo. (Checchia, 2005).

Um número grande de modelos por ser encontrado na literatura. Lopes (1987) elenca alguns de erosão dividindo-os em classes: a) os modelos baseados na USLE (Universal Soil Loss Equation) ou MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), por exemplo, PTR (Pesticide Transport and Runnof) Crawford e Donigian (1973),

ACTMO (Agricultural Chemical Transport Model) Frere et al.,(1975), ANSWERS (Beasley et al, 1980); b) modelos baseados em processos físicos, citando os trabalhos de Bennett (1974), Simons et al (1975), Smith (1976), Li (1979), Borah et al (1981), Smith et al. (1981) e Alonso e Decoursey (1983).

Nas áreas utilizadas neste trabalho, vários modelos têm sido utilizados para realização de estudos.

Aragão (2000) estudou a relação existente entre os parâmetros do modelo WESP com as características físicas da Bacia Experimental de Sumé (BES) e com as condições físicas do solo; além de avaliar a transferência dos parâmetros calibrados para uma área hidrologicamente semelhante.

Lopes (2003) simulou, comparou e analisou os resultados do escoamento e erosão do solo utilizando os modelos WESP e KINEROS nas sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé, e nas parcelas e microbacias da Bacia Experimental de Sumé (BES); e, estudou o efeito de escala nesses processos.

Cruz (2004) aplicou o modelo WEPP em diferentes escalas de produção (parcelas de 100 m² e microbacias em torno de 5000 m²) nas Bacias Experimentais de São João do Cariri (BESJC) e Sumé (BES) avaliando a variabilidade dos parâmetros do modelo entre as unidades experimentais dessas bacias; e analisando o efeito de escala nos processos (escoamento e erosão) variando de parcelas até a Bacia Representativa de Sumé (BRS).

Davi (2004) concebeu um modelo de base física para simulação hidrossedimentológica em pequena escala (MOFIPE- Modelo Concentrado de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão do Solo em Pequena Escala), contínuo que considera, na sua estrutura, a chuva natural, parâmetros físicos da bacia e as condições de umidade do solo entre os eventos.

Sousa (2007) desenvolveu a partir do MOFIPE (Davi, 2004) um Modelo Distribuído de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão – MODFIPE. Este se diferencia, pois permite simular em bacias heterogêneas, considerando o sistema de drenagem da bacia, discretizado em planos e canais.

Santos (2008) verificou o desempenho dos modelos KINEROS2, WESP e WEPP na modelagem dos processos de chuva, vazão e erosão na Bacia Experimental de São João do Cariri em diferentes escalas para avaliar os efeitos de escala sobre os parâmetros dos modelos.

Paiva (2008) realizou um estudo comparativo entre os modelos WESP, Kineros2 e WEPP aplicados a áreas experimentais de diferentes escalas de produção, utilizando

dados de vazão e erosão de duas áreas hidrologicamente semelhantes, a Bacia Experimental de Sumé (BES) e a Bacia Experimental de São João do Cariri.

Tais estudos trouxeram significativas contribuições para o entendimento dos processos de escoamento e erosão do solo em regiões semi-áridas. Entretanto, é importante que os modelos sejam capazes de simular o escoamento e a erosão do solo de maneira distribuída com base nos parâmetros físicos, e que simule os efeitos da variabilidade dos fatores climáticos (e.g. chuva) e uso do solo (e.g., desmatamento) sobre os processos. O presente trabalho com o modelo MOSEE, aborda essas questões, através da realização e simulação dos processos de forma contínua.

III - MODELO DISTRIBUÍDO MOSEE

3.1 Descrição Sumária do Modelo

O modelo MOSEE - Modelo de Simulação do Escoamento e Erosão do Solo (Figueiredo, 2009) é uma versão avançada do modelo MOFIPE- Modelo de Base Física para Simulação Hidrossedimentológica em Pequena Escala (Figueiredo e Davi, 2006), tendo sido codificado em Fortran G77.

A primeira versão do modelo foi desenvolvida para simulação do escoamento e erosão em pequenas escalas, no qual a bacia pode ser considerada homogênea, precipitação espacialmente uniforme e sistema de canais insignificantes. A versão atual do modelo leva em conta a distribuição espacial das precipitações, simula o escoamento em escala de bacia hidrográfica dividida em sub-bacias (ver Figura 3.1). Considera a interceptação vegetal, a evapotranspiração e o fluxo vertical e horizontal no interior do solo, no processo de geração e propagação do escoamento e na erosão do solo. Os parâmetros das manchas horizontais de solo e do perfil vertical do solo, limitado a três camadas, são estabelecidos com base na textura do solo.

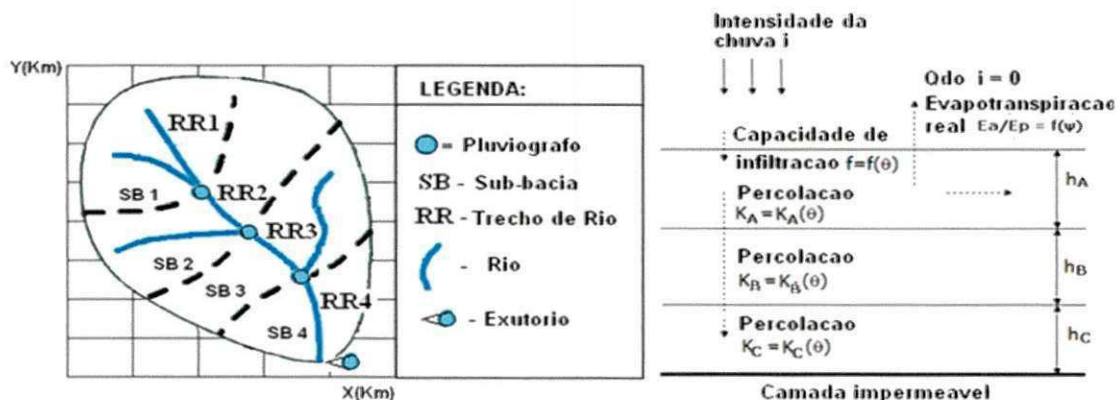


Figura 3.1- Estrutura da bacia e representação do perfil de solo no modelo

Considera-se que a precipitação seja variável espacialmente (mas uniforme em cada sub-bacia); a interceptação é função do tipo de vegetação, a evapotranspiração ocorre apenas entre eventos de precipitação (durante um evento de precipitação o ar está saturado, não ocorrendo evapotranspiração); o escoamento superficial é gerado quando a intensidade da precipitação é maior do que a capacidade de infiltração do solo, quando a camada superficial do solo está saturada, ou em ambas as situações. Foram introduzidas no modelo diferentes metodologias (e.g., Saxton et al., 1986) com base na textura do solo para sua parametrização. A erosão do solo devido à precipitação (impacto das gotas de chuva) ao escoamento (tensão de cisalhamento do fluxo) ou ambos, e o transporte dos sedimentos se baseia na capacidade de transporte pelo fluxo, que é modelado por diferentes métodos presentes na literatura (e.g., Engelund & Hansen, 1967). A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do modelo.

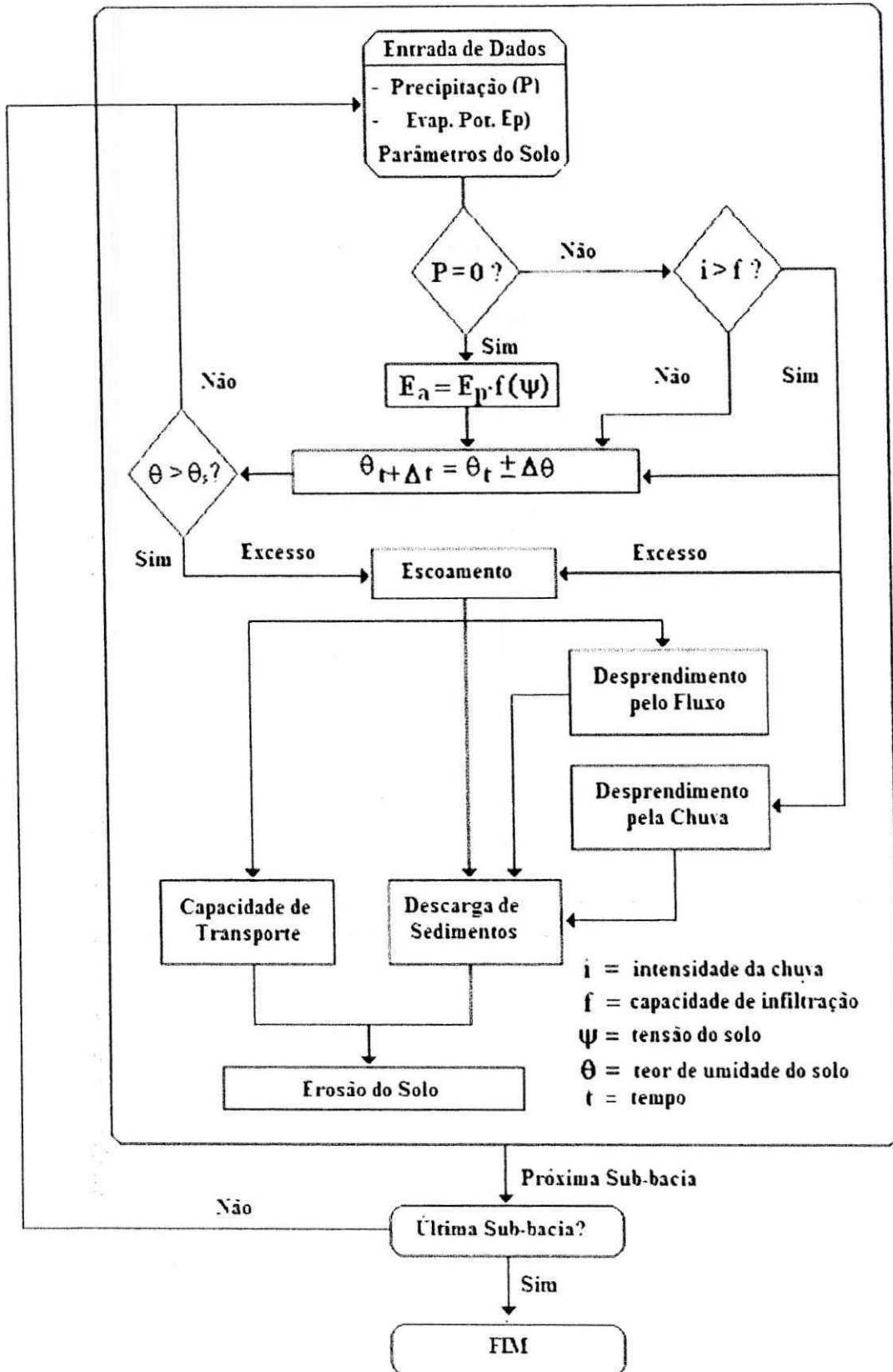


Figura 3.2 – Fluxograma do modelo (adaptado de Figueiredo , 2009)

3.2 Componentes do Modelo e Processos

O modelo MOSEE possui duas componentes básicas:

- Uma componente de Fluxo onde são simulados os processos de precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, escoamento sub-superficial, escoamento subterrâneo e propagação do escoamento.

- Uma Componente de Erosão onde são simulados os processos de erosão pela chuva, erosão pelo escoamento, capacidade de transporte pelo fluxo, transporte e deposição de sedimentos.

3.3 Componente de Fluxo

3.3.1 Precipitação e Interceptação

A componente de fluxo tem como entrada na bacia hidrográfica as intensidades das precipitações, as quais são calculadas com as alturas de chuva (P_i) e os intervalos de tempo correspondentes Δt_i (min) conforme a mudança de intensidade da chuva. As alturas das chuvas também podem ser determinadas de modo a considerar um intervalo de tempo fino (e.g. 1 minuto) mantendo-se a intensidade constante dentro do intervalo total (Figura 3.3), sendo depois inseridas no arquivo de dados de chuva. Para considerar a variabilidade espacial da precipitação na bacia, um pluviógrafo é atribuído para cada sub-bacia.

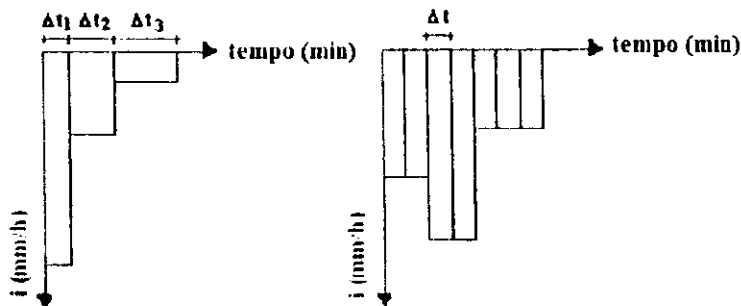


Figura 3.3- Representação da intensidade da precipitação

Para a interceptação, valores típicos de altura de interceptação podem ser informados conforme seja os tipos de vegetação na bacia. Segundo Horton (1919) a altura de interceptação varia de 0,5 a 5 mm, dependendo do tipo de vegetação e da altura de precipitação. Valores típicos de altura de interceptação para diferentes tipos de vegetação tropical podem ser encontrados em Jetten (1996). Figueiredo (1998) e Medeiros et al (2009) através de modelagem, obtiveram a capacidade de armazenamento da folhagem em áreas semiáridas da ordem de 0,5 mm. Além da altura de interceptação, dois parâmetros consideram a distribuição da cobertura em cada sub-bacia: C_g que representa a proporção de vegetação ($0 < C_g < 1$) e C_r que representa a proporção de rochas que afloram à superfície ($0 < C_r < 1$) (Figura 3.4).

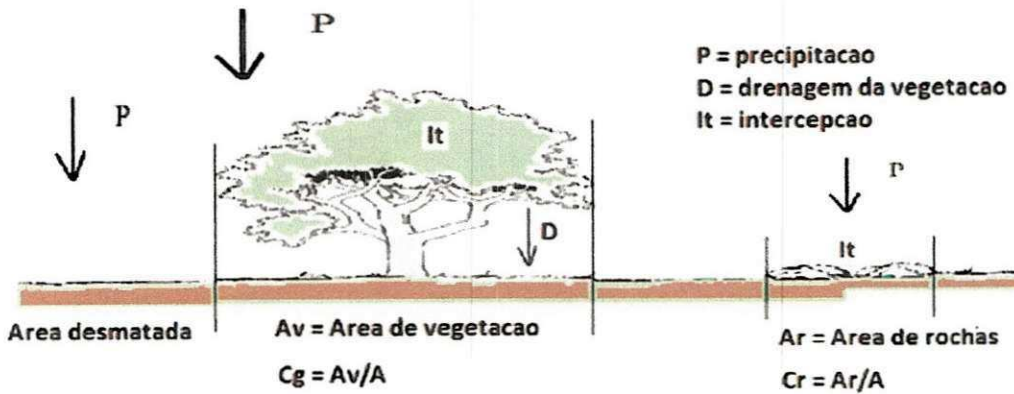


Figura 3.4 – Representação das proporções de cobertura vegetal e de rochas.

3.3.2 Evapotranspiração

Para o cálculo da evaporação potencial os métodos de cálculo de Blaney-Cridle (Shaw, 1994), da radiação, aerodinâmico (Chow et al., 1988), de Penman (1948) e o uso de dados observados (e.g., dados de tanque) são alternativas no programa computacional do modelo, os quais devem ser corrigidos de coeficiente de consumo para se obter a evapotranspiração potencial E_p (mm). A equação de Penman-Monteith (1965) pode ser escolhida para o cálculo da evapotranspiração potencial. A evapotranspiração real E_a (mm) é calculada (Equação 3.1) para os intervalos entre os eventos de precipitação (Figura 3.5). Durante os eventos de precipitação, pelo fato do ar está saturado, a evapotranspiração real E_a (mm) é desprezível, i.e., $E_a = 0$. Entre eventos de precipitação E_a é calculada em função da tensão do solo ψ (kPa) que depende da umidade do solo θ (m^3/m^3).

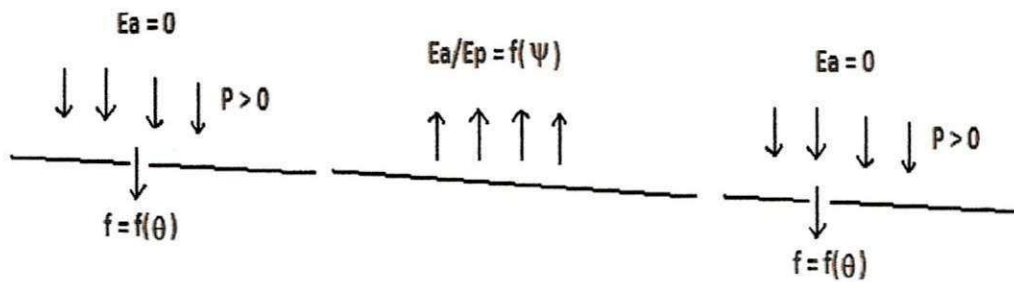


Figura 3.5 – Representação da evapotranspiração do solo

Segundo Feddes et al (1978), quando a tensão do solo for igual ao ponto de murcha ($\psi = 1500$ kPa) a evapotranspiração é igual a zero ($E_a = 0$) e quando a tensão do solo atingir o valor da capacidade de campo ($\psi = 33,3$ kPa) a evapotranspiração ocorre na taxa potencial ($E_a = E_p$). Valores de tensão do solo entre o ponto de murcha e a capacidade de campo variam, segundo Feddes e Zaradny (1977), linearmente.

A figura 3.6 apresenta as condições descritas anteriormente sendo θ a umidade volumétrica do solo, θ_{wp} e θ_{fc} as umidades volumétricas do solo no ponto de murcha e na capacidade de campo, respectivamente; e E_a e E_p , evapotranspiração real e potencial. Os procedimentos para determinação dessas variáveis (θ , θ_{wp} e θ_{fc}) serão descritos posteriormente.

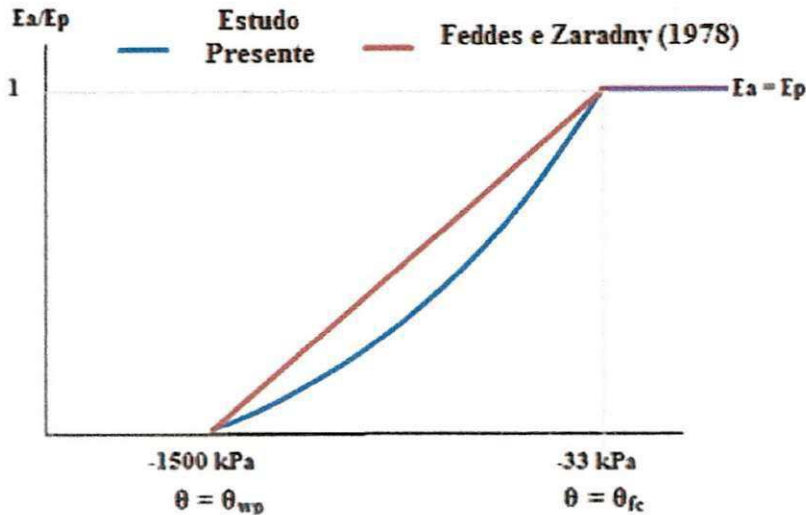


Figura 3.6 – Relação entre evapotranspiração e tensão no solo

No modelo, a relação entre a evapotranspiração real e a potencial é dada pela função exponencial (Equação 3.1), onde α é um fator local. Portanto, as seguintes condições são observadas no modelo.

$$E_a/E_p = e^{-\alpha((\psi(\theta)-33,3)/(1500-33,3))} \quad 33,3 < \psi < 1500 \quad (\text{kPa}) \quad (3.1)$$

3.3.3 Infiltração

Para o cálculo da infiltração da água na superfície são alternativas no modelo as Equações 3.2 e 3.3 (onde C , D , f_0 , f_c e k são parâmetros que podem ser obtidos por experimentação ou ajustados na simulação do escoamento).

$$f(\theta) = C \cdot \theta^{-D} \quad (\text{mm/h}) \quad (3.2)$$

$$f(\theta) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-K(\theta)} \quad (\text{mm/h}) \quad (3.3)$$

A utilização das equações exige a determinação da umidade do solo. A umidade atual do solo é determinada conhecendo-se a umidade antecedente e a variação de umidade no intervalo de tempo calculada com as Equações 3.8 a 3.18 conforme seja a condição de chuva e a camada de solo. No item, 3.3.4.4 será discutido como o teor de umidade dos solos é considerado.

3.3.4 Percolação

A água que infiltra através da camada superior do solo irá percolar para a camada inferior se a umidade da camada acima for maior ou igual a um valor mínimo tomado como a umidade correspondente a tensão de entrada de ar no solo (ψ_{10}), calculada em termos da textura do solo conforme Saxton et al (1986).

A percolação é determinada com base na menor condutividade hidráulica entre as camadas de solo adjacentes. Sendo K_A (mm/h), K_B (mm/h) e K_C (mm/h) as condutividades hidráulicas das camadas A, B e C, respectivamente, teremos:

- Se $K_A \geq K_B$ - percolação ocorre na taxa de K_B
- Se $K_A < K_B$ - percolação ocorre na taxa de K_A
- Se $K_B < K_C$ - percolação ocorre na taxa de K_B
- Se $K_B > K_C$ - percolação ocorre na taxa de K_C

O perfil do teor de umidades dos solos será influenciado pelas condições acima elencadas, dependendo dos valores das condutividades hidráulicas das camadas.

3.3.4.1 Tensão do solo

A tensão do solo é calculada através da Equação 3.4 (Saxton et al., 1986),

$$\psi(\theta) = A.\theta^B \quad (\text{kPa}) \quad (3.4)$$

onde os termos A e B são associados ao tipo de solo e sua textura, expressa em termos do percentual de argila (%C) e de areia (%S) calculados pelas Equações 3.5 e 3.6:

$$A = \exp[a + b.(\%C) + c.(\%S)^2 + d.(\%S)^2.(\%C)] \times 100 \quad (3.5)$$

$$B = e + f.(\%C)^2 + g.(\%S)^2.(\%C) \quad (3.6)$$

onde os valores dos coeficientes das equações são: $a = -4.396$; $b = -0.0715$; $c = -4.880 \times 10^{-4}$; $d = -4.285 \times 10^{-5}$; $e = -3.140$; $f = -2.22 \times 10^{-3}$; $g = -3.484 \times 10^{-5}$.

A umidade volumétrica é calculada distintamente para intervalos entre eventos de chuva, quando $P = 0$, e durante os eventos de chuva, quando $P > 0$. No primeiro caso, a variação de umidade no tempo é calculada em função da evaporação e da condutividade hidráulica das camadas. A variação da umidade no perfil de solo é o resultado da combinação da equação da conservação da massa $\partial\theta/\partial t = -\partial q/\partial z - S[\psi(\theta)]$ com a equação de Darcy para fluxo vertical $\partial q/\partial z = -K(\theta)\partial/\partial z[\psi(\theta) - z]$, onde z é a distância vertical a partir da superfície, $S[\psi(\theta)]$ é a perda de água para a atmosfera por evaporação, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica não saturada e t é o tempo (Feddes & Zaradny, 1977).

$$\partial\theta/\partial t = \partial/\partial z[K(\theta)\partial/\partial z[\psi(\theta)]] - \partial K(\theta)/\partial z - S[\psi(\theta)] \quad (\text{m}^3/\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.7)$$

Assumindo não ocorrer histerese, a Equação 3.8 é uma simplificação da equação diferencial parcial 3.7, válida para camadas de pequena espessura (para camadas muito espessas o perfil do solo deve ser dividido) com valores médios de K e ψ .

$$\theta_{A(t+\Delta t)} - \theta_{A(t)} = -\Delta t/h_A [(K_A(\theta)\psi_A(\theta))/h_A] - \Delta t/h_A [K_A(\theta)] - \Delta t/h_A E_a[\psi(\theta)] \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3.8)$$

Para as camadas B e C do solo, uma abordagem mais simples para o cálculo da variação de umidade, quando não se tem precipitações, foi programada considerando que: (a) a umidade pode aumentar se houver percolação da camada acima para a camada inferior, sendo, neste caso, necessário que a umidade da camada acima seja maior ou igual a um valor mínimo (tomado como a umidade correspondente a tensão de entrada de ar no solo (ψ_{10}), calculada em termos da textura do solo conforme Saxton et al (1986) e que a percolação é determinada com a menor das condutividades entre as camadas adjacentes; (b) a umidade diminui por evapotranspiração quando a umidade da camada acima for menor ou igual a umidade mínima. Essas condições são representadas pelas equações abaixo, onde $K_m = K_A$ se $K_A < K_B$ ou $K_m = K_B$ (camada B) ou $K_m = K_B$ se $K_B < K_C$ ou $K_m = K_C$ caso contrário (camada C).

$$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)} = (K_m \Delta t)/h_B \quad \text{se } \theta_A > \theta_{Amin} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3.9)$$

$$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)} = -(E_a \Delta t)/h_B \quad \text{se } \theta_A \leq \theta_{Amin} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3.10)$$

$$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)} = (K_m \Delta t)/h_C \quad \text{se } \theta_B > \theta_{Bmin} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3.11)$$

$$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)} = -(E_a \Delta t)/h_C \quad \text{se } \theta_B \leq \theta_{Bmin} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (3.12)$$

Durante os eventos de precipitação ($P > 0$) $E_a = 0$, logo a umidade do solo aumenta por causa da infiltração da água pela superfície e pela percolação no perfil vertical do solo, sendo a variação da umidade volumétrica calculada com base nas equações abaixo (camadas A, B e C), onde i é a intensidade da chuva e f a capacidade de infiltração média do solo (mm/h) no intervalo Δt . O efeito da declividade na lâmina d'água infiltrada é considerado pelo cosseno do ângulo formado entre o declive e a horizontal.

$$\theta_{A(t+\Delta t)} - \theta_{A(t)} = (f \Delta t)/h_A \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } i > f \quad (3.13)$$

$$\theta_{A(t+\Delta t)} - \theta_{A(t)} = (i \Delta t)/h_A \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } i \leq f \quad (3.14)$$

$$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)} = (K_A \Delta t)/h_B \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } K_A < K_B \quad (3.15)$$

$$\theta_{B(t+\Delta t)} - \theta_{B(t)} = (K_B \cdot \Delta t)/h_B \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } K_A \geq K_B \quad (3.16)$$

$$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)} = (K_B \cdot \Delta t)/h_C \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } K_B < K_C \quad (3.17)$$

$$\theta_{C(t+\Delta t)} - \theta_{C(t)} = (K_C \cdot \Delta t)/h_C \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad \text{se } K_B \geq K_C \quad (3.18)$$

3.3.4.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada

Métodos alternativos (e.g., Brooks & Corey, 1964; Campbel, 1974; Saxton et al, 1986 e Van Genuchten, 1980) são utilizados para cálculo da condutividade hidráulica não saturada, os quais dependem da condutividade hidráulica saturada K_s . A condutividade hidráulica saturada K_s é calculada também através de métodos alternativos em termos do percentual de areia (%S) e de argila (%C) na camada. Dentre os métodos para o cálculo de K_s estão o de Saxton et al (1986), Rawls et al (1998), Brakensiek et al (1984) e Cosby et al (1984).

A condutividade não saturada tem forma da Equação 3.19.

$$K(\theta) = K_s (S_e)^\eta \quad (\text{mm/h}) \quad (3.19)$$

onde η é o expoente da saturação relativa, $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$ é a umidade de saturação determinada em termos da porosidade $\phi = (2.65 - D_s)/D_s$ (D_s é a densidade do solo), sendo f_{ar} um fator de aprisionamento de ar, ou com a equação de Saxton et al (1986) em termos da textura do solo; θ_r é a umidade residual calculada em termos da textura do solo com a equação abaixo, apresentada em Rawls & Brakensiek (1989).

$$\theta_r = -0.0182482 + 0.00087269(\%S) + 0.00513488(\%C) + 0.02939286(\phi) - 0.00015395(\%C)^2 - \\ 0.0010827(\%S)(\phi) - 0.00018233(\%C)^2(\phi)^2 + 0.00030703(\%C)^2(\phi) - 0.0023584(\phi)^2(\%C) \quad (3.20)$$

Nesse estudo foi utilizada a equação de Brooks & Corey (1964) $\eta = 3 - 2/\lambda$, onde $\lambda = -1/B$ (B é uma constante que varia com a textura). Averjanov (1950) sugeriu $\eta = 3,5$, enquanto Mualem (1978) apresentou uma faixa maior de valores de η . Já Campbel (1974) apresenta expoente semelhante ao de Brooks & Corey, porém desconsidera a umidade residual. No modelo, o expoente $\eta = -1/B$ é também considerado. Em todos os casos B é determinado conforme Equação 3.6, sugerida por Saxton et al (1986).

3.3.4.3 Condutividade Hidráulica Saturada

Como dito anteriormente, a condutividade hidráulica saturada K_s pode ser calculada através dos métodos propostos por Saxton et al (1986), Rawls et al (1998), Brakensiek et al (1984) e Cosby et al (1984). Para o presente trabalho foi empregada a Equação de Saxton (1986) (Equação 3.21) utilizada na modelagem, sendo o valor da

condutividade hidráulica saturada determinado pela substituição do teor de umidade (θ) para o seu valor saturado (θ_s).

$$K(\theta) = 2.778 \times 10^6 \cdot \exp\{p + q \cdot (\%S) + [r + t \cdot (\%S) + u \cdot (\%C) + v \cdot (\%C)^2] \cdot 1/\theta\} \quad (3.21)$$

onde $\theta = \theta_s$ e os demais termos tem os seguintes valores: $p = 12.012$; $q = -7.55 \times 10^{-2}$; $r = -3.895$; $t = 3.671 \times 10^{-2}$; $u = -0.1103$ e $v = 8.7546 \times 10^{-4}$

3.3.4.4 Teor de Umidade dos Solos

Para a aplicação das Equações 3.2 e 3.3 para o cálculo da infiltração da água na superfície, se faz necessário determinar a umidade do solo. A umidade atual [$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t \pm \Delta\theta$] do solo é determinada conhecendo-se a umidade antecedente e a variação de umidade no intervalo de tempo calculada com as Equações 3.8 a 3.18 conforme seja a condição de chuva e a camada de solo. No tempo inicial da simulação atribui-se um valor para a umidade inicial do solo, para a qual a evapotranspiração (Equação 3.1), a tensão do solo (Equação 3.4), a condutividade hidráulica não saturada (Equação 3.20 ou outra alternativa programada) e a capacidade de infiltração (Equação 3.2 ou 3.3) são calculadas.

3.3.5 Escoamento Superficial, Sub-Superficial e Subterrâneo

O escoamento superficial é gerado quando a intensidade de precipitação é maior do que a capacidade de infiltração do solo, quando ocorre a saturação da camada superficial do solo, ou em ambos os casos. Tais condições estão nas Equações 3.22, 3.23 e 3.24.

$$I_s = A_b \cdot 10^3 \cdot (i-f)/3,6 \quad (l/s) \quad i > f \quad (3.22)$$

$$I_s = A_b \cdot 10^6 \cdot (\theta - \theta_s) \cdot (10h_A/\Delta t \cdot 60) \quad (l/s) \quad \theta > \theta_s \quad (3.23)$$

$$I_s = A_b \cdot 10^3 \cdot (i-f)/3,6 + A_b \cdot 10^6 \cdot (\theta - \theta_s) \cdot (10h_A/\Delta t \cdot 60) \quad (l/s) \quad i > f \text{ e } \theta > \theta_s \quad (3.24)$$

onde I_s (l/s) é o escoamento superficial de entrada no trecho do rio, A_b (km²) é a área da bacia, i e f (mm/h) são a intensidade da chuva e a capacidade de infiltração (valores médios em Δt), h_A (cm) é a espessura da camada A do solo e Δt (minutos) o intervalo de tempo transcorrido. O efeito da declividade na lâmina d'água escoada superficialmente é considerado pelo cosseno do ângulo do terreno formado com a horizontal.

O escoamento sub-superficial é determinado quando a umidade da camada superficial do solo for maior que a umidade da capacidade de campo θ_{cc} , determinada com o método de Saxton et al (1986) em termos da textura do solo. O método considera a equação de Darcy com carga de montante dada pela lâmina d'água correspondente a umidade do solo, carga de jusante igual a zero (é assumido que a lâmina d'água diminui

e descarrega na atmosfera na encosta do declive) e condutividade hidráulica conforme a umidade. Assim, para condições não confinadas, isotrópicas e considerando a extensão do trecho de rio (L) e a largura média da sub-bacia A_b/L (A_b é a área da bacia), a Equação 3.25 é válida, onde $h(\theta)$ é a lâmina correspondente a umidade θ ($\theta > \theta_{cc}$).

$$I_{sb} = (1/3600)K(\theta)[h(\theta)]^2 (L^2/A_b) \quad (l/s) \quad \theta > \theta_{cc} \quad (3.25)$$

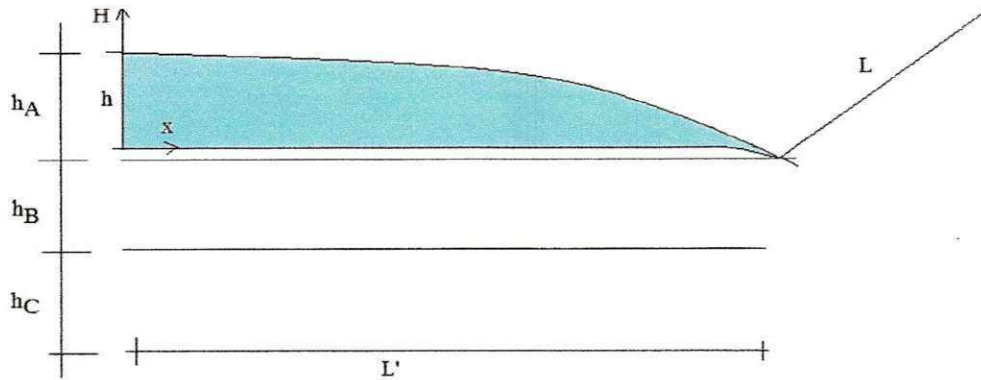


Figura – 3.7 – Representação do escoamento sub-superficial

O escoamento de base leva em conta a interação rio-aquífero. O lençol contribuirá para o escoamento do rio se a carga freática (h_{wt}) for superior a do rio (h_c). Caso contrário o rio alimentará o lençol. Em qualquer dos casos, a Equação 3.25 é utilizada sendo $K(\theta) = K_s$, $[h(\theta)]^2 = h_{wt}^2 - h_c^2$ (se $h_{wt} > h_c$) ou $[h(\theta)]^2 = h_c^2 - h_{wt}^2$ caso contrário. Nenhuma interação ocorrerá se $h_{wt} = h_c$. Assim, considerando $h_{wt} > h_c$, a contribuição do lençol para o rio é dada pela Equação 3.26.

$$I_b = (1/3600)K_s(h_{wt}^2 - h_c^2) (L^2/A_b) \quad (l/s) \quad \theta = \theta_s \quad (3.26)$$

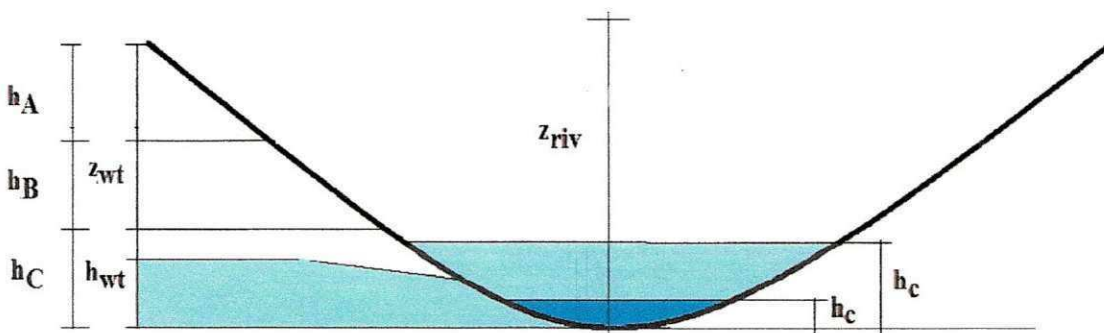


Figura 3.8 – Representação do escoamento de base

O escoamento total no trecho de rio é a soma dos escoamentos superficial (Equações 3.22, 3.23 ou 3.24), sub-superficial (Equação 3.25) e de base (Equação 3.26), i.e., $I = I_s + I_{sb} + I_b$.

3.3.5.1 Propagação do Escoamento

O escoamento total é propagado no trecho de rio ou via método de Muskingum (Chow et al., 1988) ou pelo método convexo do Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos (McCuen, 1982) dados pelas Equações 3.27 e 3.28.

$$Q_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 Q_t \quad (l/s) \quad (3.27)$$

$$Q_{t+\Delta t} = C I_t + (1-C) \cdot Q_t \quad (l/s) \quad (3.28)$$

onde $Q_{t+\Delta t}$ é o escoamento atual na saída do trecho do rio, $I_{t+\Delta t}$ é o escoamento atual na entrada do trecho do rio, $C = \Delta t/K$ é o coeficiente de propagação, K é o tempo de translação do hidrograma tomado igual ao tempo de concentração (t_c) do trecho de rio, $C_1 = (C-2X)/(2(1-X)+C)$, $C_2 = (C+2X)/(2(1-X)+C)$ e $C_3 = (2(1-X)-C)/(2(1-X)+C)$ são os coeficientes de Muskingum e X o fator de forma. Nas Equações 3.27 e 3.28, o escoamento Q_t deve ser atribuído haja vista que é desconhecido. Em simulações de longo período em bacias semi-áridas, Q_t pode ser tomado igual a zero. No modelo, a condição $2KX < \Delta t < t_c$ é verificada de modo que $0 < C < 1$, $C_1 > 0$ e $C_3 > 0$.

O tempo de concentração pode ser calculado ou pelo método de Kirpich (1940) ou de Kerby (1959) que considera a rugosidade (n) do trecho do rio, os quais são dados pelas Equações 3.29 e 3.30, onde t_c (tempo de concentração) é em minutos, L (extensão do trecho) é em pés e S (declividade do trecho) em m/m.

$$t_c = 0,0078(L^{0,77}/S^{0,385}) \quad (\text{min}) \quad (3.29)$$

$$t_c = 0,83(L \cdot n/S^{1/2})^{0,467} \quad (\text{min}) \quad (3.30)$$

3.4 Componente de Erosão do Solo

O impacto das gotas de chuva e o escoamento provocam a erosão total para transporte. À medida que a lâmina escoada aumenta ocorre uma diminuição do desprendimento ocasionado pelo impacto das gotas de chuva, sendo este efeito considerado no modelo. A capacidade de transporte do fluxo é calculada de acordo com as equações propostas por Englund-Hansen(1967), Yalin (1963) e Laursen (1958).

3.4.1 Erosão pela Chuva

A erosão pelo impacto das gotas de chuva é calculada pela Equação 3.31:

$$D_r = K_r \cdot F_w \cdot (1-C_g - C_r) \cdot (M_r + M_d) \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (3.31)$$

onde D_r é a erosão pelo impacto da chuva ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$), K_r é o coeficiente de erosividade da chuva ($\text{s}^2/\text{kg} \cdot \text{m}^2$), F_w é o fator de redução da erosão pelo incremento da lâmina do

escoamento (-), sendo $F_w = e^{(1 - h/d_m)}$ se $h > d_m$ ou $F_w = 1$ se $h < d_m$, onde h é a profundidade do fluxo (m); $d_m = 0,00124 \cdot i^{0,182}$ é o diâmetro representativo da gota de chuva (m) com a intensidade da chuva i em mm/h, C_g e C_r são as proporções de cobertura do solo pela vegetação e rochas, M_r é o momento quadrado da chuva por unidade de área e de tempo [(kg.m/s)² m⁻²s⁻¹] dado por $M_r = \alpha \cdot i^\beta$ (α e β são parâmetros que dependem da intensidade da chuva i , tabelados em Wicks, 1998), M_d é o momento quadrado da gota de chuva que cai da vegetação [(kg.m/s)² m⁻²s⁻¹] dado por $M_d = (\rho^2 \pi d^3 / 6) \cdot V^2 \cdot L_d \cdot D_{rg}$ ($\rho = 1000$ kg/m³ é a massa específica da água, $\pi = 3,1416$, d é o diâmetro da gota que cai da vegetação (m), L_d é a proporção da drenagem (D_{rg}) que cai das folhas e V é a velocidade das gotas que caem da vegetação, com $V = [(M/\beta)g(1 - e^{-2Y\beta/M})]^{1/2}$ onde M/β e Y (distância média da queda de gotejamento) variam com o diâmetro da gota de chuva d (Wicks, 1988) e $g = 9,806$ m/s². Para qualquer distância da queda de gotejamento e $d < 3,3$ mm, $M/\beta = 2200d$, para $d > 3,3$ mm, $M/\beta = 1640d + 19,93$ se $Y < 7,5$ m ou $M/\beta = 660d + 5,14$ se $Y > 7,5$ m (Wicks, 1988). No modelo, o valor $Y = 3,5$ m é atribuído à altura de vegetação.

3.4.2 Erosão pelo Escoamento

A parcela da erosão causada pelo escoamento é calculada pela Equação 3.32,

$$D_f = K_f \cdot (1 - C_g - C_r) \cdot (\tau / \tau_c - 1) \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (3.32)$$

onde D_f é o desprendimento de solo pelo escoamento (kg/m².s), K_f é o coeficiente de erosividade do fluxo (kg/m².s), C_g e C_r já foram definidos antes, τ e τ_c são as tensões de cisalhamento do fluxo e crítica do sedimento (N/m²) conforme Shields (Vanoni, 1975), dadas por $\tau = \gamma \cdot h \cdot S$ e $\tau_c = (\rho_s - \rho) \cdot D_{50} \cdot a \cdot R^{*b}$ onde R^* é o número de Reynolds da partícula, $R^* = \max[0,03; D_{50} \cdot (\tau/\rho)/\nu]$, ν é a viscosidade cinemática do fluido ($8,94 \times 10^{-7}$ N.s/m²), γ é o peso específico da água (9806 N/m³), S é a declividade da bacia (m/m), h é a lâmina do escoamento (m), ρ_s é a massa específica do sedimento (2650 kg/m³), ρ é a massa específica da água, D_{50} é o diâmetro representativo dos sedimentos (m), a e b são coeficientes (-) dados em termos de R^* (para R^* no intervalo de 0,03 a > 400 , a varia de 0,1 a 0,056 e b de -0,3 a 0).

3.4.3 Carga Total de Sedimento Disponível para Transporte

A concentração de sedimentos disponível para transporte é, portanto, a carga total de sedimentos dividida pela vazão, ou seja, $C_s = (D_r + D_f)/Q$ onde Q é a vazão calculada pelo modelo. O transporte de sedimentos depende da capacidade do fluxo em transportar a carga total disponível.

3.4.4 Capacidade de Transporte de Sedimentos pelo Fluxo

Para avaliar a capacidade de transporte, foram programadas as equações de Engelund-Hansen (1967), Yalin (1963) e Laursen (1958). A fórmula de Laursen (1958)

considera a distribuição de sedimentos, conforme vista em Vanoni (1975) e Simons e Şentürk (1992), sendo válida tanto para a carga do leito quanto em suspensão e total. A capacidade de transporte proposta por Yalin (1963) é para a carga do leito e o método de Engelund-Hansen (1967) para o cálculo da capacidade de transporte total, sendo esta dada conforme Equação 3.33, onde C_t é a concentração de sedimentos na capacidade de transporte (m^3/m^3), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S é a declividade da linha de energia (m/m), S_s é a densidade do sedimento, igual a 2,65, d é o diâmetro do sedimento (m), h_c é a profundidade de fluxo no canal (m) determinada com a equação de Manning em termos da vazão, u (m/s) é a velocidade média do fluxo ($u = Q/A_c$, onde $A_c = h_c \cdot C_w$ é a área molhada do canal e C_w a largura do canal).

$$C_t = 0,05 / (d \cdot (S_s - 1)^2) \cdot ((S \cdot h_c) / g) \cdot u \cdot S \quad (m^3/m^3) \quad (3.33)$$

A carga total de sedimentos disponível será totalmente transportada se a capacidade de transporte, calculada pela Equação 3.33, ou com outra programada no modelo, for maior. Caso contrário, a carga transportada será igual a capacidade de transporte pelo fluxo conforme a equação utilizada, sendo a diferença a deposição de sedimentos.

CAPÍTULO IV – ÁREA DE ESTUDO E DADOS OBSERVADOS

4.1 Bacia Experimental e Representativa de Sumé (BES e BRS)

4.1.1 Localização

A Bacia Experimental de Sumé (BES), está inserida na área da Bacia Representativa de Sumé, localizada na propriedade Fazenda Nova, no município de Sumé, no Alto Paraíba (Figura 4.1). De acordo com Cadier e Freitas (1982) faz parte da área superior da Bacia do Rio Paraíba, numa latitude de $7^{\circ}44'$ Sul e longitude $36^{\circ}57'$ Oeste, sendo uma região extremamente seca do Nordeste brasileiro, denominada de Cariris Velho, ou simplesmente Cariri. Segundo Nouvelout (1974) possui características físico-climáticas semelhantes a do “polígono das secas” (Figura 4.2).

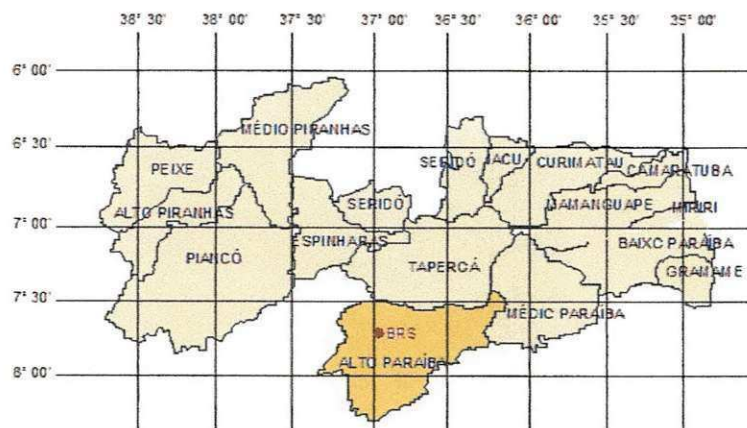


Figura 4.1 – Localização da BRS no Estado da Paraíba (divisão por Bacias Hidrográficas).
(Cruz, 2004)

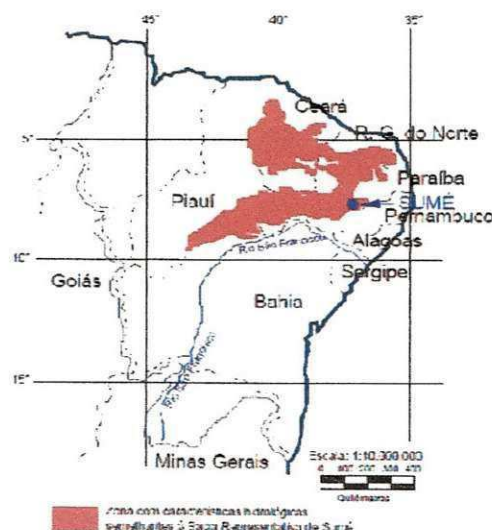


Figura 4.2 – Área hidrologicamente homogênea no Nordeste
(Cadier e Freitas, 1982)

4.1.2 Características Físico-Climáticas

A Bacia Experimental de Sumé (BES), inserida na Bacia Representativa de Sumé (BRS) possui solo (Figura 4.3), relevo (Figura 4.4), vegetação e clima semelhantes ao de outras áreas do Nordeste Brasileiro.

Rochas do complexo cristalino pré-cambriano, na maioria granitos, formam o subsolo do Cariri Paraibano (Albuquerque, 1970); sendo constatada a ocorrência de fendas e fissuras não interligadas em rede (Siqueira, 1964), e o embasamento cristalino impermeável apresenta fissuras e presença de Gnaisses e quartzitos (Cadier et al., 1983). Segundo Aragão (2000) 85% da superfície da bacia é composta por solo bruno não cálcico vértico e 15% por manchas de solos Bruno não cálcicos modais associados a raros vertissolos; sendo os solos rasos.

O relevo varia de ondulado a pouco ondulado, com declividade média inferior a 10% (Lopes, 2003); e a vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila densa, semelhante à vegetação de toda a região dos Cariris Velhos (Cadier, 1982).

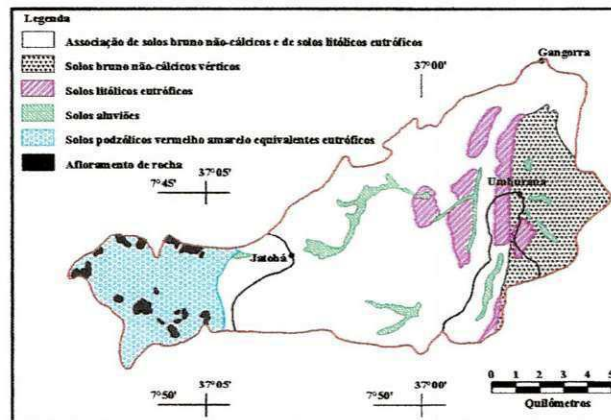


Figura 4.3 – Mapa de Solos da Bacia Representativa de Sumé (Lopes, 2003)

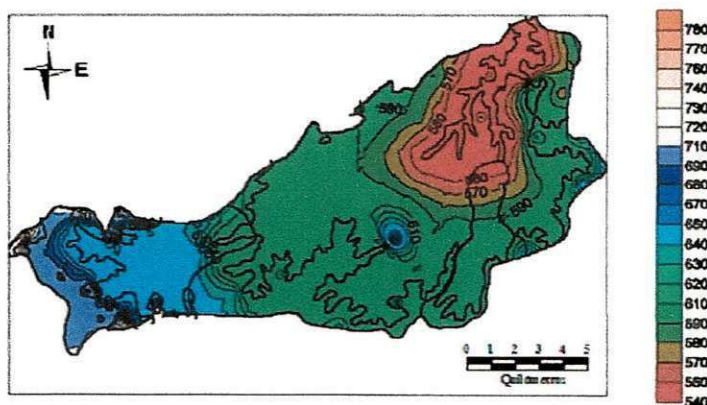


Figura 4.4 – Mapa de Relevo (em metros) da Bacia Representativa de Sumé – BRS (Lopes, 2003)

4.1.3 As Unidades Experimentais

As instalações da Bacia Experimental de Sumé são formadas por quatro microbacias (ver Tabela 4.1) caracterizando a topografia do terreno e a cobertura vegetal, nove parcelas experimentais de 100 m², operadas sob chuva natural. Faz parte das instalações da BES, uma estação climatológica, uma rede de cinco pluviômetros e três pluviógrafos além de um abrigo para técnicos (Srinivasan e Galvão, 2003).

4.1.3.1 Microbacias

No início do período chuvoso de 1982, as quatro microbacias começaram a ser operadas; e, para o estabelecimento das características físicas da bacia experimental foram realizados levantamentos topográficos, botânicos, pedológicos, etc. (Cadier et al., 1983).

As microbacias 1 e 2 (M1 e M2) foram instaladas na área onde a vegetação nativa foi mantida, ao passo que as microbacias 3 e 4 (M3 e M4) foram instaladas na área totalmente desmatada. A Tabela 4.1, apresenta algumas das características físicas de cada microbacia. As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os mapas topográficos dessas unidades experimentais.

Tabela 4.1 – Características das microbacias (Cadier et al., 1983)

Microbacias	Área (ha)	Perímetro (m)	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
M1	0,62	398	7,0	Caatinga Nativa
M2	1,07	466	6,1	Caatinga Nativa
M3	0,52	302	7,1	Desmatada
M4	0,48	270	6,8	Desmatada

As microbacias possuem uma fossa retangular de cerca de 2300 l de capacidade, equipada com um vertedor triangular de 90° com parede delgada, dois linigráfos e um dispositivo de amostragem dos sedimentos transportados pela água. (Srinivasan & Galvão, 2003).

A fossa é pré-calibrada e o hidrograma do escoamento gerado é obtido através da curva de capacidade do vertedor e do linigrama registrado. O volume total escoado é calculado pela soma do que passa pelo vertedor e aquele que fica retido na fossa. (Srinivasan & Galvão, 2003).

A avaliação da produção total de sedimentos da microbacia é baseada em amostragem realizada no material retido na fossa (em suspensão e depositado no fundo) no fluxo vertente. (Srinivasan & Galvão, 2003).

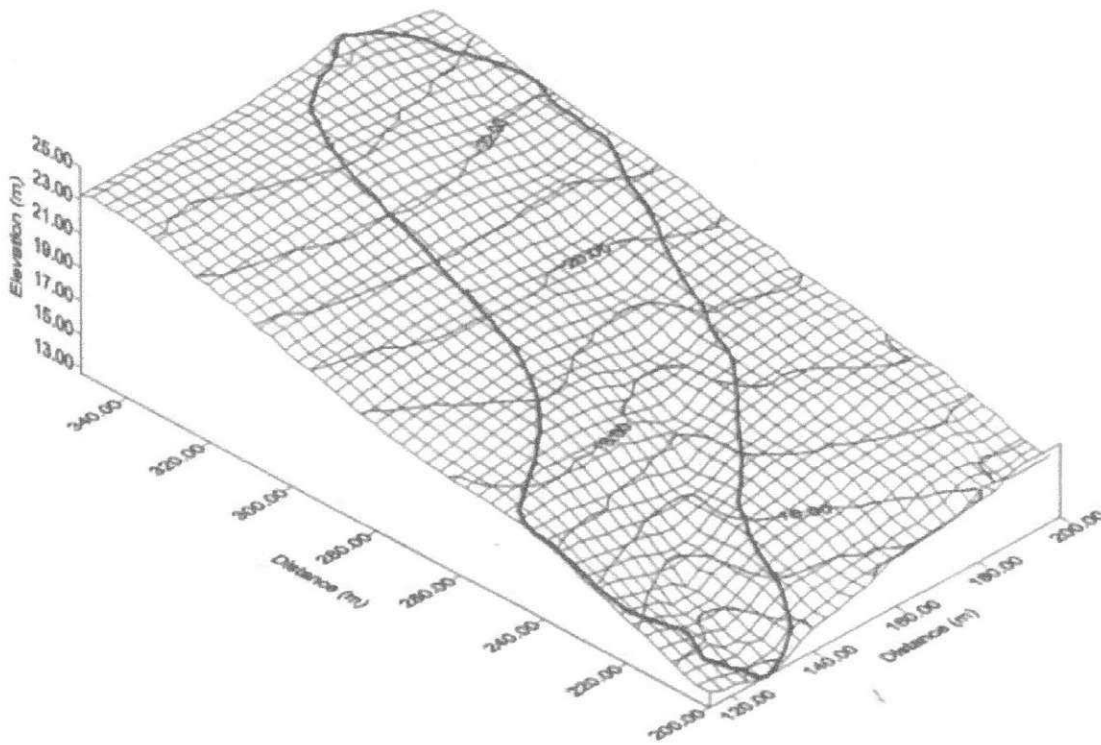


Figura 4.5 – Visão Tridimensional da Microbacia M1 da BRS.
Fonte: Figueiredo, 1998.

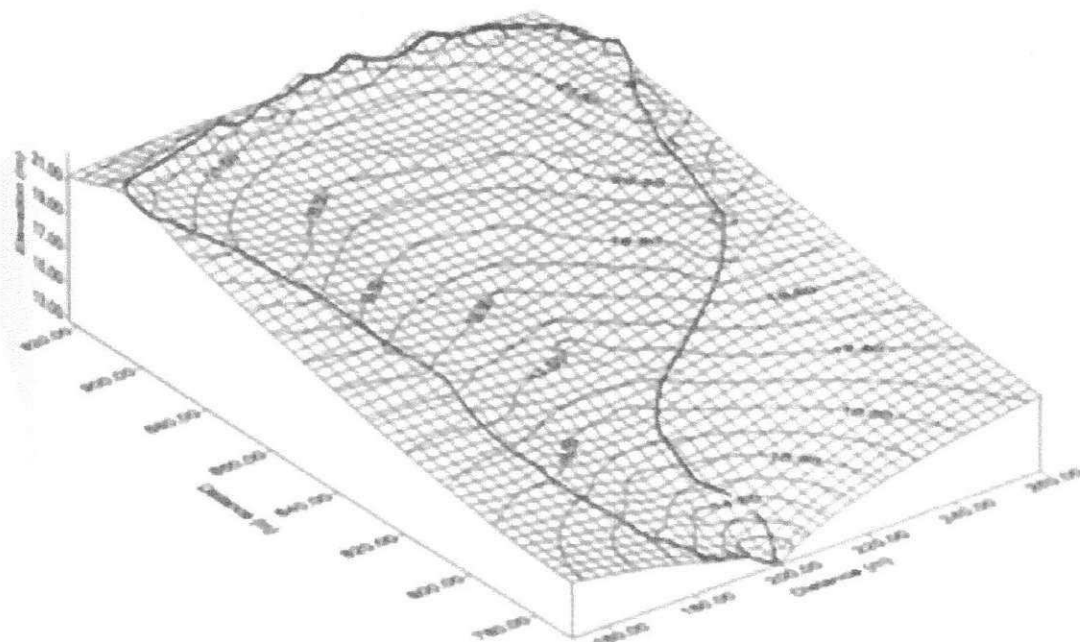


Figura 4.6 – Visão Tridimensional da Microbacia M2 da BRS.
Fonte: Figueiredo, 1998

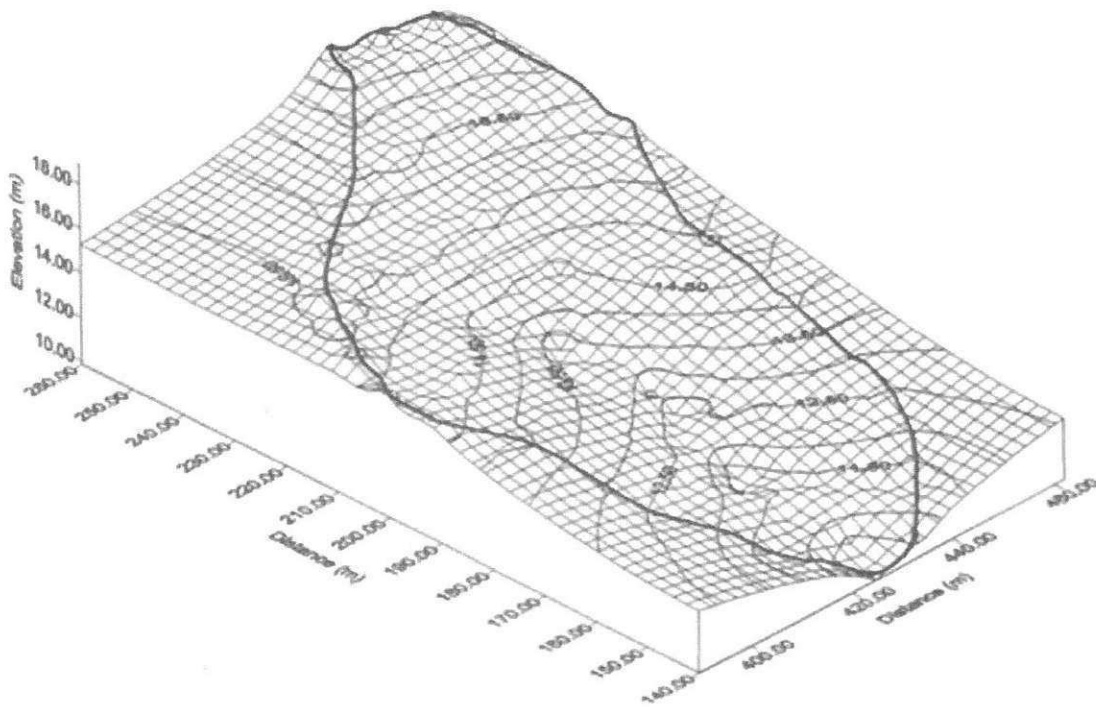


Figura 4.7 – Visão Tridimensional da Microbacia M3 da BRS.
Fonte: Figueiredo, 1998.

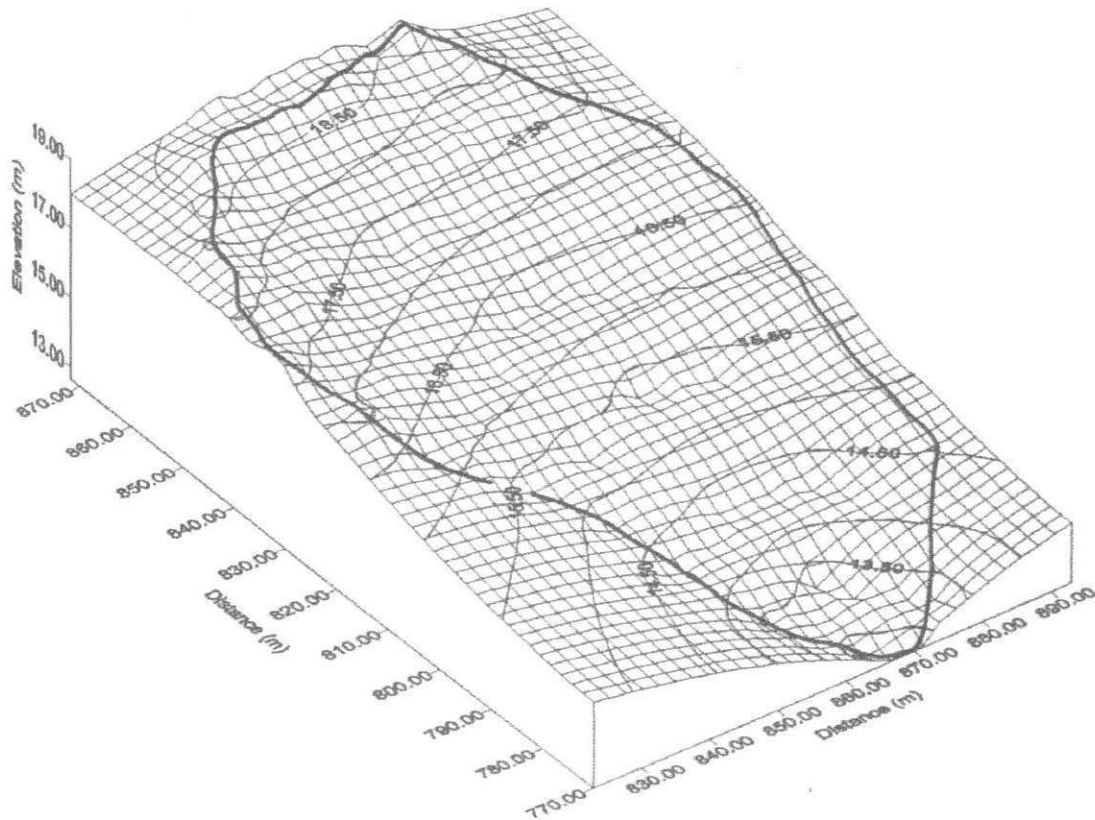


Figura 4.8 – Visão Tridimensional da Microbacia M4 da BRS.
Fonte: Figueiredo, 1998.

4.1.3.2 Bacia Representativa de Sumé (BRS)

A Bacia Representativa de Sumé (BRS) localiza-se na parte superior da bacia do Rio Paraíba, sendo formada por três sub-bacias (Gangorra, Jatobá e Umburana).

A sub-bacia de Jatobá apresenta relevo ondulado e solo variando de Vermelho Amarelo equivalente a Eutrófico, que é altamente permeável, retendo grandes volumes de água. A sub-bacia de Gangorra apresenta um relevo pouco ondulado. (Sousa, 2007).

A vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila densa. Predominância de uma agricultura de subsistência desenvolvida em zonas limitadas, e prática de pecuária extensiva em condições precárias (Sousa, 2007).

As características de declividade e cobertura vegetal de cada sub-bacia são apresentadas na Tabela 4.2. A Figura 4.9 apresenta a BRS, suas sub-bacias e hidrografia.

Tabela 4.2 – Características da BRS (Cadier e Freitas, 1982)

Sub-bacia	Área (km ²)	Declividade (%)	Perímetro (km)	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
Gangorra	137,4	7,0	69,5	3,94	Caatinga
Jatobá	26,8	6,2	18,2	6,79	Caatinga
Umburana	10,7	7,1	28,5	9,33	Caatinga

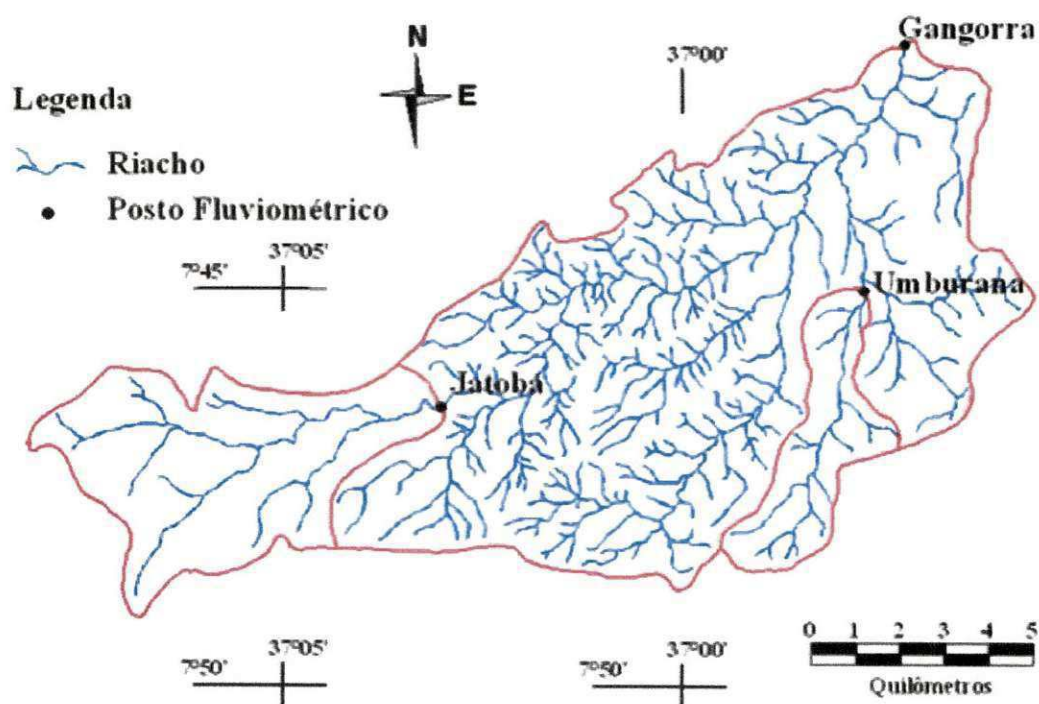


Figura – 4.9- Bacia Representativa de Sumé, sub-bacias e hidrografia.

Fonte: Cruz, 2004

4.2 Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC)

4.2.1 Localização

A BESJC está localizada próximo da cidade de São João do Cariri-PB (Figura 4.10), apresenta elevações que variam de 400 a 600 m acima do nível do mar, ocupando uma área de aproximadamente 13,48 km². O município está localizado na zona fisiográfica do planalto da Borborema, apresentando características de semi-aridez mais acentuada que o sertão (Santos, 2008).

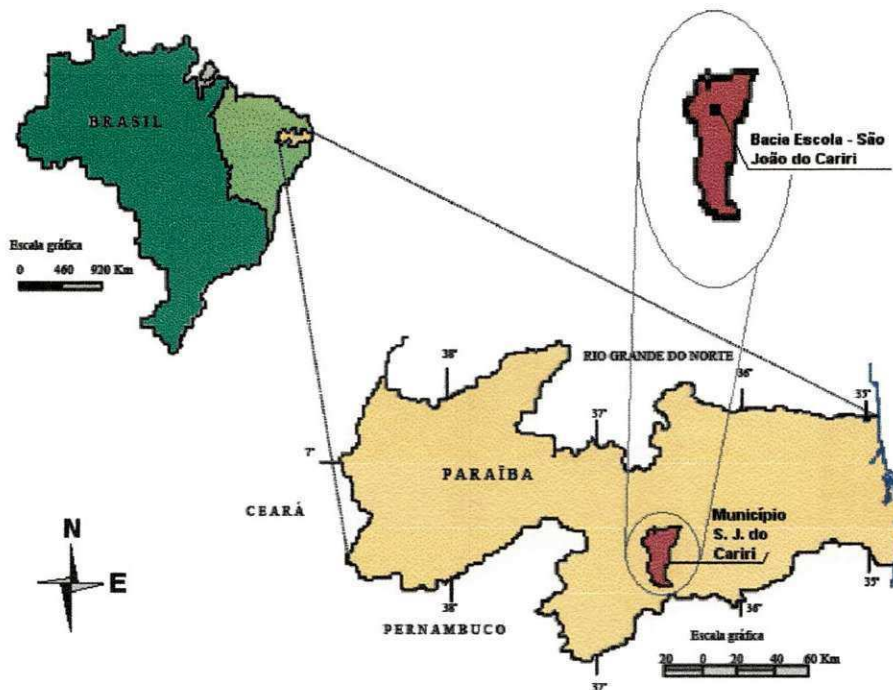


Figura 4.10 - Localização da Bacia Escola São João do Cariri
Fonte: acervo digital do Laboratório de Geografia Aplicada, Degeoc/CCEN/UFPB

4.2.2 Características Físico-Climáticas

A BESJC está inserida em uma área considerada representativa de outras regiões do Nordeste semi-árido por apresentar características físico-climáticas semelhantes dessas regiões (ver Figura 4.1). As variáveis climáticas foram registradas através de pluviômetros, pluviógrafos e de duas estações climatológicas, sendo uma convencional, instalada em 1983, e outra, automática, instalada em 2001.

A precipitação média anual fica em torno de 500 mm. A temperatura média anual de 25°C, a umidade relativa média anual é igual a 70,6% e a evaporação média do tanque classe A é de 5,5 mm/dia (Santos, 2008).

O solo na área da bacia é raso e o subsolo é derivado do embasamento cristalino. Dentre as manchas de solos encontradas na área da bacia poderão ser citados as

seguintes: Luvissole Crômico Vértico (Bruno Não-Cálcico Vértico), o Vertissolo Cromado Órtico (Vertisol) e o Neossolo Lítico (Solo Litólico), ocorrendo em 55,6%, 22,4% e 7,9% da área, respectivamente. Ocupando áreas menores ainda ocorrem os Cambissolo Háplico (Cambisol), Neossolo Flúvico (Solo Aluvial), Planossolo Háplico (Planosol Solódico) e Afloramentos de rocha associados a Neossolo Lítico (Chaves et al., 2002).

Segundo Chaves et al., (2002) na BESJC, foram identificadas vegetação do tipo caatinga, a algaroba e as áreas de cultivo (culturas anuais e campos de palma); sendo a maior parte das terras, 74,9%, o que corresponde a 1005,65 ha, ocupada pela vegetação nativa que é utilizada, tradicionalmente, como área de pastoreio e reserva de lenha e madeira.

4.2.3 As Unidades Experimentais da BESJC

A BESJC possui atualmente, duas parcelas de erosão (P1 e P2), três microbacias (M1, M2 e M3) e quatro sub-bacias (SB1, SB2, SB3 e SB4). Para realização desse trabalho foram utilizados os dados de escoamento superficial e produção de sedimentos das três microbacias, e de duas sub-bacias (SB1 e SB2). A seguir são apresentadas as principais características das unidades experimentais utilizadas.

4.2.3.1 Microbacias

No ano 2000, foi instalada a primeira microbacia (M1). No ano de 2001 foram instaladas as microbacias 2 e 3 (M2 e M3), objetivando o estudo dos processos hidrossedimentológicos em bacias aninhadas e o efeito de escala sobre os processos estudados. No exutório da M1 foi adaptada uma fossa de sedimentos em fibra de vidro, e na lateral da fossa um linígrafo para registrar a variação do nível de água no seu interior e também o volume que passa pelo vertedor da mesma. Nas microbacias 2 e 3, também foram instaladas fossas de sedimentos e linígrafos, iguais a M1, porém, construídas em alvenaria.

As características de declividade e cobertura vegetal de cada microbacia são apresentadas na Tabela 4.3. As Figuras, 4.11 e 4.12 apresentam os modelos digitais dessas unidades experimentais.

Tabela 4.3- Características das microbacias da BESJC (Paiva, 2008)

Microbacia	Área (ha)	Declividade Média (%)	Perímetro	Cobertura Vegetal
M1	0,18	7,5	175	Com resto de caatinga
M2	0,16	9,75	209	Com resto de caatinga
M3	1,63	6,75	533	Com resto de caatinga

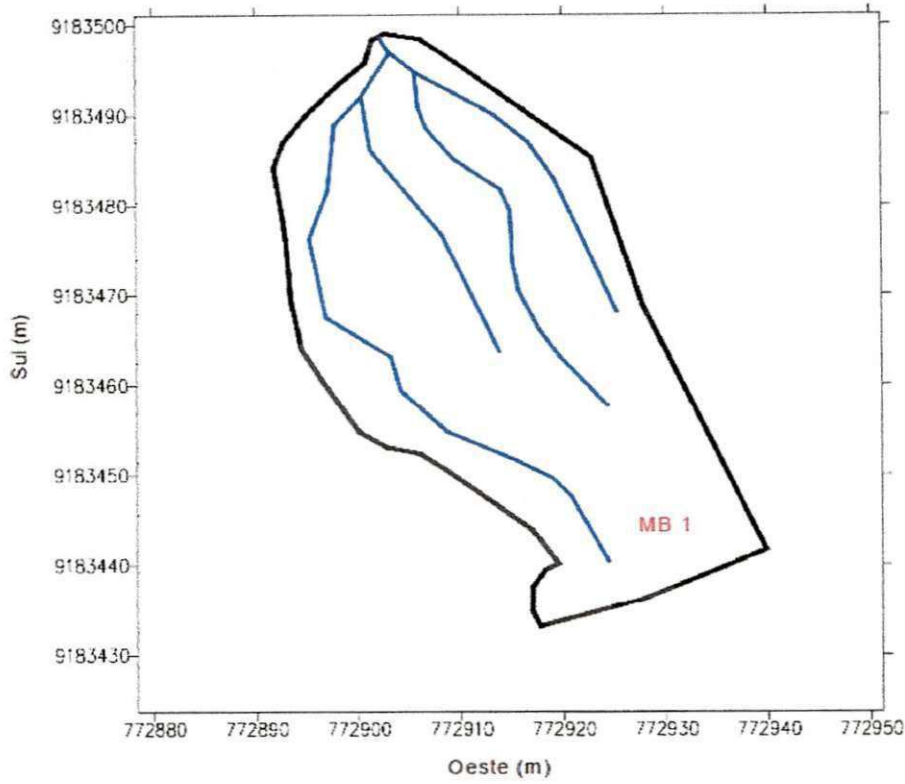


Figura 4.11 – Delimitação da microbacia M1 da BESJC
Fonte: Santos, 2008

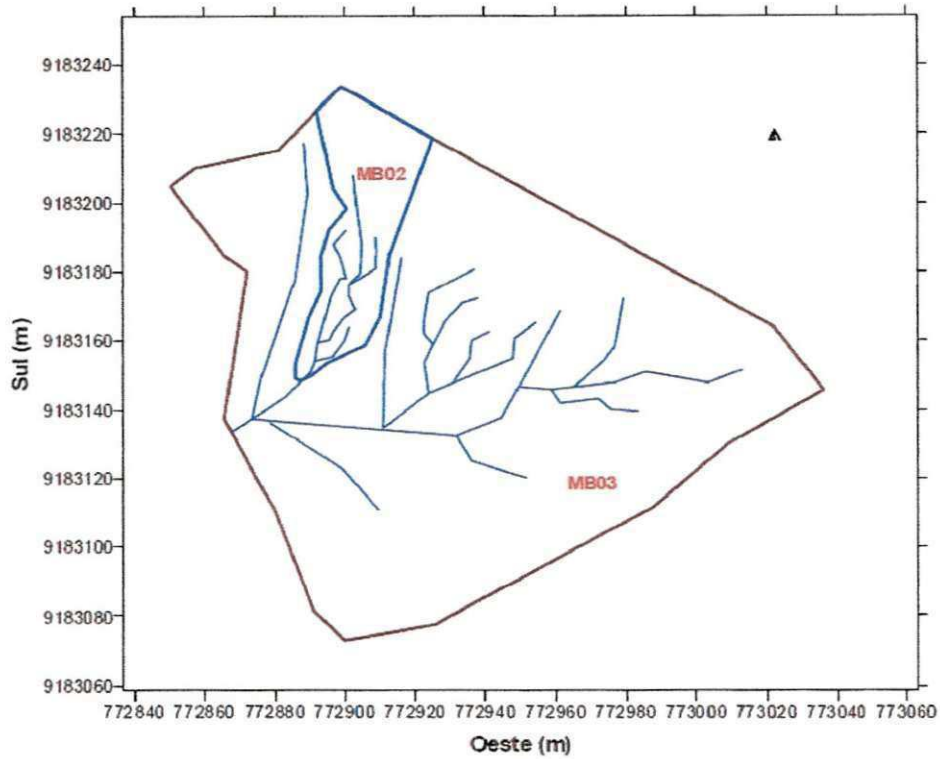


Figura 4.12 – Delimitação das microbacias M2 e M3 da BESJC
Fonte: Santos, 2008

4.2.3.2 Sub-bacias

Quatro sub-bacias foram delimitadas dentro da bacia do Riacho Namorados. Duas delas foram instaladas em 1987(SB1 e SB2), instrumentadas com réguas linimétricas, réguas de máxima e linígrafos, para medição do nível de água, associados à vertedores, possibilitando a determinação da vazão do escoamento. Posteriormente, em 2004, mas duas outras sub-bacias (SB3 e SB4) foram instaladas, aumentando o número de dados para análise. Neste trabalho utilizamos os dados das sub-bacias 1 e 2 (Figura 4.14). A Figura 4.13 apresenta a Bacia dos Namorados e suas sub-bacias.

A sub-bacia 1 possui uma área de 0,59 km², e a sub-bacia 2 uma área de 0,32 km². A SB2 apresenta uma vegetação nativa bem mais conservada, em relação a SB1.

Nas sub-bacias 1 e 2, dados relativos a escoamento superficial têm sido coletados desde a década de 80 e de produção de sedimento, a partir de 2004. O registro das variações de nível nos vertedores das sub-bacias 1, e 2 tem sido efetuado através de linígrafos convencionais (com relojoaria). Neste, a variação de nível ao longo do tempo é registrada em diagramas (linigrama) que tem uma autonomia de um mês. (Aragão, 2006).

Para as sub-bacias 3 e 4, a variação de nível é detectada através de uma sonda de ultra-som, que verifica, a intervalos regulares, as variações de nível no interior dos vertedores e envia esta informação para um módulo armazenador (Aragão, 2006).

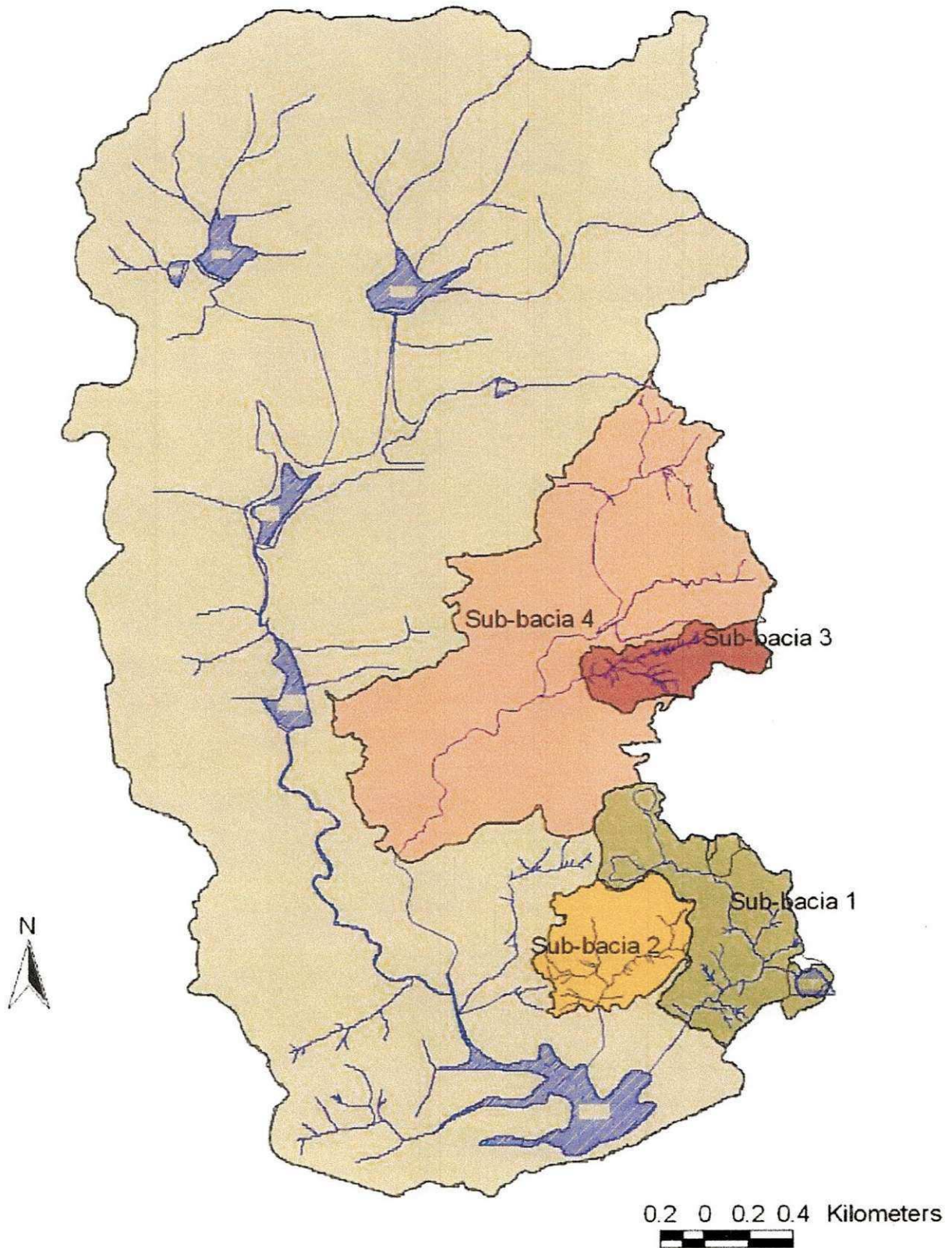


Figura 4.13 – Bacia do Riacho Namorados (BRN) e suas sub-bacias (Aragão, 2006)

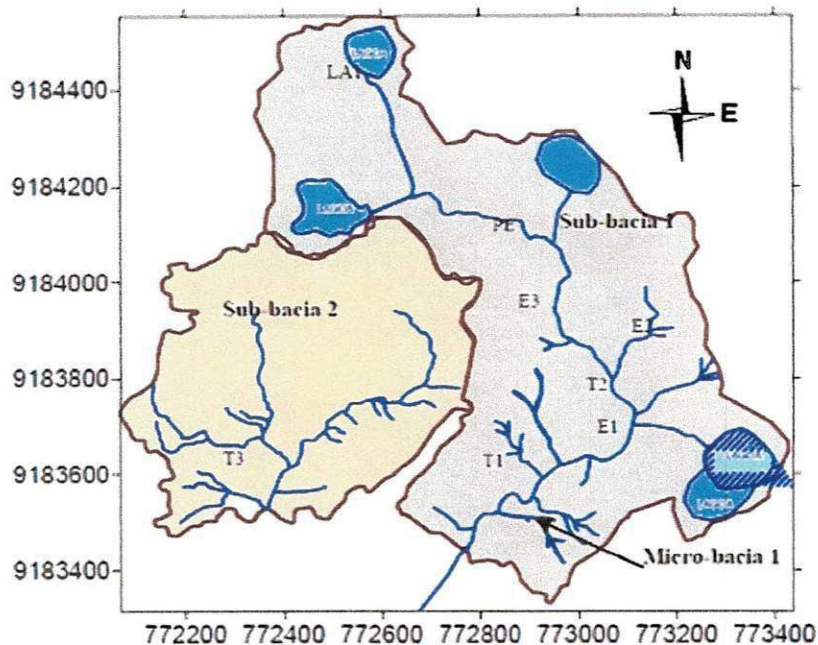


Figura 4.14 – Sub-bacias 1 e 2 da BRN (Aragão, 2006)

4.3 Dados Disponíveis e Utilizados

Na Bacia Experimental de Sumé os dados hidrossedimentológicos foram coletados no período de 1982 a 1997 totalizando 284 eventos de precipitação que geraram lâmina e erosão nas unidades experimentais (parcelas e microbacias). Neste trabalho foram empregados os dados de lâminas escoadas e cargas de sedimentos observados nos anos de 1984, 1985 e 1986, envolvendo anos variando de baixo índice pluviométrico (1984) a muito chuvoso (1985), o que permitiu a análise do efeito das diferentes condições de chuva. Os dados estão organizados no livro *Bacia Experimental de Sumé: Descrição e Dados Coletados* (Srinivasan, V. S. e Galvão, C. O; 2003).

Na Bacia Experimental de São João do Cariri os dados disponíveis são a partir de 1985, sendo que os dados utilizados foram os dados observados de lâmina e produção de sedimentos referentes aos anos de 2002, 2003 e 2004 para as microbacias, e aos anos de 2004, 2005 e 2006 para as subbacias 1 e 2. De forma semelhante a BES, os anos escolhidos apresentavam totais precipitados distintos, que permitiu a análise das diferentes condições de chuva. Os dados foram obtidos através do financiamento dos projetos: IBESA- Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido (Srinivasan et al., 2004) e BEER – Bacias Experimentais e Representativas do Nordeste (Projeto FINEP/UFCG).

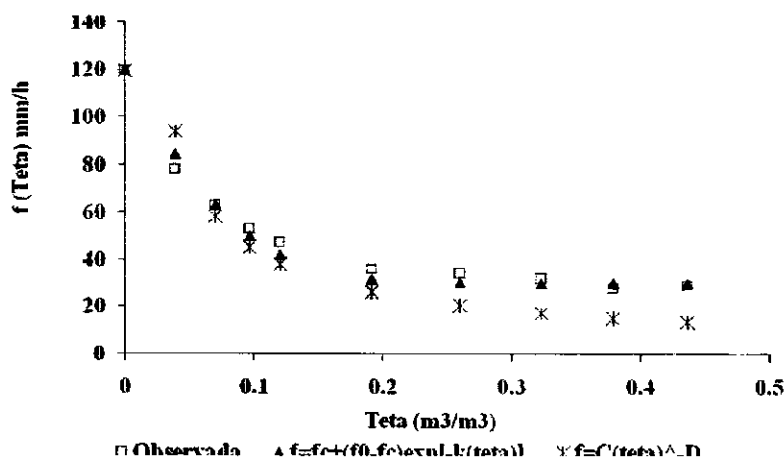
As pesquisas realizadas nessas duas bacias experimentais têm contribuído significativamente para o entendimento dos processos hidrossedimentológicos em áreas semiáridas, principalmente na região do cariri paraibano.

CAPÍTULO V – MODELAGEM E RESULTADOS

5.1 Bacia Experimental de Sumé

5.1.1 Modelagem do Escoamento

As quatro microbacias (M1, M2, M3 e M4) foram modeladas em 20 sub-bacias com áreas iguais para simplicidade. Suas características tais como, altitudes máximas e mínimas, extensões de trechos de rios de cada microbacia e sub-bacias e texturas do solo foram informadas ao programa em arquivos específicos. As proporções de cobertura foram fixadas em 0,8 (C_g), 0,05 (C_r) para as áreas vegetadas e para as áreas desmatadas, $C_g = C_r = 0,0$. Com base em modelagem, Figueiredo (1998) e Medeiros et al (2009) obtiveram a capacidade de armazenamento da folhagem em áreas semiáridas da ordem de 0,5 mm, sendo este valor adotado neste trabalho para a interceptação. Foram fixadas as larguras de todos os trechos de rios como sendo 0,50 m. Dados de evaporação potencial (E_p) observados em tanques evaporimétricos foram considerados no cálculo da evapotranspiração potencial com coeficiente de consumo unitário. Para a evapotranspiração real, α (Equação 3.1) foi fixado em 10 (Figueiredo et al, 2006). A tensão do solo foi calculada através da Equação 3.4, com A e B em termos dos percentuais de argila e areia (Saxton et al., 1986) das camadas do solo, 15,77% e 50,2% camada A, 32,5% e 50,2% camadas B e C (Cadier e Freitas, 1982) cujas espessuras foram fixadas em $h_A = 10$ cm, $h_B = h_C = 20$ cm. A equação de Saxton et al (1986) e a Equação 3.14 com $\eta = -1/B$, foram utilizadas para o cálculo das condutividades saturada e não saturada. A umidade do ponto de murcha (obtida da Equação 3.4) teve seu valor adotado como umidade inicial e a umidade de saturação $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$, com $f_{ar} = 0,91$ (camada A) e 0,8 (camadas B e C), sendo a porosidade determinada com base na textura dos solos (Rawls & Brakensiek, 1989). A capacidade de infiltração (equação 3.2) foi estimada com os parâmetros $C = 7$ e $D = 0.8$ ajustados a partir da curva de capacidade de infiltração experimental (Figura 5.1) obtida com dados publicados em Cadier & Freitas (1982).



Não foi considerada a contribuição subterrânea para o escoamento total porque as bacias estudadas apresentam solos bastante rasos e com baixa capacidade de armazenamento, não havendo ocorrência de lençol subterrâneo. O método Convexo do SCS (McCuen, 1982) foi utilizado como procedimento para propagação do escoamento com tempo de concentração determinado pelo método de Kirpich que depende do comprimento (L) e da declividade da bacia dada pela razão entre a variação de cota e o comprimento, i.e $\Delta h/L$. O coeficiente de Manning foi fixado em $n = 0,02$ para os canais das microbacias desmatadas e $n = 0,03$ para os canais das microbacias vegetadas. Os intervalos de tempo no cálculo da propagação do escoamento foram fixados menores do que o tempo de concentração t_c para evitar vazões negativas e calibrar $C = \Delta t/t_c$ comparando as lâminas anuais observadas com as lâminas anuais simuladas, e posteriormente foi realizada a calibração de $C = \Delta t/t_c$ comparando os picos de escoamento observados e simulados.

5.1.2 Modelagem da Erosão do Solo

Após a modelagem do escoamento, foi realizada a calibração dos coeficientes de erosividade da chuva e do escoamento com base na comparação da carga anual de sedimentos simulada com a carga anual de sedimentos observada, além da calibração desses coeficientes através da comparação das erosões máximas observadas e simuladas para os anos de 1984, 1985 e 1986. Para a capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento, foi escolhido o método de Engelund-Hansen (Equação 3.26) por se tratar de carga total, com o diâmetro representativo, $D_{50} = 0,4$ mm, obtido de ensaios granulométricos (Figura 5.2).

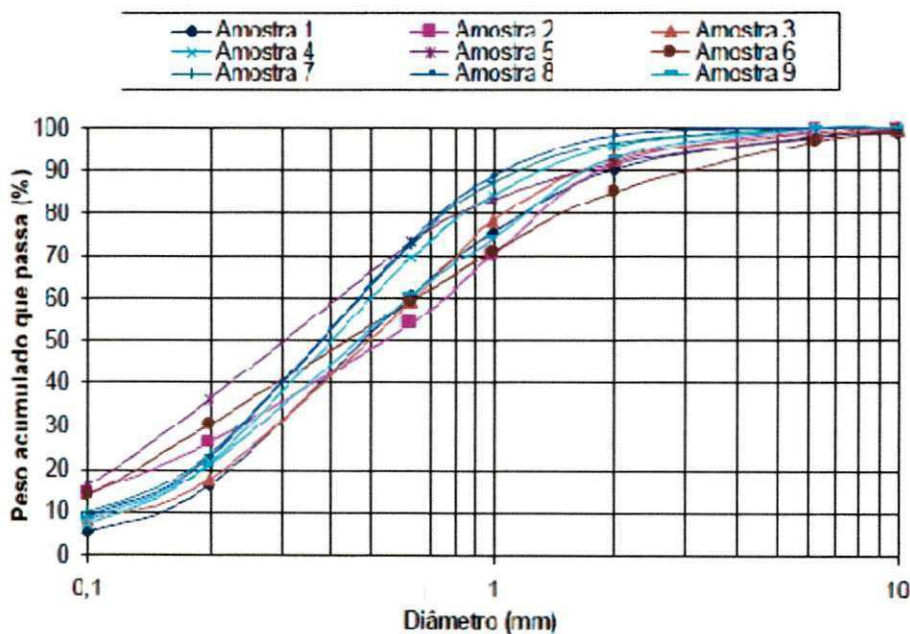


Figura 5.2- Granulometria do Solo Erodido na Microbacia 3 da BRS (Figueiredo, 2009).

5.2 Bacia Representativa de Sumé (BRS)

A modelagem da Bacia Representativa de Sumé foi o trabalho inicial realizado por Figueiredo (2009) utilizando o Modelo MOSEE, o qual foi tomado como base para a presente pesquisa. Ele modelou o escoamento nas bacias de Gangorra, Jatobá e Umburana dividindo cada uma em 20 sub-bacias, e fixando parâmetros do modelo para cada bacia para a simulação do processo de escoamento. Embora não tenham sido observados dados de erosão do solo da BRS, o processo de erosão foi simulado objetivando avaliar a consistência da produção de sedimentos com relação às áreas dessas bacias. Tal modelagem é descrita a seguir.

5.2.1 Parâmetros da bacia de Gangorra (BRS)

A área de Gangorra compreende a área total da BRS (137,4 km²). Devido ao fato das características da bacia serem diferentes ao longo da mesma, a bacia foi dividida em sub-bacias da seguinte forma: quatro na parte superior, doze na parte média e quatro na parte inferior.

A parte superior foi dividida em quatro sub-bacias com 6,7 km² de área cada, a parte média dividida em doze partes com áreas de 8,235 km², e a parte inferior em quatro partes com área de 2,675 km². Os comprimentos dos rios e as elevações máximas de cada sub-bacia são informados em arquivos (tabelas) de leitura do programa. O tempo de concentração foi calculado pelo método de Kirpich (1940). Utilizou-se Saxton et al (1986) para determinação da porosidade das camadas de solo ($\phi = 0,332 - 0,0007251 \cdot \%S + 0,1276 \cdot \log(\%C)$). A umidade de saturação $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$, com $f_{ar} = 0,91$ (camada A), e $f_{ar} = 0,8$ (camadas B e C). A umidade inicial foi tomada igual à umidade no ponto de murcha. A capacidade de infiltração foi determinada pela equação (3.2) com $C = 2,5$ e $D = 1,5$ na parte superior da bacia e $C_i = 7$ e $D_i = 0,8$ na parte inferior. Os parâmetros de infiltração foram alterados nas quatro sub-bacias por que os solos na parte superior da BRS, onde se localiza Jatobá, são altamente permeáveis, profundos e apresentam menor teor de argila na camada superficial. Os percentuais de argila e areia para cada uma das camadas de solo na parte superior da bacia são, 12,0% e 50,2% camada A, 32,5% e 50,2% camadas B e C; e na parte inferior são 32,5% e 50,2% para todas as camadas. A espessura das camadas de solo foi fixada em 50 cm (camada A) e 65 cm (camadas B e C) na parte superior da bacia; e 10 cm (camada A), e 20 cm (camadas B e C) na parte inferior. Os canais apresentam declividades de 0,04 m/m (parte superior) e 0,007 m/m (parte inferior). As proporções de cobertura vegetal foram fixadas em 5% na parte superior e 15% na parte inferior; e as proporções de cobertura por rochas foram fixadas em 5% na parte superior e 15% na parte inferior. A condutividade hidráulica saturada foi calculada por Cosby et al (1984) e a condutividade hidráulica não saturada com o Método de Brooks & Corey (1965) com o expoente $\eta = -1/B$. Foram considerados dados observados (tanque evaporimétrico) para evapotranspiração potencial, e a evapotranspiração real determinada pela equação (3.1)

com $\alpha = 10$. Adotou-se um coeficiente de Manning de 0.03. Finalmente, a equação de Engelund & Hansen (1967) foi utilizada para calcular a capacidade de transporte pelo fluxo, com um diâmetro representativo do sedimento $D_{50} = 0.5$ mm.

5.2.2 Parâmetros da bacia de Jatobá

A bacia de Jatobá possui uma área de 26,8 km², sendo localizada em uma área de solos altamente permeáveis. A bacia foi dividida em 20 sub-bacias com áreas iguais (1,34 km²) e com rios apresentando comprimento total de 13,9 km. A parte superior da bacia tem altura de 780 m, e a parte inferior 600 m. O tempo de concentração foi calculado com o método de Kirpich, a propagação do escoamento ao longo do trecho de rio foi feita pelo método Convexo do SCS (McCuen, 1982) e foi adotado um intervalo de tempo de 20 minutos. A porosidade foi calculada com a equação de Saxton et al (1986). A umidade de saturação $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$, com $f_{ar} = 0,91$ (camada A), e $f_{ar} = 0.8$ (camadas B e C). A umidade inicial foi tomada igual à umidade no ponto de murcha. A capacidade de infiltração foi determinada pela equação (3.2) com $C = 2,5$ e $D = 1,5$. Os solos da bacia de Jatobá apresentam na camada A, 12,0% de argila e 50,2% de areia; e nas camadas B e C, 32,5 de argila e 50,2% de areia. Foram utilizadas as equações de Cosby et al (1984) para cálculo da condutividade hidráulica saturada e Brooks & Corey (1965) para determinação da condutividade hidráulica não saturada. Divide-se o solo da bacia em três camadas, com espessuras de 50 cm (camada A) e 65 cm (camadas B e C). Para a evapotranspiração potencial adotou-se dados observadas, e para determinação da evapotranspiração real utilizou-se a equação (3.1) com $\alpha = 10$. Adotou-se um coeficiente de Manning $n = 0.03$. Os canais possuem declividades médias de 0,045 m/m, e largura média de 10 m. A capacidade de transporte pelo fluxo foi calculada pela equação de Engelund & Hansen (1967) com um diâmetro representativo dos sedimentos $D_{50} = 0.5$ mm.

5.2.3 Parâmetros da bacia de Umburana

A bacia de Umburana possui uma área de 10,7 km², e foi dividida em 20 sub-bacias com áreas iguais (0,535 km²). Os rios apresentam um comprimento total de 8,0 km. Possui uma altitude máxima de 594 m e uma altitude mínima de 540 m. O tempo de concentração foi calculado com o método de Kirpich, a propagação do escoamento ao longo do trecho de rio foi feita pelo método Convexo do SCS (McCuen, 1982) e foi adotado um intervalo de tempo de 10,3 minutos. A porosidade foi calculada com a equação de Saxton et al (1986). A umidade de saturação $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$, com $f_{ar} = 0,91$ (camada A), e $f_{ar} = 0.8$ (camadas B e C). A umidade inicial foi adotada igual à umidade no ponto de murcha. A capacidade de infiltração foi determinada pela equação (3.2) com os parâmetros $C_i = 7.0$ e $D_i = 0.8$. O solo da bacia apresenta a seguinte textura, camada A, 12,0% de argila e 50,2% de areia; e camadas B e C, 32,5 de argila e 50,2% de areia. A equação de Brooks & Corey (1964) foi utilizada para o cálculo da condutividade hidráulica não saturada, e a equação de Cosby et al (1984) ($K_s = 3.6 \times 10^6 \times 0,00000705556 \times 10^{[-0,6 + 0,0126(\%S) - 0,0064(\%C)]}$) foi utilizada para o cálculo da

condutividade hidráulica saturada e. As camadas de solo apresentam as espessuras de 10 cm (camada A) e 20 cm (camadas B e C). Para a evapotranspiração potencial foram utilizados dados observados, e para determinação da evapotranspiração real utilizou-se a equação (3.1) com $\alpha = 10$. Adotou-se um coeficiente de Manning $n = 0.03$. Os rios em Umburana apresentam as mesmas características que Jatobá, ou seja, declividades médias de 0,045 m/m, e largura média de 10 m. De forma semelhante as outras bacias, a capacidade de transporte pelo fluxo foi calculada pela equação de Engelund & Hansen (1967) com o mesmo diâmetro representativo dos sedimentos de $D_{50} = 0,5$ mm.

5.3 Bacia Experimental de São João do Cariri

5.3.1 Modelagem do Escoamento

As três microbacias (M1, M2 e M3) e as duas sub-bacias (SB1 e SB2) selecionadas nesse trabalho foram da mesma forma que as unidades experimentais utilizadas em Sumé, modeladas em 20 sub-bacias com áreas iguais para simplicidade. Em arquivos específicos do programa foram informados as características dessas unidades experimentais tais como, altitudes máximas e mínimas, extensões de trechos de rios de cada microbacia e sub-bacias e texturas do solo. Por estarem inseridas em uma região semiárida, foi adotada a mesma capacidade de armazenamento da folhagem (0,5 mm) utilizada em Sumé. A proporção de cobertura vegetal foi fixada em 20% para a microbacia M1 e em 40% para as microbacias M2 e M3; e a proporção de cobertura de rochas foi fixada em 2% para todas as microbacias. No caso das sub-bacias, a proporção de cobertura vegetal foi fixada em 50% (SB1, SB2), e a proporção de cobertura de rochas de 5% (SB1 e SB2).

As larguras de todos os trechos de rios foram fixadas em 0,50 m para as microbacias; e em 3,0 m para as sub-bacias. Com base na discretização da sub-bacia 1 em 87 elementos, e da sub-bacia 2 em 54 elementos (Santos, 2008) determinou-se a declividade média das sub-bacias, e, os comprimentos e declividades dos rios, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Declividade média da bacia, declividade e comprimento dos rios

	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2
Declividade da Bacia (m/m)	0,052	0,039
Declividade dos Rios (m/m)	0,050	0,030
Comprimento dos Rios (km)	2,62	2,12

Fonte: Adaptado de Santos (2008)

Para o cálculo da evaporação potencial (E_p) foram considerados os dados observados em tanque evaporimétrico com coeficiente de consumo unitário. No cálculo da evapotranspiração real foi utilizado a Equação 3.1, com α fixado em 10 (Figueiredo et al, 2006). Utilizou-se a Equação 3.4 para o cálculo da tensão do solo, com os

parâmetros A e B determinados em termos dos percentuais de argila e areia (Saxton et al., 1986) das camadas do solo para cada uma das microbacias (ver Tabela 5.2), sendo para as sub-bacias adotadas a textura do solo da microbacia M1. As espessuras das camadas de solo foram fixadas em $h_A = 10$ cm, e $h_B = h_C = 20$ cm.

Tabela 5.2 – Textura do solo das microbacias (BESJC)

Camada	Microbacia 1		Microbacia 2		Microbacia 3	
	Argila (%)	Areia (%)	Argila (%)	Areia (%)	Argila (%)	Areia (%)
A	15,0	72,5	12,7	70,7	13,3	71,9
B	33,0	54,7	24,0	65,3	26,7	62,3
C	33,0	54,7	24,0	65,3	26,7	62,3

As condutividades hidráulicas, saturada e não saturada, foram calculadas com base na equação de Saxton et al (1986) e na Equação 3.4 com $\eta = -1/B$ respectivamente. A umidade inicial foi adotada como sendo igual a umidade no ponto de murcha (obtida da equação 3.4) e a umidade de saturação $\theta_s = f_{ar} \cdot \phi$, com $f_{ar} = 0,91$ (camada A) e 0,8 (camadas B e C), com a porosidade calculada com a equação de Rawls & Brakensiek, (1989) com base na textura dos solos. Por não dispormos de ensaios de infiltração do solo em São João do Cariri, para estimar a capacidade de infiltração (Equação 3.2) utilizamos os parâmetros $C = 7$ e $D = 0,8$ adotados da curva de capacidade de infiltração experimental de Sumé (Figura 5.1).

Da mesma forma que para Sumé, não foi considerado a contribuição do lençol para o escoamento total, visto que os solos possuem as mesmas características, ou seja, apresentam pequena espessura e baixa capacidade de armazenamento. Utilizou-se o método Convexo do SCS (McCuen, 1982) como procedimento para propagação do escoamento com tempo de concentração calculado pelo método de Kirpich em função do comprimento (L) e da declividade da bacia dada pela razão entre a variação de cota e o comprimento, i.e $\Delta h/L$. Fixou-se o coeficiente de Manning em $n = 0,03$ para os canais nas três microbacias e nas duas sub-bacias. Finalmente, calibrou-se o coeficiente de propagação do escoamento C pela comparação da lâmina anual observada e simulada, e, pela comparação dos picos de escoamentos observados e simulados nos anos de 2002, 2003 e 2004 para as microbacias e nos anos de 2004, 2005 e 2006 para as sub-bacias.

5.3.2 Modelagem da Erosão do Solo

Nesta etapa do trabalho foram calibrados os coeficientes de erosividade da chuva e do escoamento com base na comparação da produção anual de sedimentos observada e simulada, e também, com base na comparação da erosão máxima observada e simulada, para todos os anos simulados. Para determinação da capacidade de transporte de sedimentos pelo fluxo, foi escolhido o método de Engelund-Hansen (Equação 3.26) com o diâmetro representativo, $D_{50} = 0,30$ mm, obtido de ensaios granulométricos do sedimento erodido nas microbacias estudadas (Figura 5.3), e sendo este valor adotado na modelagem da erosão do solo nas sub-bacias selecionadas

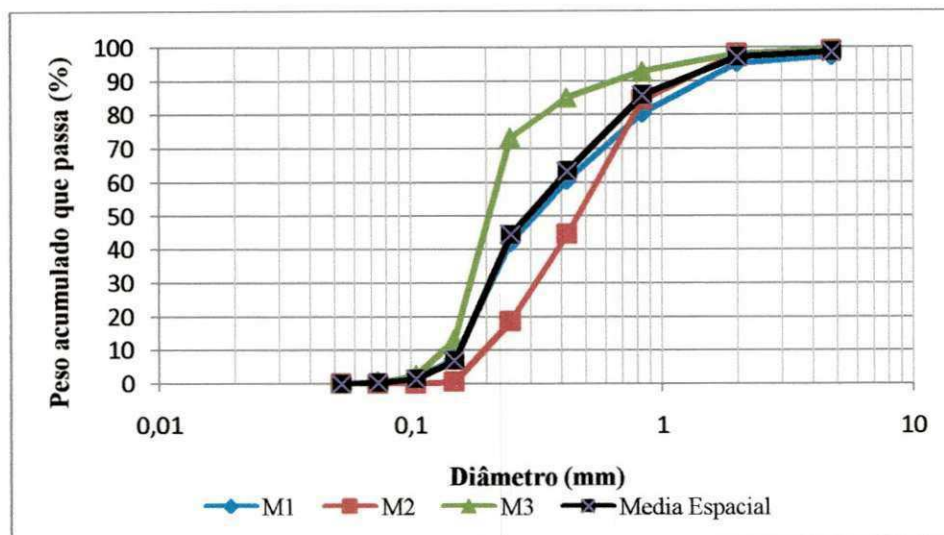


Figura 5.3 – Granulometria do Solo Erodido nas Microbacias da BESJC. Cheia 82 (12/02/2002)

5.4 Calibração e Validação

Segundo Campos (2009) calibração consiste em selecionar um período com existência de dados observados e procurar qual o conjunto de parâmetros que melhor ajustam os resultados observados com os resultados no modelo. Davi (2004) descreve validação como sendo o processo de verificar se os parâmetros do modelo representam bem o sistema da bacia hidrográfica e se o modelo é capaz de representar os processos considerados.

Com os dados observados nas microbacias (M1, M2, M3 e M4) no ano de 1986, em Sumé, foi realizada uma primeira calibração, de alguns parâmetros (ver Tabela 5.4), do modelo MOSEE. Os intervalos de tempo no cálculo da propagação do escoamento foram fixados menores do que o tempo de concentração t_c para evitar vazões negativas e realizar uma primeira calibração de $C = \Delta t/t_c$ com base na comparação da lâmina anual simulada com a observada no ano de 1986. Após a modelagem do escoamento, os coeficientes de erosividade da chuva e do escoamento passaram por uma primeira calibragem com base na comparação da carga anual simulada com a observada. Os resultados obtidos estão resumidos nas Tabelas 5.3 e 5.4, onde $L_{o,s}$ e $E_{o,s}$ são as lâminas e erosões observadas e simuladas e $L_{o,s(max)}$ os picos máximos (em lâmina).

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados da modelagem (ano de 1986) – BES

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2	Sedimentos (t)		R^2
	L_o	L_s	$L_{o(max)}$	$L_{s(max)}$		E_o	E_s	
M1	28,41	37,17	25,53	13,85	0,700	0,56	0,49	0,416
M2	58,21	95,19	51,71	32,64	0,688	0,98	0,83	0,377
M3	263,16	251,67	94,24	80,64	0,842	17,61	16,42	0,497
M4	269,72	264,34	76,56	78,84	0,881	10,85	15,23	0,358

Tabela 5.4 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) - BES

Microbacia	Δh (m)	L(km)	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	K_r (s ² /kg.m ²)	K_f (kg/m ² .s)
M1	0,55	$7,5 \times 10^{-3}$	0,16	0,2512	0,776	1,0	0,00010
M2	0,45	$7,5 \times 10^{-3}$	0,21	0,2713	0,774	1,0	0,00010
M3	0,425	$6,0 \times 10^{-3}$	0,195	0,2145	0,909	6,0	0,00025
M4	0,40	$6,0 \times 10^{-3}$	0,197	0,2194	0,898	6,0	0,00025

Δh = variação de cota da bacia; L = comprimento da bacia; Δt = intervalo de cálculo da propagação

A seguir são apresentados graficamente os resultados obtidos na microbacia M3 no ano de 1986, para essa primeira calibração. Os gráficos das demais microbacias encontram-se em anexo (Figuras A1 a A12).

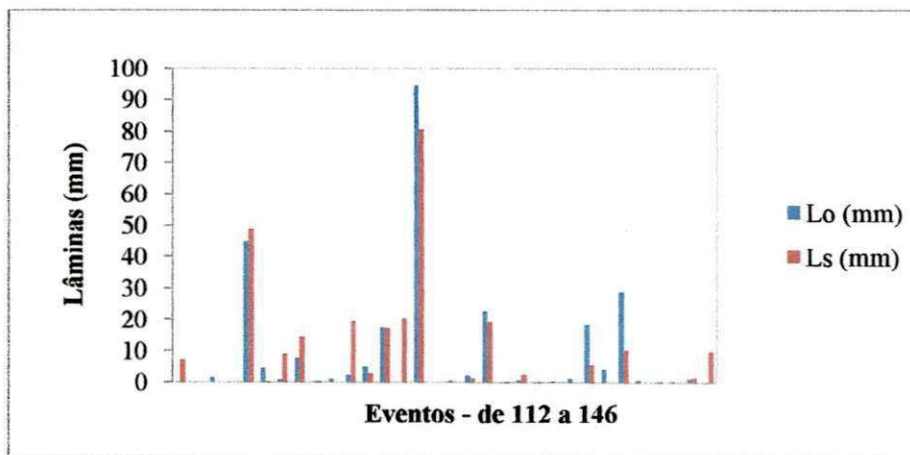


Figura 5.4 – Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986)

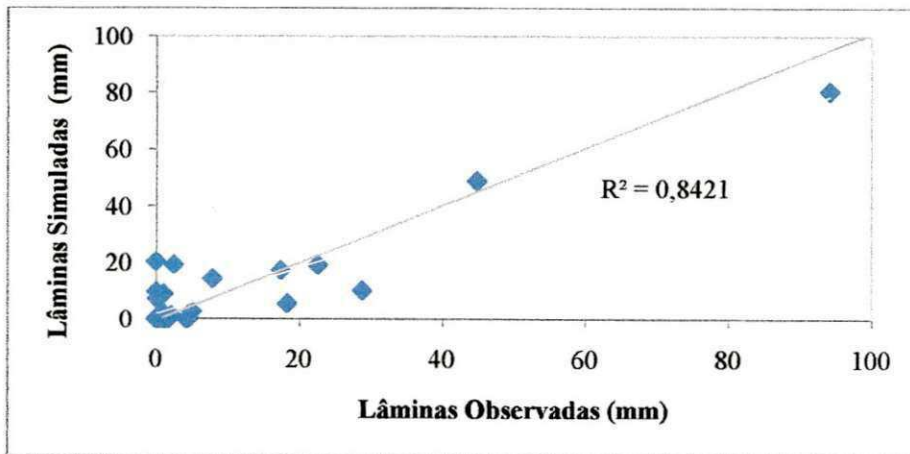


Figura – 5.5 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1986)

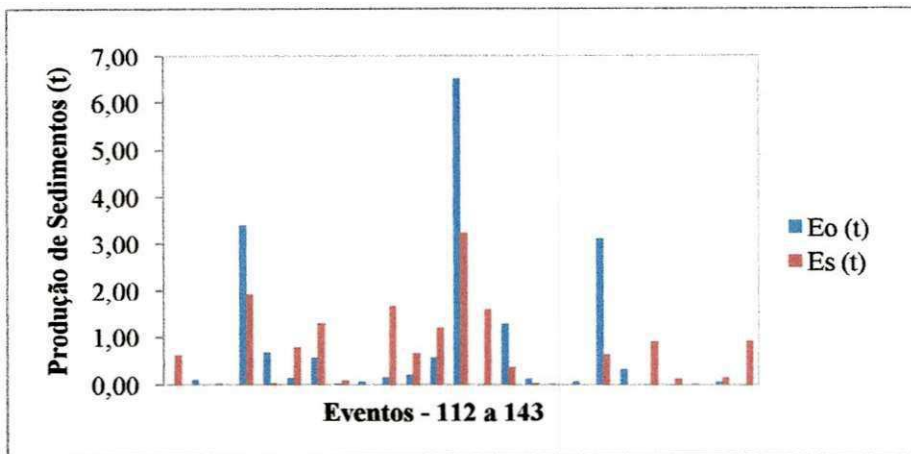


Figura 5.6 – Erosão Observada e Simulada - M3 (1986)

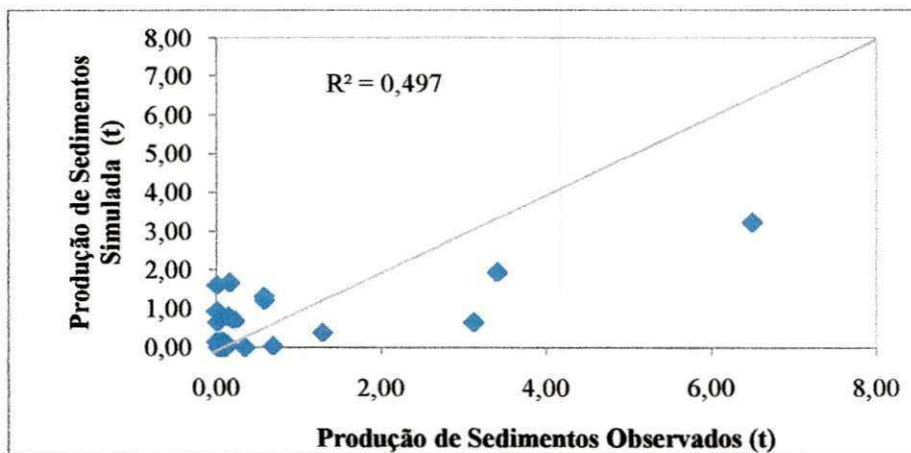


Figura – 5.7 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1986)

Para validação do modelo foi utilizado os parâmetros calibrados, ou seja, coeficiente de propagação do escoamento (C) e coeficientes de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) com os dados de 1986, e o modelo foi utilizado com os dados de chuva dos anos de 1984 e 1985. As figuras 5.8 a 5.15 apresentam os resultados de escoamento e erosão do solo obtidos na microbacia 4 para o anos de 1984 e 1985. As Figuras A.13 a A.24 (no Anexo A) apresentam os gráficos com os resultados nas demais microbacias para o ano de 1984 e as Figuras A.25 a A.36 os resultados para o ano de 1985.

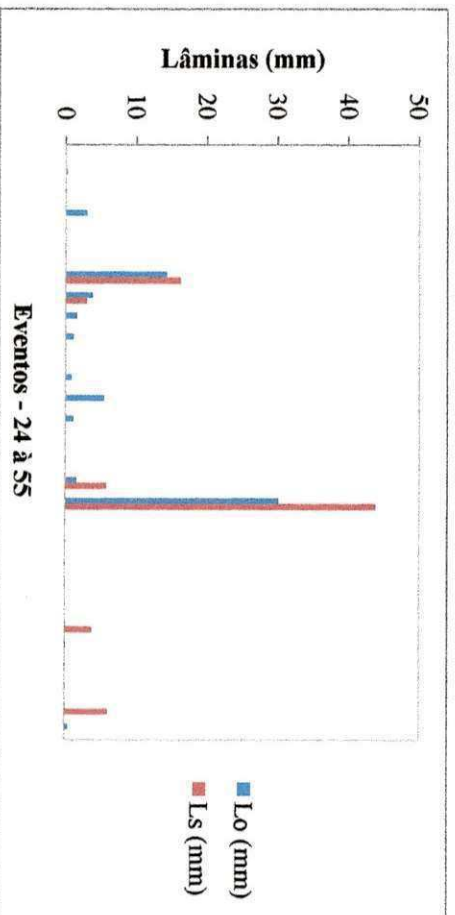


Figura 5.8 – Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984)

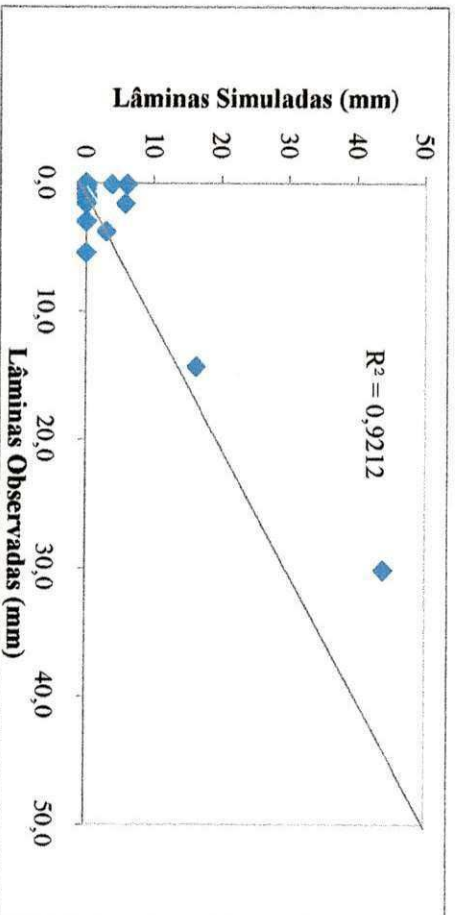


Figura 5.9 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1984)

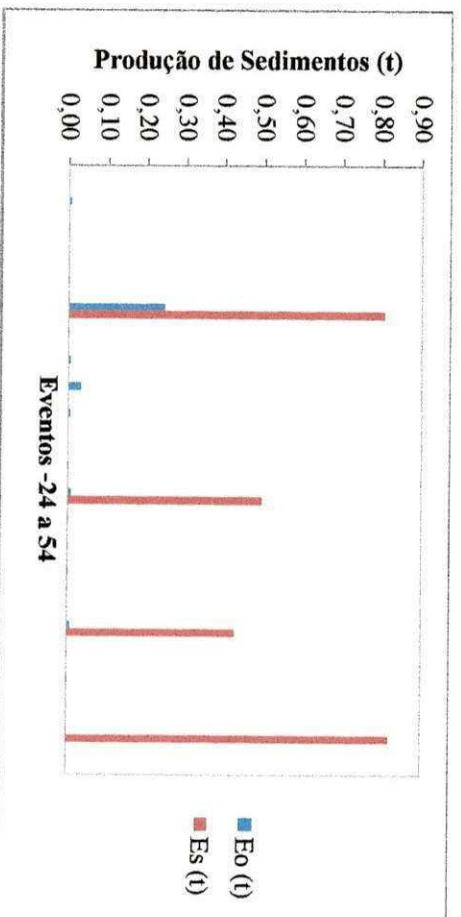


Figura 5.10 – Produção de Sedimentos Observada e Simulada - M4 (1984)

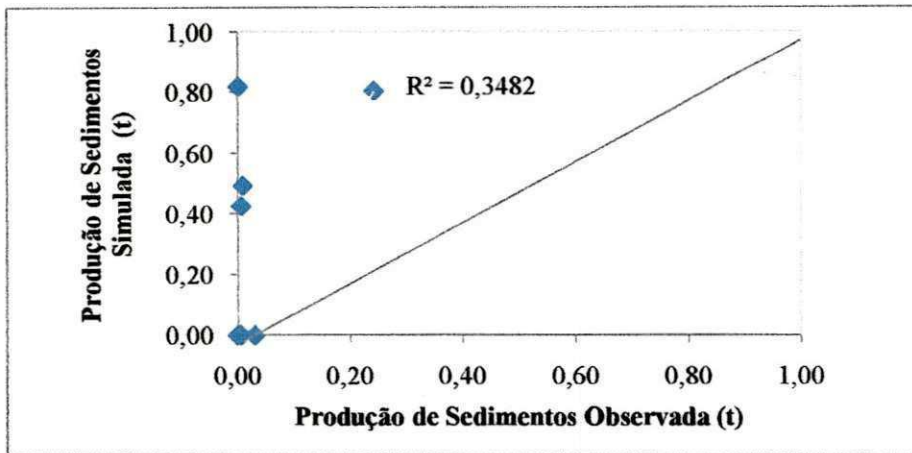


Figura 5.11 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1984)

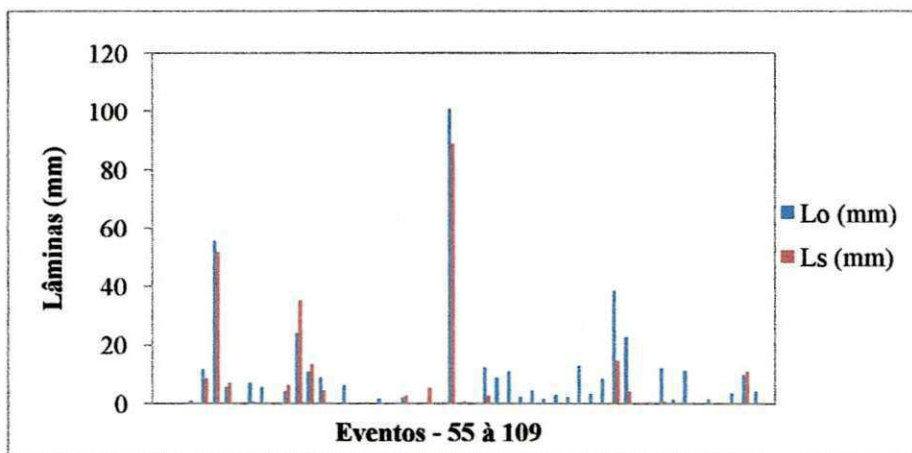


Figura 5.12 – Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985)

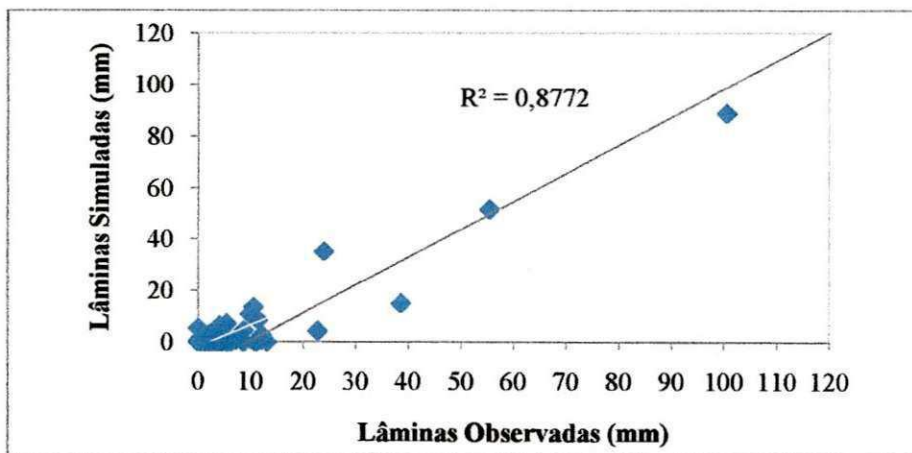


Figura 5.13 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1985)

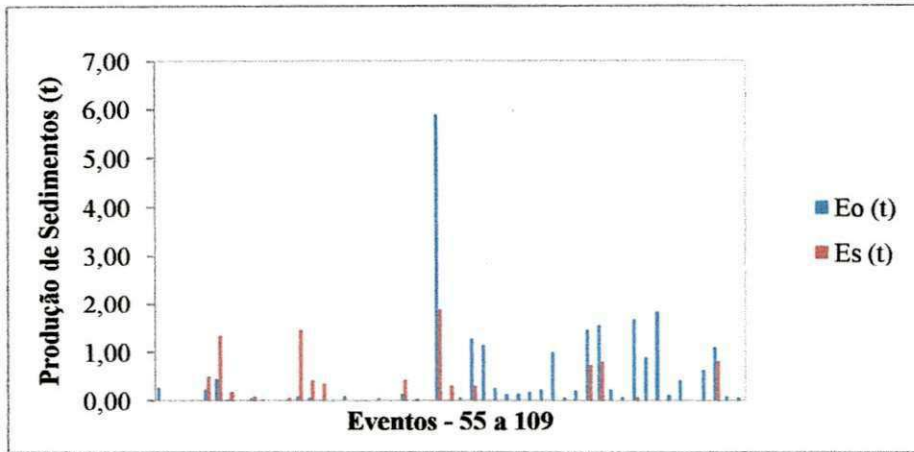


Figura 5.14 – Erosão Observada e Simulada - M4(1985)

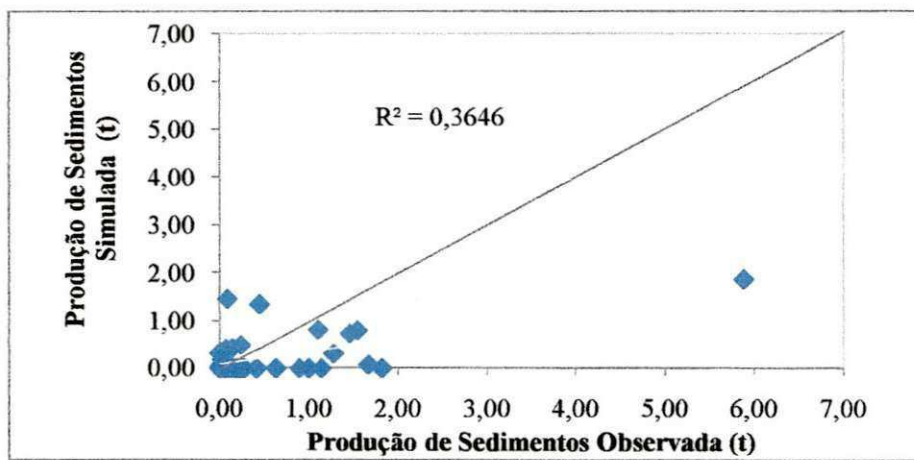


Figura 5.15 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1985)

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam um resumo dos resultados de lâmina, picos e sedimentos para os anos de 1984 e 1985 com a utilização dos parâmetros (C e K_r) calibrados com o ano de 1986 nas microbacias inseridas na BES.

Tabela 5.5 – Resumo dos resultados da validação (ano de 1984) -BES

Bacia	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2	Sedimento (t)		R^2
	L_o	L_s	$L_o(\text{máx})$	$L_s(\text{máx})$		E_o	E_s	
M1	5,14	14,06	4,74	8,23	0,896	0,0038	0,1081	0,678
M2	18,25	34,26	18,14	19,66	0,861	0,0007	0,2101	0,514
M3	123,19	77,42	39,40	44,85	0,871	2,3818	1,8838	0,010
M4	63,79	78,60	30,18	43,85	0,921	0,3069	2,5439	0,348

Tabela 5.6 – Resumo dos resultados da validação (ano de 1985) - BES

Bacia	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R ²	Sedimento (t)		R ²
	L _o	L _s	L _{o(max)}	L _{s(max)}		E _o	E _s	
M1	65,23	47,79	41,11	17,45	0,819	0,0464	0,5828	0,683
M2	60,74	42,19	27,53	23,06	0,008	0,1244	0,4366	0,123
M3	466,13	262,54	85,52	90,85	0,892	22,9026	11,8176	0,396
M4	417,84	256,71	100,54	88,82	0,877	22,2731	9,8071	0,365

No caso das microbacias inseridas na Bacia Experimental de São João do Cariri foram escolhidos os anos de 2002, 2003 e 2004. Atribuiu-se inicialmente valores para os coeficientes de propagação do escoamento (C) e de erosividade da chuva (K_r), sendo esses valores utilizados na simulação do escoamento e erosão nos três anos (ver Tabela 5.7). Os resultados obtidos pelo modelo sem calibração desses parâmetros estão resumidos nas Tabelas 5.8 a 5.10 e são apresentados graficamente em anexo, onde as Figuras A.37 a A.48 apresentam os resultados para o ano de 2002, as Figuras A.49 a A.60 os resultados de 2003, e as Figuras A.61 a A.72 os resultados para o ano de 2004.

Tabela 5.7 - Coeficientes de propagação ($C = \Delta t/t_c$) por trecho de rio, de erosividade da chuva (K_r) e do escoamento (K_f) - BESJC

Microbacias	$\Delta h(m)$	L(km)	$\Delta t(min)$	t _c (min)	C(-)	K _r (s ² /kg.m ²)	K _f (kg/m ² .s)
M1	0,0675	0,0090	0,160	0,2867	0,558	3,0	0,00020
M2	0,2050	0,0030	0,120	0,1275	0,941	4,0	0,00020
M3	1,5250	0,0216	0,160	0,577	0,277	4,0	0,00020

Δh = variação de cota da bacia; L = comprimento da bacia; Δt = intervalo de cálculo da propagação

Tabela 5.8 – Resultados sem calibração (ano de 2002) - BESJC

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		Sedimento (t)	
	L _o	L _s	L _{o(max)}	L _{s(max)}	E _o	E _s
M1	78,94	19,36	22,78	5,75	0,0921	0,8799
M2	5,11	117,04	1,71	37,19	0,0051	0,5914
M3	1,50	2,97	0,46	0,91	0,0185	3,3623

Tabela 5.9 – Resultados sem calibração (ano de 2003) - BESJC

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		Sedimento (t)	
	L _o	L _s	L _{o(max)}	L _{s(max)}	E _o	E _s
M1	3,75	0,14	1,88	0,14	0,0010	0,1554
M2	2,94	0,70	1,72	0,70	0,0008	0,0188
M3	1,48	0,02	1,19	0,02	0,0044	0,5799

Tabela 5.10 – Resultados sem calibração (ano de 2004) - BESJC

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		Sedimento (t)	
	L _o	L _s	L _{o(max)}	L _{s(max)}	E _o	E _s
M1	87,99	12,46	31,15	3,47	0,1014	0,6082
M2	64,86	50,36	26,28	20,11	0,0480	0,4687
M3	48,94	1,18	16,66	0,46	0,2828	1,1262

5.5 Calibração do Coeficiente de Propagação do Escoamento

Os resultados da componente de erosão do modelo estão diretamente relacionados com os resultados da componente de fluxo. Ou seja, os resultados da produção de sedimentos dependem dos resultados do escoamento gerado pelo modelo hidrológico. Sendo assim, deve-se calibrar inicialmente o coeficiente de propagação do escoamento (C). Esta calibração será feita para cada unidade experimental (microbacias e sub-bacias), para cada ano simulado. No caso das microbacias de Sumé no ano de 1986, com já havia sido feita uma primeira calibração comparando as lâminas anuais observadas e simuladas, fez-se nesta etapa, uma recalibragem objetivando resultados mais precisos. Duas calibrações foram feitas, primeiramente, para ajuste das lâminas anuais escoadas e, depois, para ajuste dos picos de escoamento. No primeiro caso, utilizou-se os primeiros valores atribuídos ao coeficiente C, e, alterando progressivamente o valor desse parâmetro, procura-se fazer com que a lâmina simulada pelo modelo fosse igual, ou muito próxima do valor da lâmina observada; no segundo caso, foi feito o mesmo procedimento, mas procurando igualar ou aproximar os picos calculados dos picos observados. Os resultados são apresentados a seguir.

5.5.1 - Calibração de C para ajuste da Lâmina Anual – BES (Microbacias)

Os gráficos dos resultados apresentados na tabela 5.11 encontram – se em anexo (Figuras A.73 a A.76).

Tabela 5.11 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1984 (BES)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	5,14	5,08	-1,17%	0,124	0,2490	0,498	0,909
M2	18,25	18,28	0,16%	0,183	0,2760	0,674	0,869
M3	123,19	92,37	-25,02%	0,214	0,2144	0,998	0,871
M4	63,79	61,36	-3,81%	0,182	0,2195	0,829	0,921

Os resultados da Tabela 5.12 estão apresentados de forma gráfica em anexo, nas figuras A.77 a A.80

Tabela 5.12 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1985 (BES)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	65,23	56,43	-13,49%	0,166	0,2511	0,661	0,814
M2	60,74	62,95	3,64%	0,232	0,2713	0,855	0,084
M3	466,13	313,27	-32,79%	0,214	0,2144	0,998	0,892
M4	417,84	314,83	-24,65%	0,219	0,2194	0,998	0,877

As Figuras A.81 a A.84, em anexo, apresentam os gráficos da calibração indicada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 1986 (BES)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	28,41	27,98	-1,51%	0,150	0,2512	0,597	0,706
M2	58,21	57,62	-1,01%	0,188	0,2713	0,693	0,696
M3	263,16	258,00	-1,96%	0,194	0,2111	0,919	0,881
M4	269,72	267,06	-0,98%	0,197	0,2144	0,905	0,882

5.5.2 Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Microbacias)

As Figuras A.85 a A.87, em anexo, apresentam os gráficos da calibração indicada na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2002 (BESJC)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	78,94	78,84	-0,13%	0,228	0,2864	0,796	0,700
M2	5,11	5,22	2,15%	0,048	0,1273	0,377	0,720
M3	1,50	1,51	0,67%	0,099	0,5756	0,172	0,482

As Figuras A.88 a A.90, em anexo, apresentam os gráficos da calibração indicada na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2003 (BESJC)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	3,75	1,12	-70,13%	0,286	0,2866	0,998	0,778
M2	2,94	0,77	-73,81	0,127	0,1275	0,996	0,695
M3	1,48	0,86	-41,89%	0,577	0,5770	1,000	0,971

As Figuras A.91 a A.93, em anexos, apresentam os gráficos da calibração indicada na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC)

Microbacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	87,99	86,84	-1,31%	0,270	0,2866	0,942	0,769
M2	64,86	56,24	-13,29%	0,127	0,1275	0,996	0,806
M3	48,94	49,72	1,59%	0,535	0,5771	0,927	0,927

5.5.3 Calibração de C para ajuste de Lâmina Anual – BESJC (Sub-bacias)

Os gráficos das Figuras figuras A.94 e A.95 (anexo) apresentam os resultados da calibração indicada na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2004 (BESJC)

Bacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	23,34	23,52	0,77%	2,375	2,6330	0,902	0,254
SB2	23,62	23,67	0,21%	2,450	2,7253	0,899	0,892

Os gráficos das Figuras A.96 e A.97 (anexo) apresentam os resultados da calibração indicada na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2005 (BESJC)

Bacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	38,85	38,15	-1,80%	2,375	2,633	0,902	0,601
SB2	41,42	41,69	0,65%	2,625	2,7230	0,964	0,454

Os gráficos das Figuras A.98 e A.99 (anexo) apresentam os resultados da calibração indicada na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste da Lâmina Anual – 2006 (BESJC)

Bacias	L_o (mm)	L_s (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	38,22	38,87	1,70%	2,225	2,633	0,845	0,966
SB2	50,28	50,29	0,02%	2,490	2,7243	0,914	0,933

5.5.4 Calibração de C para ajuste dos Picos – BES (Microbacias)

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.20), encontram-se em anexo, nas Figuras A.100 a A.103.

Tabela 5.20 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1984 (BES)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	4,74	4,72	-0,42%	0,140	0,2426	0,577	0,903
M2	18,14	18,09	-0,27%	0,206	0,2711	0,760	0,863
M3	39,40	39,16	-0,61%	0,186	0,2143	0,868	0,876
M4	30,18	30,34	0,41%	0,176	0,2195	0,802	0,921

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.21) encontram-se em anexo, nas Figuras A.104 a A.107.

Tabela 5.21 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1985 (BES)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	41,11	40,92	-0,46%	0,195	0,2513	0,776	0,795
M2	27,53	28,05	1,88%	0,220	0,2713	0,811	0,092
M3	85,52	85,87	0,41%	0,191	0,2144	0,891	0,892
M4	100,54	108,93	8,34%	0,219	0,2194	0,998	0,877

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.22) encontram-se em anexo, nas Figuras A.108 a A.111.

Tabela 5.22 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 1986 (BES)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	25,53	25,72	0,74%	0,184	0,2512	0,732	0,698
M2	51,71	51,62	-0,17%	0,237	0,2713	0,874	0,683
M3	94,24	94,54	0,32%	0,211	0,2145	0,984	0,881
M4	76,56	78,84	2,98%	0,197	0,2194	0,897	0,882

5.5.5 Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Microbacias)

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.23) encontram-se em anexo, nas Figuras A.111 a A.114.

Tabela 5.23 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2002 (BESJC)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	22,78	22,81	0,13%	0,226	0,2890	0,789	0,700
M2	1,71	1,68	-1,75%	0,049	0,1276	0,384	0,717
M3	0,46	0,47	2,17%	0,099	0,5756	0,172	0,482

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.24) encontram-se em anexo, nas Figuras A.115 a A.117.

Tabela 5.24 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2003 (BESJC)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	1,88	1,12	-40,42%	0,286	0,2866	0,998	0,788
M2	1,72	0,77	-55,23%	0,127	0,1275	0,996	0,695
M3	1,19	0,86	-27,73%	0,577	0,5770	1,000	0,971

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.25) encontram-se em anexo, nas Figuras A.118 a A.120

Tabela 5.25 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC)

Microbacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
M1	31,15	26,94	-13,52%	0,286	0,2866	0,998	0,760
M2	26,28	22,06	-16,05%	0,127	0,1275	0,996	0,806
M3	16,66	16,64	-0,12%	0,505	0,5771	0,875	0,927

5.5.6 Calibração de C para ajuste dos Picos – BESJC (Sub-bacias)

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.26), encontram-se em anexo, Figuras nas A.121 e A.122.

Tabela 5.26 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2004 (BESJC)

Sub-bacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	12,52	12,52	0,00%	2,197	2,6406	0,834	0,225
SB2	13,26	13,22	-0,30%	2,305	2,7246	0,846	0,846

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.27) encontram-se em anexo, nas Figuras A.123 e A.124.

Tabela 5.27 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2005 (BESJC)

Sub- bacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	16,03	16,06	0,18%	2,375	2,6330	0,902	0,601
SB2	11,95	11,97	0,17%	2,235	2,7223	0,821	0,457

Os gráficos da calibração de C para ajuste dos picos (Tabela 5.28) encontram-se em anexo, nas Figuras A.125 e A.126.

Tabela 5.28 – Calibração de $C = \Delta t/t_c$ para ajuste dos Picos – 2006 (BESJC)

Sub-bacias	$L_o(\text{máx})$ (mm)	$L_s(\text{máx})$ (mm)	Erro Percentual	Δt (min)	t_c (min)	C(-)	R^2
SB1	24,26	22,50	-7,25%	2,225	2,6332	0,845	0,966
SB2	39,79	34,26	-13,90%	2,720	2,7227	0,999	0,932

5.6 Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva

Realizada a calibração do coeficiente de propagação do escoamento ($C = \Delta t/t_c$) para ajuste da lâmina escoada, seguiu-se nesta etapa o trabalho de realizar a calibração do coeficiente de erosividade da chuva (K_r). Foi observado que nas microbacias, o modelo não apresentou sensibilidade ao coeficiente de erosividade do escoamento (K_r). Para realização da calibragem desse parâmetro, adotou-se um valor inicial do coeficiente, e se foi alterando este até que a produção de sedimentos simulada seja igual ou muito próxima a produção de sedimentos observada. Foram realizadas duas calibrações, a

primeira para ajustar a produção anual de sedimentos, e a segunda, para ajustar o valor de erosão máxima. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.6.1 Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BES (Microbacias)

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.29) encontram-se em anexo, nas Figuras A.127 a A.130.

Tabela 5.29 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1984 (BES)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg, m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0038	0,0039	2,63%	0,0365	1,00E-04	0,669
M2	0,0007	0,0007	0,00%	0,0033	1,00E-04	0,597
M3	2,3818	2,3854	1,98%	7,7980	6,00E-04	0,009
M4	0,3069	0,3083	0,45%	0,6875	6,00E-04	0,435

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.30) encontram-se em anexo, nas Figuras A.131 a A.134.

Tabela 5.30 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1985 (BES)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg, m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0464	0,0465	0,22%	0,0785	1,00E-04	0,680
M2	0,1244	0,1250	0,48%	0,3110	1,00E-04	0,147
M3	22,9026	22,9025	0,00%	13,4040	6,00E-04	0,388
M4	22,2731	22,2816	0,04%	15,7500	6,00E-04	0,332

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.31) encontram-se em anexo, nas Figuras A.135 a A.138.

Tabela 5.31 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 1986 (BES)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg, m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,5635	0,5604	-0,55%	1,2325	1,00E-04	0,436
M2	0,9896	0,9892	-0,04%	1,1765	1,00E-04	0,423
M3	17,6139	17,4912	-0,70%	8,6665	6,00E-04	0,486
M4	10,8557	10,9396	0,77%	4,8230	6,00E-04	0,405

5.6.2 Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Produção Anual de Sedimentos – BESJC (Microbacias)

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.32) encontram-se em anexo, nas Figuras A.139 a A.141.

Tabela 5.32 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2002 (BESJC)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0921	0,0922	0,10%	0,3810	2,00E-04	0,542
M2	0,0051	0,0052	1,96%	0,0225	2,00E-04	0,426
M3	0,0185	0,0186	0,05%	0,0075	2,00E-04	0,314

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.33) encontram-se em anexo, nas Figuras A.142 a A.144.

Tabela 5.33 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2003 (BESJC)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0007	0,0008	14,29%	0,1120	2,00E-04	0,778
M2	0,0005	0,0005	0,00%	0,1125	2,00E-04	0,695
M3	0,0024	0,0024	0,00%	0,0510	2,00E-04	0,971

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da produção anual de sedimentos (Tabela 5.34) encontram-se em anexo, nas Figuras A.145 a A.147.

Tabela 5.34 – Calibração de K_r para ajuste da Produção Anual de Sedimentos – 2004 (BESJC)

Microbacias	$E_o(t)$	$E_c(t)$	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,1014	0,1024	0,99%	0,4150	2,00E-04	0,431
M2	0,0480	0,0464	-3,33%	0,4025	2,00E-04	0,509
M3	0,2828	0,2808	-0,70%	0,2350	2,00E-04	0,535

5.6.3 Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BES (Microbacias)

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da erosão máxima (Tabela 5.35) encontram-se em anexos, Figuras A.148 a A.151.

Tabela 5.35 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1984 (BES)

Microbacias	$E_{o(máx)}$ (t)	$E_{c(máx)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0024	0,0024	0,00%	0,0482	1,00E-04	0,673
M2	0,0004	0,0004	0,00%	0,0045	1,00E-04	0,598
M3	0,7041	0,7041	0,00%	5,1752	6,00E-04	0,009
M4	0,2424	0,2423	-0,04%	0,6878	6,00E-04	0,434

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste erosão máxima (Tabela 5.36) encontram-se em anexo, nas Figuras A.152 a A.155.

Tabela 5.36 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1985 (BES)

Microbacias	$E_{o(máx)}$ (t)	$E_{c(máx)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0203	0,0203	0,00%	0,1692	1,00E-04	0,682
M2	0,0741	0,0740	-0,13%	0,6163	1,00E-04	0,145
M3	4,9267	4,9135	-0,26%	18,5743	6,00E-04	0,399
M4	5,8847	5,8891	0,07%	24,3000	6,00E-04	0,341

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da erosão máxima (Tabela 5.37) encontram-se em anexo, nas Figuras A.156 a A.159.

Tabela 5.37 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 1986 (BES)

Microbacias	$E_{o(máx)}$ (t)	$E_{c(máx)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,5164	0,5161	-0,05%	5,2275	1,00E-04	0,431
M2	0,7073	0,7073	0,00%	4,0345	1,00E-04	0,434
M3	6,5005	6,5005	0,00%	18,1060	6,00E-04	0,467
M4	3,4407	3,4406	0,00%	10,1550	6,00E-04	0,410

5.6.4 Calibração do Coeficiente de Erosividade da Chuva para Ajuste da Erosão Máxima – BESJC (Microbacias)

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da erosão máxima (Tabela 5.38) encontram-se em anexo, nas Figuras A.160 a A.162.

Tabela 5.38 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2002 (BESJC)

Microbacias	$E_{o(max)}$ (t)	$E_{c(max)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0371	0,0371	0,00%	0,5515	1,00E-04	0,542
M2	0,022	0,0022	0,00%	0,0265	1,00E-04	0,442
M3	0,0070	0,0070	0,00%	0,0080	1,00E-04	0,315

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da erosão máxima (Tabela 5.39) encontram-se em anexo, nas Figuras A.163 a A.165.

Tabela 5.39 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2003 (BESJC)

Microbacias	$E_{o(max)}$ (t)	$E_{c(max)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0003	0,0003	0,00%	0,0475	2,00E-04	0,778
M2	0,0003	0,0003	0,00%	0,0620	2,00E-04	0,695
M3	0,0019	0,0019	0,00%	0,0395	2,00E-04	0,971

Os gráficos da calibração de K_r para ajuste da erosão máxima (Tabela 5.40) encontram-se em anexo, nas Figuras A.166 a A.168.

Tabela 5.40 – Calibração de K_r para ajuste da Erosão Máxima – 2004 (BESJC)

Microbacias	$E_{o(max)}$ (t)	$E_{c(max)}$ (t)	Erro Percentual	K_r ($s^2/kg,m^2$)	K_f (kg/m^2s)	R^2
M1	0,0264	0,0265	0,38%	0,3135	2,00E-04	0,428
M2	0,0089	0,0089	0,00%	0,1910	2,00E-04	0,506
M3	0,1281	0,1281	0,00%	0,2720	2,00E-04	0,527

Não foi possível calibrar os coeficientes de erosividade da chuva no caso das sub-bacias na BESJC. Apesar do modelo ter apresentado resultados satisfatórios no tocante ao escoamento, este mostrou um elevado valor de produção de sedimentos. Mesmo atribuindo valores baixíssimos ao coeficiente de erosividade, o total de sedimento calculado pelo modelo era muito superior ao total de sedimento observado.

5.7 Simulação dos Processos de Escoamento e Erosão com parâmetros médios

Nesta etapa do trabalho foram simulados os processos continuamente em cada unidade experimental (microbacias e sub-bacias) para o três anos simulados anteriormente, utilizando a média dos parâmetros obtidos por meio da calibragem para cada ano. No caso da simulação contínua do escoamento para os três anos, utilizou-se primeiramente, a média dos coeficientes de propagação do escoamento que foram obtidos da calibragem para ajuste da lâmina anual, e em seguida, a média dos coeficientes de propagação do escoamento que foram obtidos da calibração para ajuste dos picos. Na simulação contínua da produção de sedimentos nos três anos, primeiramente utilizamos a média dos coeficientes de erosividade das chuvas calibrados na comparação da produção anual de sedimentos simulada e observada, e em seguida, a média dos coeficientes obtidos da calibração para ajuste das erosões máximas. O resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.7.1 Simulação do Escoamento com $C_{médio}$ (BES)

As Figuras 5.16 e 5.17 e a Tabela 5.42 mostram os resultados obtidos com a utilização do $C_{médio}$ (Tabela 5.41) para a microbacia 4. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexo (Figuras A.169 a A.171).

Tabela 5.41 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{m\u00e9dio}}$) – 1984 a 1986 (BES)

Microbacias	Δt_{1984}	Δt_{1985}	Δt_{1986}	$\Delta t_{\text{m\u00e9dio}}$	$C = \Delta t_{\text{m\u00e9dio}}/t_c$
M1	0,124	0,166	0,150	0,147	0,585
M2	0,183	0,232	0,188	0,201	0,741
M3	0,214	0,214	0,197	0,207	0,965
M4	0,182	0,219	0,197	0,199	0,907

Tabela 5.42 – Resultados obtidos usando par\u00e2metros m\u00e9dios (Tabela 5.41)

Microbacias	L\u00e2minas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_o(\text{m\u00e1x})$	$L_s(\text{m\u00e1x})$	
M1	98,78	68,49	41,11	12,36	0,751
M2	137,20	140,80	51,71	27,02	0,494
M3	852,48	673,41	94,24	103,41	0,871
M4	751,35	616,44	100,54	91,22	0,863

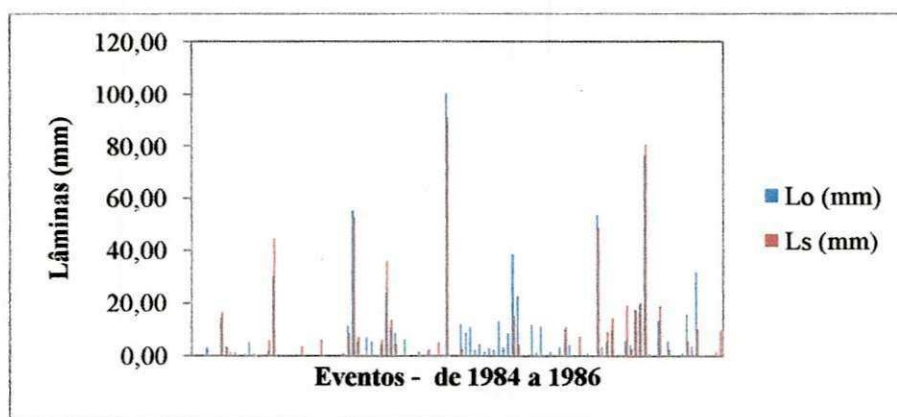


Figura 5.16 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{m\u00e9dio}}$ baseado na calibra\u00e7\u00e3o da lâmina anual – M4 (BES)

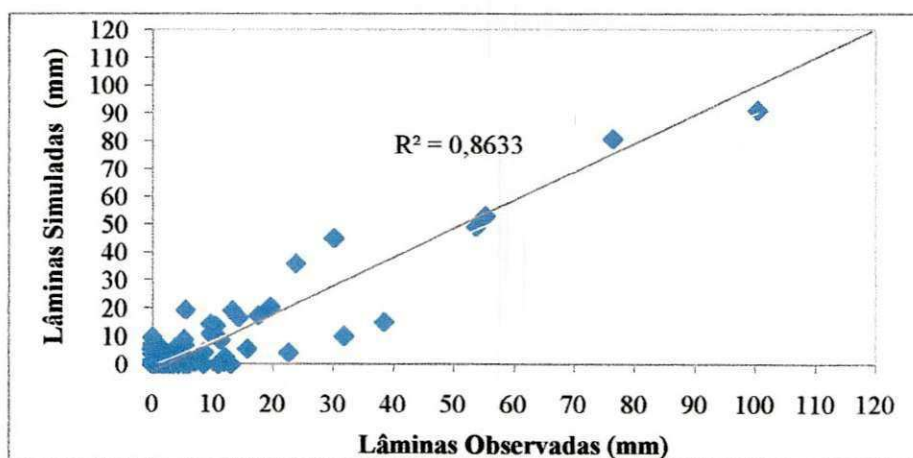


Figura 5.17 – Compara\u00e7\u00e3o das L\u00e2minas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{m\u00e9dio}}$ baseado na calibra\u00e7\u00e3o da lâmina anual – M4(BES)

As Figuras 5.18 e 5.19 e Tabela 5.44 mostram os resultados obtidos com a utilização do $C_{\text{médio}}$ (Tabela 5.43) para a microbacia 3. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexo (Figuras A.172 a A.174).

Tabela 5.43 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 1984 a 1986 (BES)

Microbacias	Δt_{1984}	Δt_{1985}	Δt_{1986}	$\Delta t_{\text{médio}}$	$C = \Delta t_{\text{médio}}/t_c$
M1	0,140	0,195	0,184	0,173	0,689
M2	0,206	0,220	0,237	0,221	0,814
M3	0,186	0,191	0,211	0,196	0,914
M4	0,176	0,219	0,197]	0,197	0,898

Tabela 5.44 – Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.43)

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_o(\text{máx})$	$L_s(\text{máx})$	
M1	98,78	144,70	41,11	24,43	0,727
M2	137,20	208,70	51,71	40,19	0,511
M3	852,48	614,55	94,24	94,37	0,871
M4	751,35	589,60	100,54	87,60	0,865

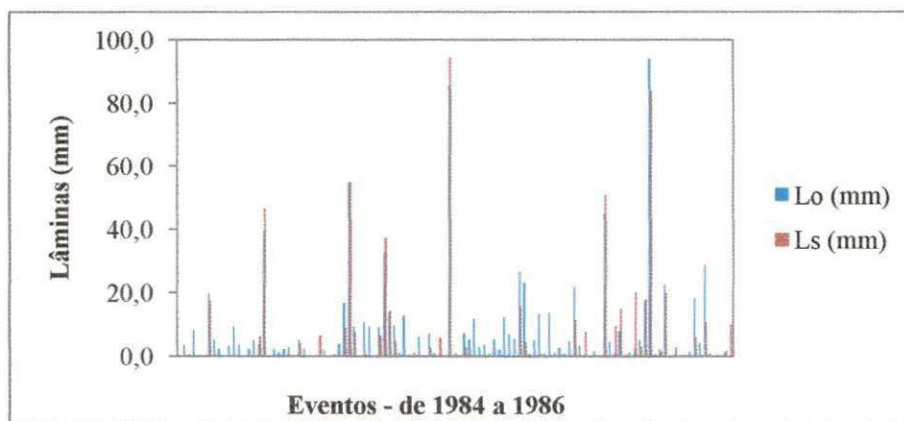


Figura 5.18 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração dos picos – M3 (BES)

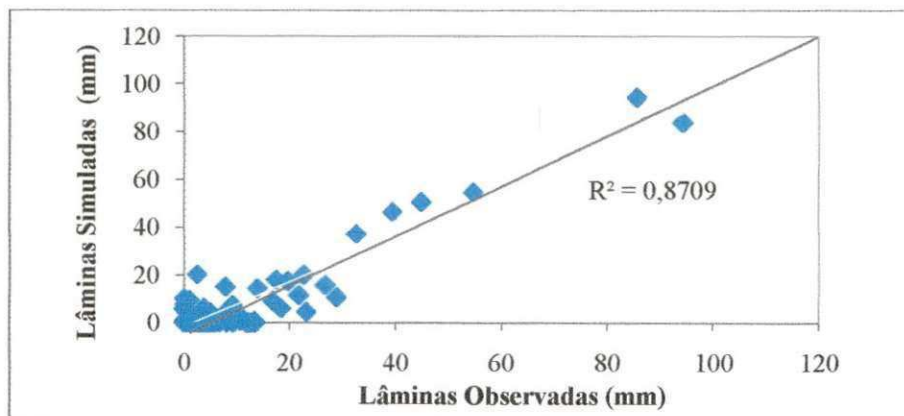


Figura 5.19 – Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração dos picos – M3(BES)

5.7.2 Simulação do Escoamento com $C_{\text{médio}}$ - Microbacias (BESJC)

As Figuras 5.20 e 5.21 e Tabela 5.46 mostram os resultados obtidos com a utilização do $C_{\text{médio}}$ (Tabela 5.45) para a microbacia 1. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexos (Figuras A.175 a A.176).

Tabela 5.45 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC)

Microbacias	Δt_{2002}	Δt_{2003}	Δt_{2004}	$\Delta t_{\text{médio}}$	$C = \Delta t_{\text{médio}}/t_c$
M1	0,228	0,285	0,270	0,261	0,911
M2	0,048	0,127	0,127	0,101	0,792
M3	0,099	0,577	0,535	0,404	0,700

Tabela 5.46 – Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.45)

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_{o(\text{máx})}$	$L_{s(\text{máx})}$	
M1	170,68	210,25	31,15	36,96	0,688
M2	72,91	96,66	26,28	21,32	0,1334
M3	51,92	58,15	16,66	12,73	0,125

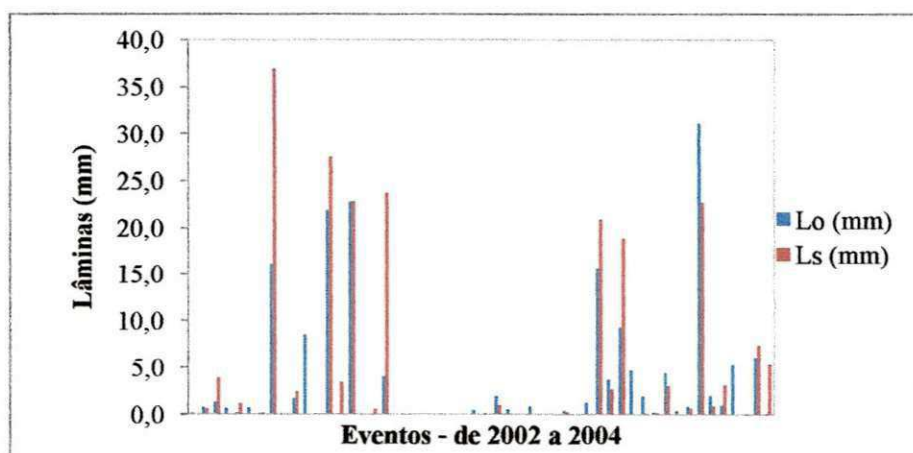


Figura 5.20 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BESJC)

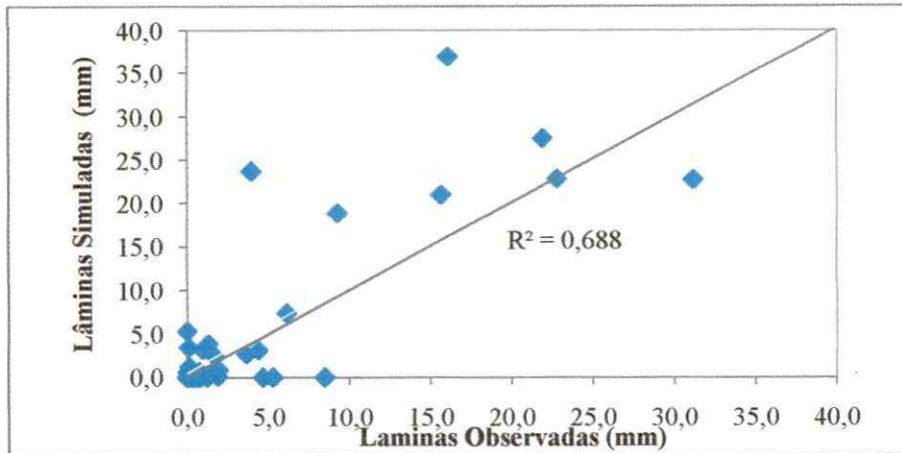


Figura 5.21 – Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BESJC)

As Figuras 5.22 e 5.23 e Tabela 5.48 mostram, os resultados obtidos com a utilização do $C_{\text{médio}}$ (Tabela 5.47) para a microbacia 1. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexo (Figuras A.177 a A.178).

Tabela 5.47 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2002 a 2004 (BESJC)

Microbacias	Δt 2002	Δt 2003	Δt 2004	$\Delta t_{\text{médio}}$	$C = \Delta t_{\text{médio}}/t_c$
M1	0,226	0,285	0,286	0,266	0,928
M2	0,049	0,127	0,127	0,101	0,792
M3	0,099	0,577	0,505	0,394	0,683

Tabela 5.48 – Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.47)

Microbacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_{o(\text{máx})}$	$L_{s(\text{máx})}$	
M1	170,68	219,58	31,15	38,71	0,712
M2	72,91	96,38	26,28	21,33	0,134
M3	51,92	52,08	16,66	11,41	0,124

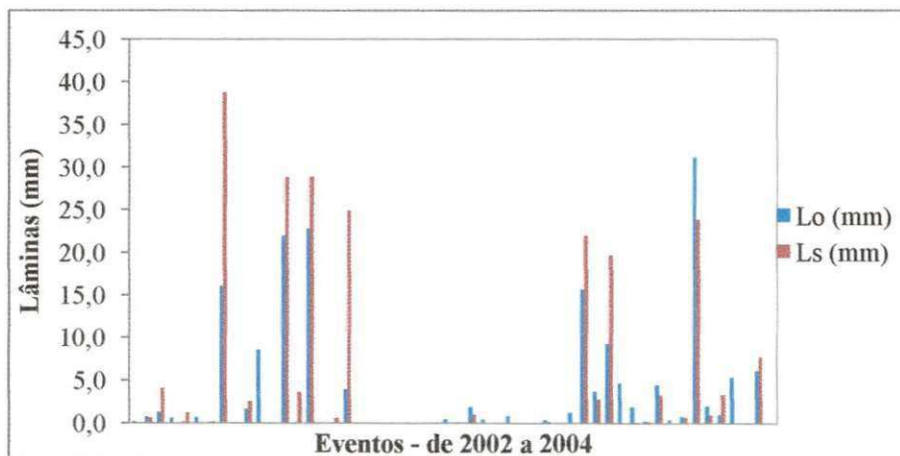


Figura 5.22 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC)

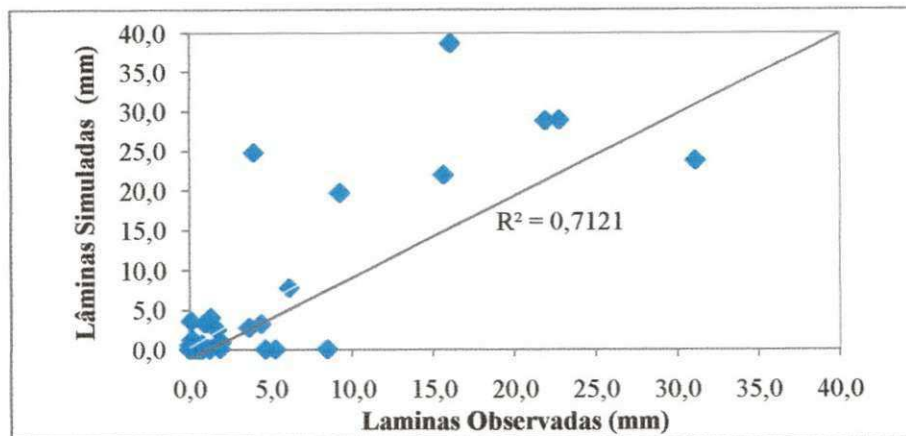


Figura 5.23 – Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração dos picos – M1 (BESJC)

5.7.3 Simulação do Escoamento com $C_{\text{médio}}$ - Sub-bacias (BESJC)

As Figuras 5.24 e 5.25 e Tabela 5.50 mostram os resultados obtidos com a utilização do $C_{\text{médio}}$ (Tabela 5.49) para sub-bacia SB2. O gráfico da simulação na sub-bacia SB1 segue em anexo (Figura A.179).

Tabela 5.49 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pela lâmina anual e valor médio ($\Delta t_{\text{médio}}$) – 2004 a 2006 (BESJC)

Sub-bacias	Δt_{2004}	Δt_{2005}	Δt_{2006}	$\Delta t_{\text{médio}}$	$C = \Delta t_{\text{médio}}/t_c$
SB1	2,375	2,375	2,225	2,325	0,883
SB2	2,450	2,625	2,490	2,522	0,926

Tabela 5.50 – Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.49)

Sub bacias	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_o(\text{máx})$	$L_s(\text{máx})$	
SB1	100,41	102,81	24,26	25,94	0,726
SB2	115,32	115,83	39,79	115,83	0,806

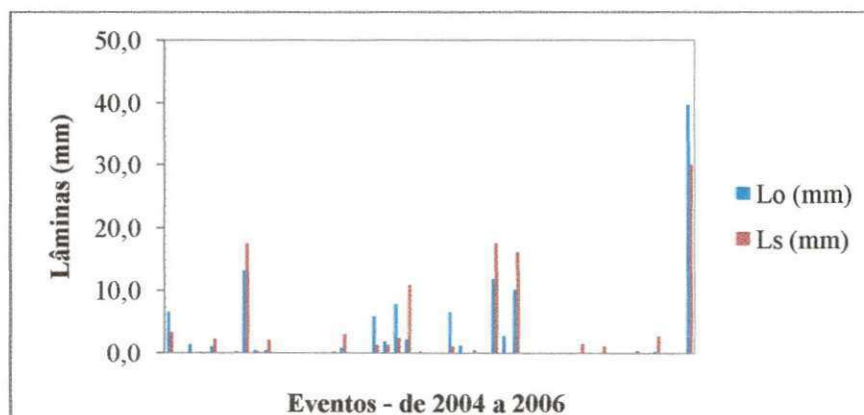


Figura 5.24 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC)

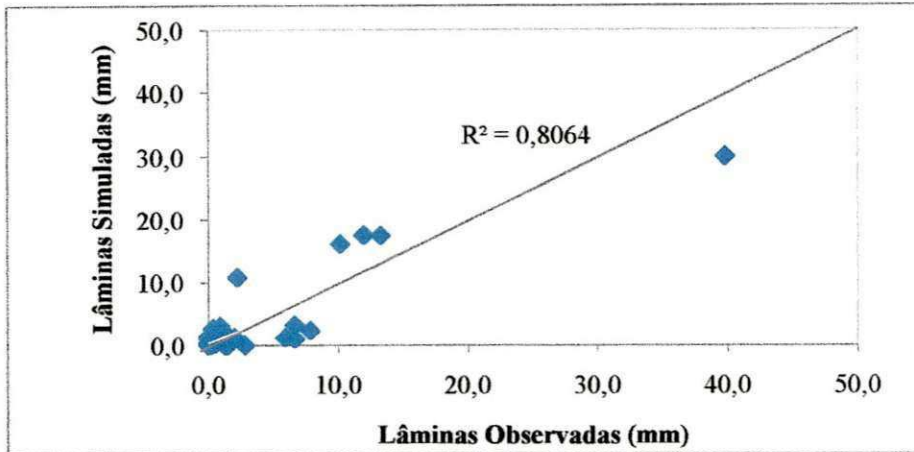


Figura 5.25 – Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – SB2 (BESJC)

Tabela 5.51 – Intervalos de propagação (Δt) calibrados pelos picos e valor médio ($\Delta t_{médio}$) – 2004 a 2006 (BESJC)

Sub-bacias	Δt_{2004}	Δt_{2005}	Δt_{2006}	$\Delta t_{médio}$	$C = \Delta t_{médio}/t_c$
SB1	2,197	2,375	2,225	2,266	0,860
SB2	2,305	2,235	2,720	2,420	0,888

As Figuras 5.26 e 5.27 e Tabela 5.52 mostram os resultados obtidos com a utilização do $C_{médio}$ (Tabela 5.51) para sub-bacia SB2. O gráfico da simulação na sub-bacia SB1 seguem em anexo (Figura A.180).

Tabela 5.52 – Resultados obtidos usando parâmetros médios (Tabela 5.51)

Sub-bacia	Lâminas (mm)		Picos (mm)		R^2
	L_o	L_s	$L_o(máx)$	$L_s(máx)$	
SB1	100,41	94,74	24,26	23,93	0,729
SB2	115,32	103,50	39,79	27,00	0,808

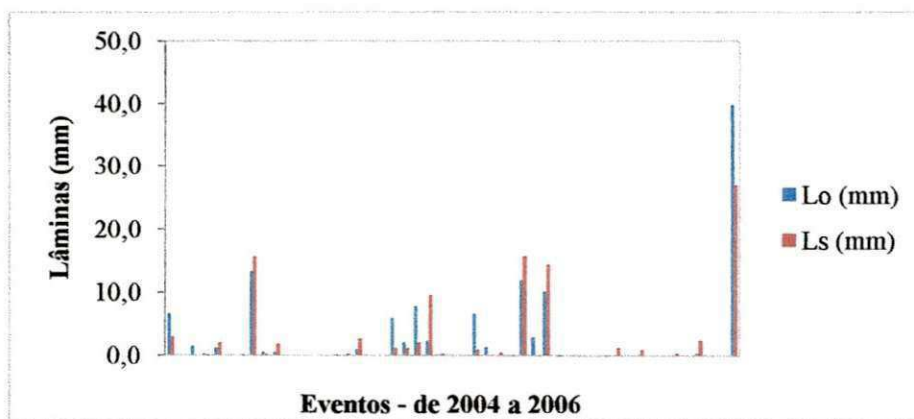


Figura 5.26 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC)

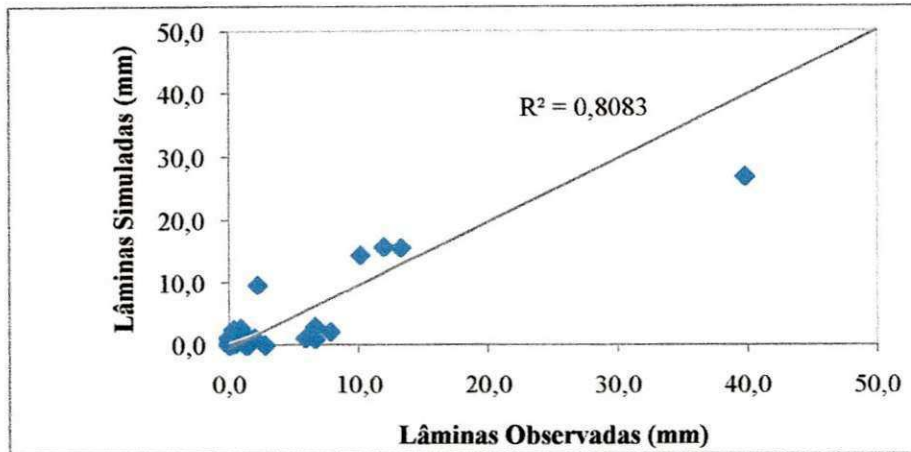


Figura 5.27 – Comparação das Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na calibração dos picos – SB2 (BESJC)

5.7.4 Simulação da Produção de Sedimentos com $K_{r(\text{médio})}$ (BES)

As Figuras 5.28 e 5.29 e a Tabela 5.54 mostram os resultados obtidos com a utilização do $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.53) para a microbacia M3. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexos (Figuras A.181 a A.183).

Tabela 5.53 – Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_{r(\text{médio})}$) – 1984 a 1986 (BES)

Microbacias	$K_{r(1984)}$	$K_{r(1985)}$	$K_{r(1986)}$	$K_{r(\text{médio})}$
M1	0,0365	0,0785	1,2325	0,4492
M2	0,0033	0,3110	1,1765	0,4969
M3	7,8950	13,4040	8,6665	9,9885
M4	0,6875	15,7500	4,8230	7,0868

Tabela 5.54 – Resultados obtidos usando $K_{r(\text{médio})}$ (Tabela 5.53)

Microbacias	Erosão Total Anual (t)		Erosão Máxima (t)		R^2
	E_o	E_s	$E_{o(\text{máx})}$	$E_{s(\text{máx})}$	
M1	0,6136	0,5138	0,5164	0,0537	0,157
M2	1,1147	0,7623	0,7073	0,0846	0,289
M3	42,8984	39,4349	6,5005	3,2392	0,407
M4	33,4357	29,7021	5,8847	2,3602	0,315

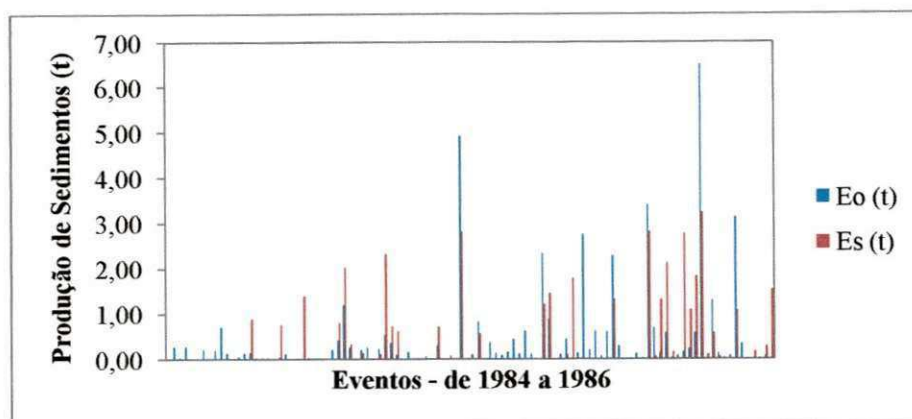


Figura 5.28 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES)

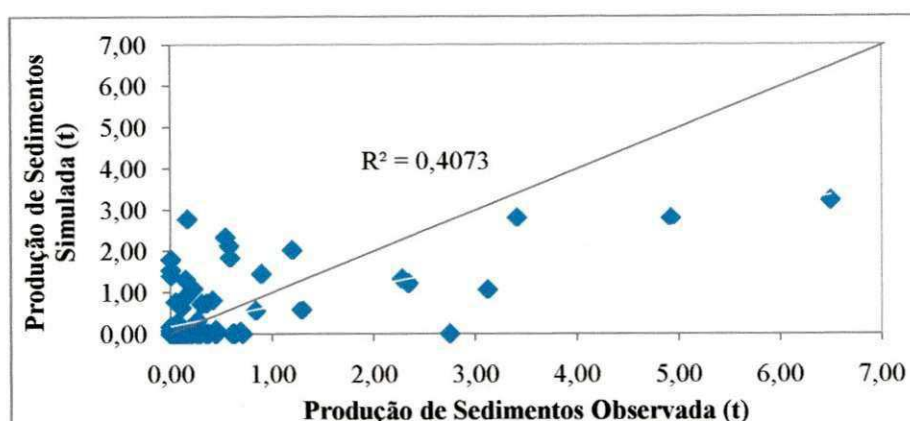


Figura 5.29 – Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na produção anual de sedimentos – M3(BES)

As Figuras 5.30 e 5.31 e a Tabela 5.56 mostram os resultados obtidos com a utilização do $K_r(\text{médio})$ (Tabela 5.55) para a microbacia M3. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexo (Figuras A.184 a A.186).

Tabela 5.55 – Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_r(\text{médio})$) – 1984 a 1986 (BES)

Microbacias	$K_r(1984)$	$K_r(1985)$	$K_r(1986)$	$K_r(\text{médio})$
M1	0,0482	0,1692	5,2275	1,8150
M2	0,0045	0,6163	4,0345	1,5518
M3	5,1752	18,5743	18,1060	13,9518
M4	0,6878	24,3000	10,1550	11,7114

Tabela 5.56 – Resultados obtidos usando $K_r(\text{médio})$ (Tabela 5.55)

Microbacias	Erosão Total Anual (t)		Erosão Máxima (t)		R^2
	E_o	E_s	$E_{o(\text{máx})}$	$E_{s(\text{máx})}$	
M1	0,6134	2,0621	0,5164	0,2171	0,156
M2	1,1147	2,2809	0,7073	0,2484	0,249
M3	42,8984	50,0068	6,5005	4,2653	0,423
M4	33,4357	48,6380	5,847	4,0065	0,368

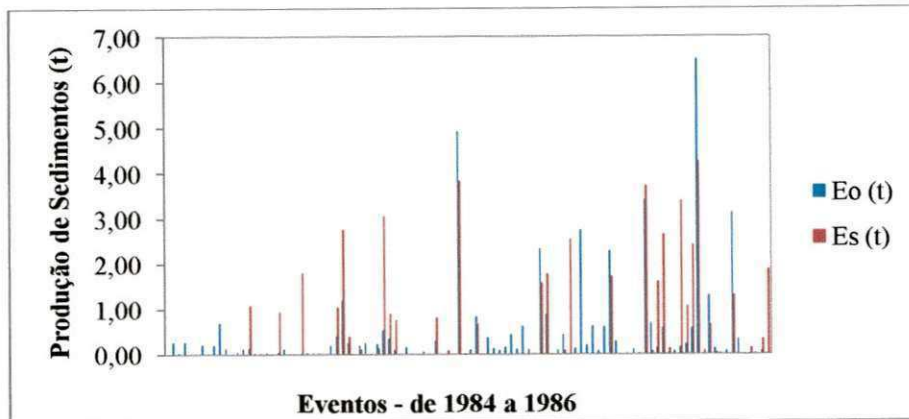


Figura 5.30 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M3(BES)

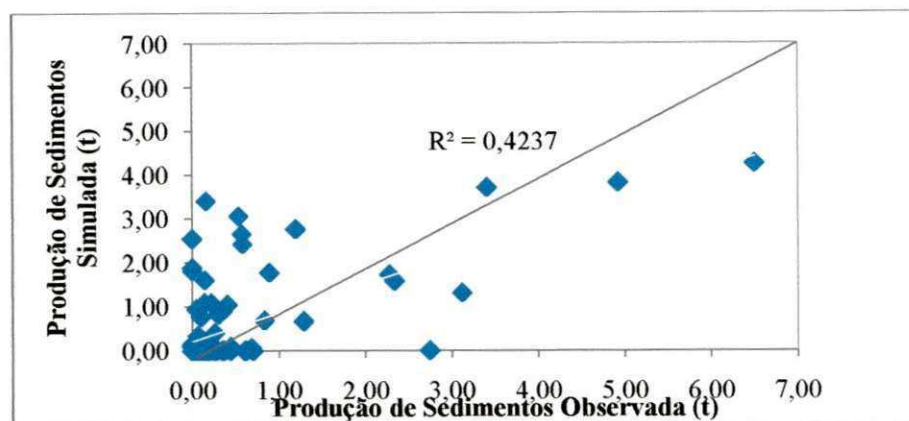


Figura 5.31 – Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_r(\text{médio})$ baseado na erosão máxima – M3(BES)

5.7.5 - Simulação da Produção de Sedimentos com $K_r(\text{médio})$ – (BESJC)

As Figuras 5.32 e 5.33 e a Tabela 5.58 mostram os resultados obtidos com a utilização do $K_r(\text{médio})$ (Tabela 5.57) para a microbacia M1. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexo (Figuras A.187 e A.188).

Tabela 5.57 – Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela produção anual de sedimentos e valor médio ($K_r(\text{médio})$) – 2002 a 2004 (BES)

Microbacias	$K_r(2002)$	$K_r(2003)$	$K_r(2004)$	$K_r(\text{médio})$
M1	0,3810	0,1120	0,4150	0,3027
M2	0,0225	0,1125	0,4025	0,1792
M3	0,0075	0,0510	0,2350	0,0978

Tabela 5.58 – Resultados obtidos usando $K_r(\text{médio})$ (Tabela 5.57)

Microbacias	Erosão Total Anual (t)		Erosão Máxima (t)		R^2
	L_o	L_s	E_o	E_s	
M1	0,1942	0,1559	0,0371	0,0256	0,495
M2	0,0536	0,0576	0,0089	0,0089	0,193
M3	0,3013	0,3531	0,1281	0,0775	0,099

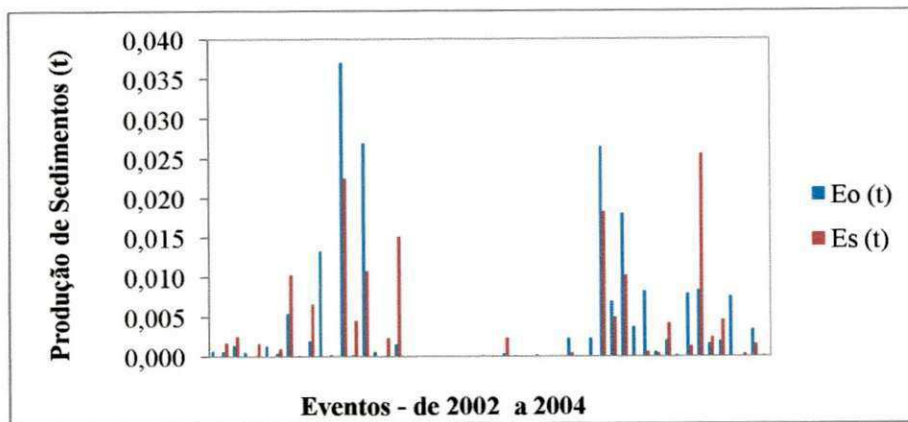


Figura 5.32 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC)

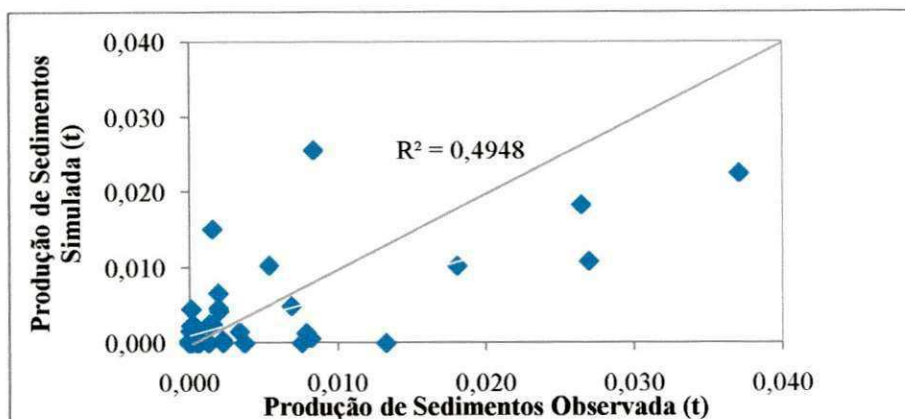


Figura 5.33 – Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BESJC)

As Figuras 5.34 e 5.35 e a Tabela 5.60 mostram os resultados obtidos com a utilização do $K_{r(\text{méd})}$ (Tabela 5.59) para a microbacia M1. Os gráficos das simulações nas demais microbacias estão em anexos (Figuras A.189 a A.190).

Tabela 5.59 – Coeficientes de Erosividade da Chuva (K_r) calibrados pela erosão máxima e valor médio ($K_{r(\text{méd})}$) – 2002 a 2004 (BES)

Microbacias	$K_{r(2002)}$	$K_{r(2003)}$	$K_{r(2004)}$	$K_{r(\text{méd})}$
M1	0,5515	0,0475	0,3135	0,3042
M2	0,0265	0,0620	0,1910	0,0932
M3	0,0080	0,0395	0,2720	0,1065

Tabela 5.60 – Resultados obtidos usando $K_{r(\text{méd})}$ (Tabela 5.59)

Microbacias	Erosão Total Anual (t)		Erosão Máxima (t)		R^2
	E_o	E_s	$E_{o(\text{máx})}$	$E_{s(\text{máx})}$	
M1	0,1942	0,1636	0,0371	0,0255	0,464
M2	0,0536	0,0299	0,0089	0,0046	0,203
M3	0,3013	0,3882	0,1281	0,0872	0,096

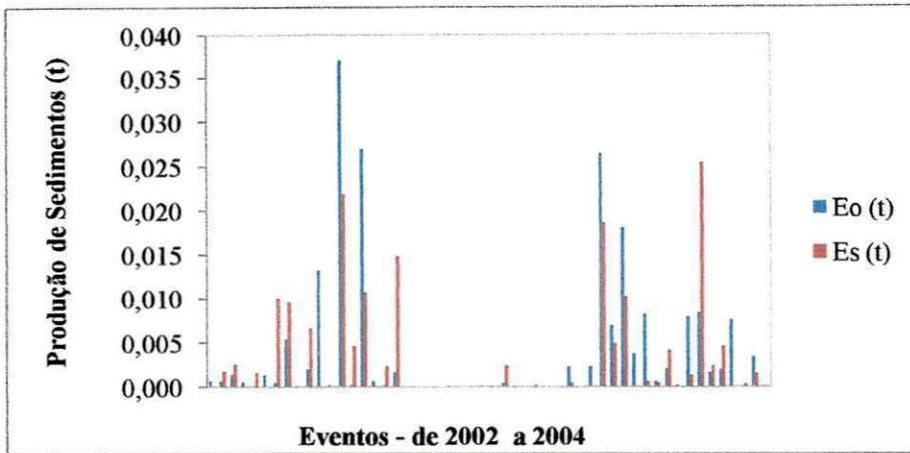


Figura 5.34 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC)

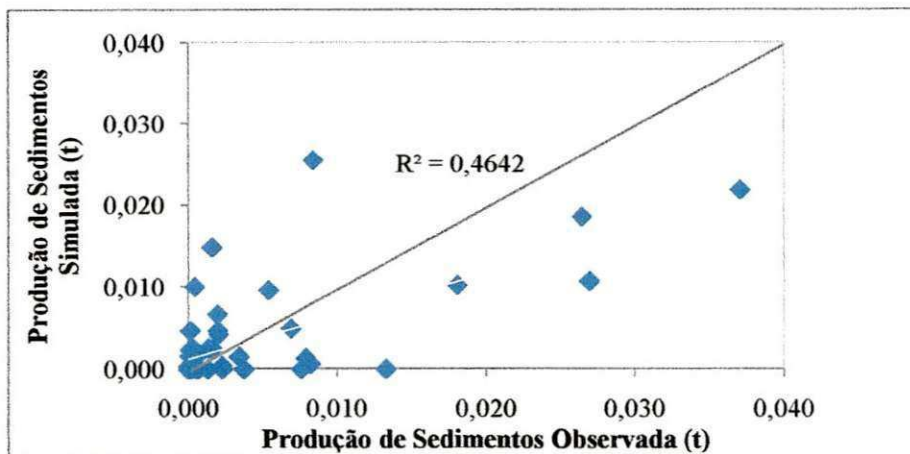


Figura 5.35 – Comparação da Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na erosão máxima – M1(BESJC)

5.8 Simulações na BRS

A modelagem da BRS feita por Figueiredo (2009) foi descrita no item 5.2, e os resultados obtidos são apresentados a seguir nas Figuras 5.36 a 5.41. Os hidrogramas diários (simulados e observados) são apresentados nas Figuras 5.36 a 5.38, incluindo as lâminas anuais e vazões de picos (observada e simulada) e a erosão anual do solo. As Figuras 5.39 a 5.41 apresentam as comparações entre hidrogramas diários simulados e observados no ano de 1977 em todas as bacias, com base nos volumes.

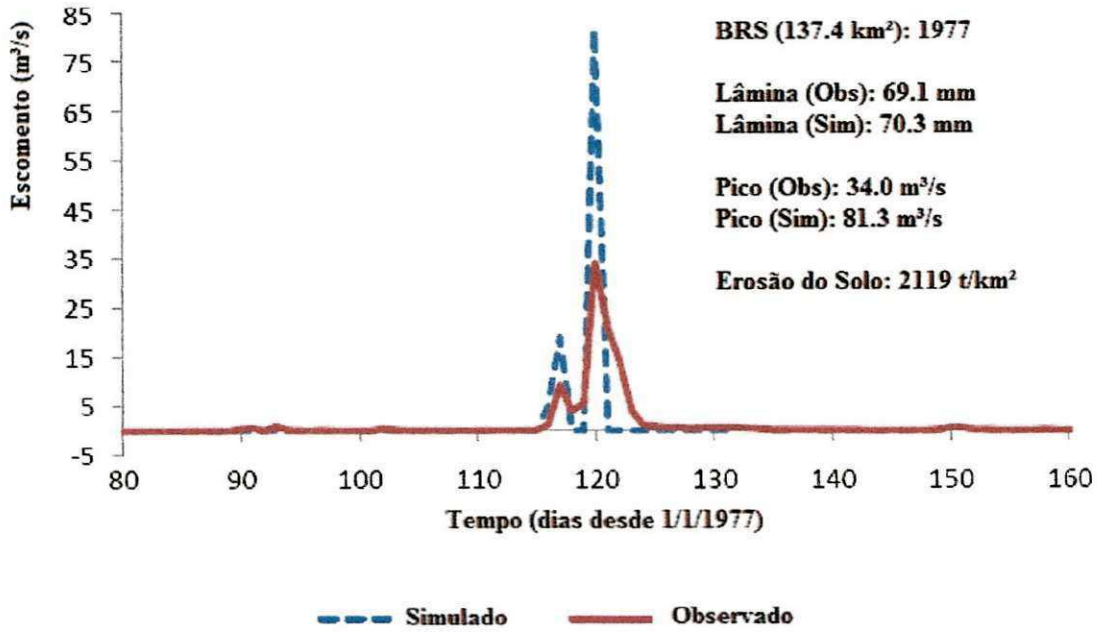


Figura – 5.36– Hidrogramas diários observados e simulados- Gangorra (1977)
(Figueiredo, 2009)

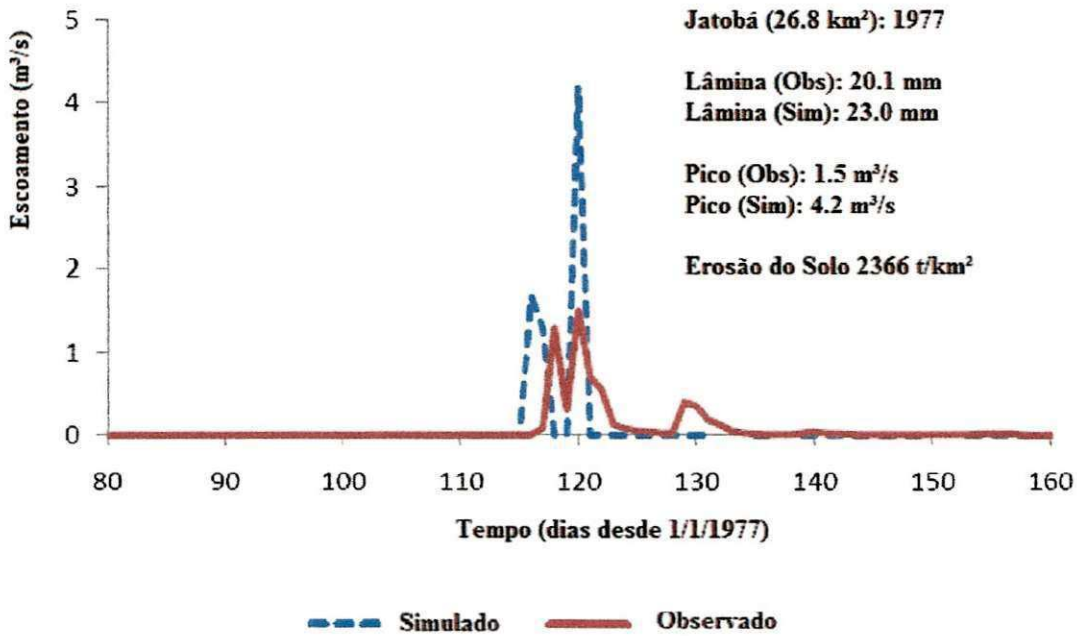


Figura – 5.37 – Hidrogramas diários observados e simulados - Jatobá. (1977).
(Figueiredo, 2009)

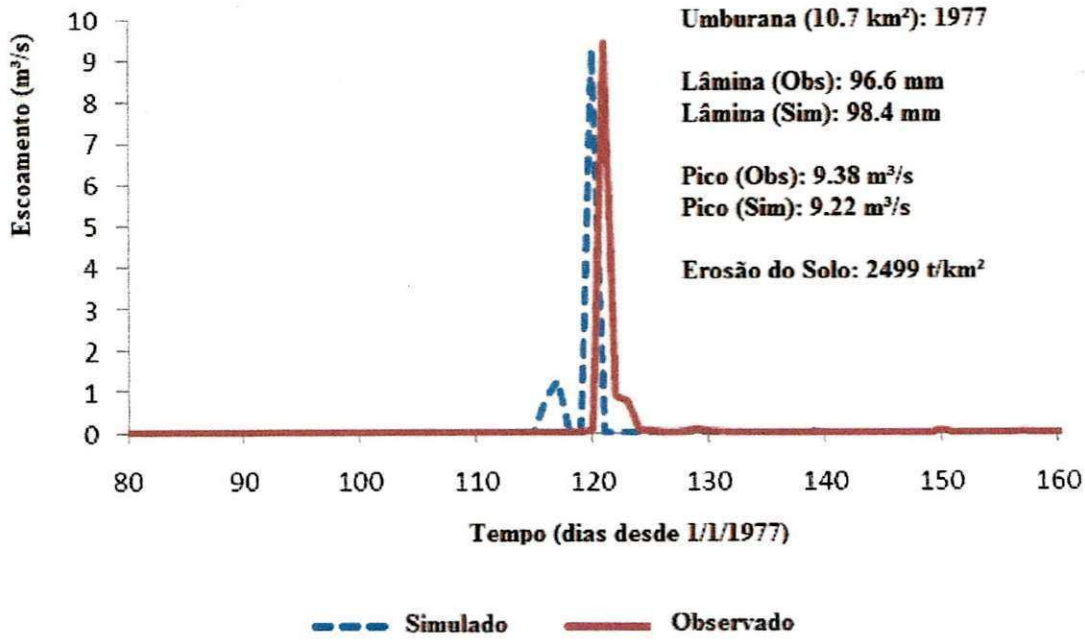


Figura – 5.38 – Hidrogramas diários observados e simulados - Umburana (1977).
(Figueiredo, 2009)

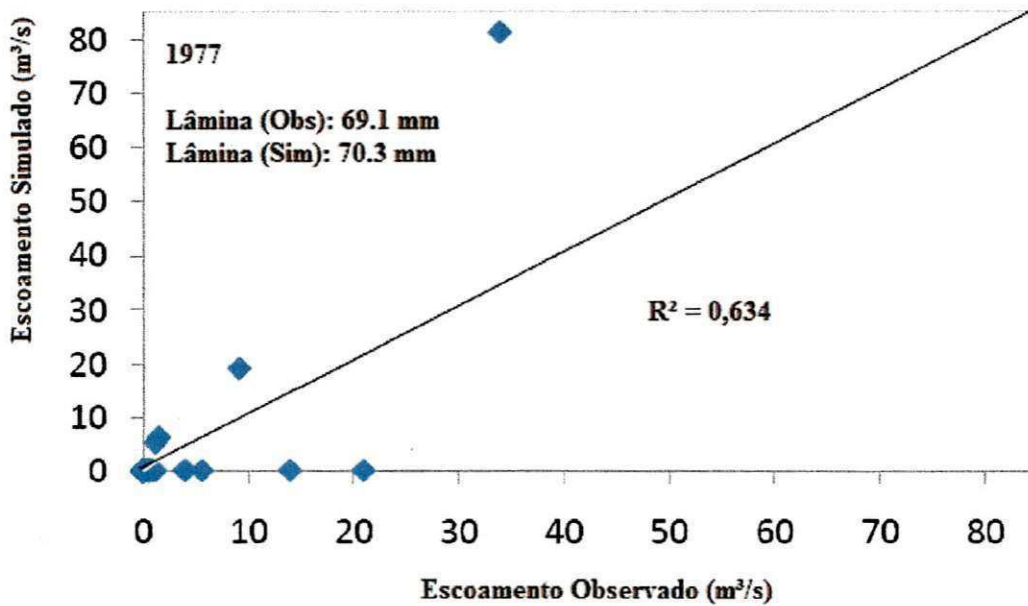


Figura – 5.39 – Hidrogramas diários observados e simulados – Gangorra (1977).
(Figueiredo, 2009)

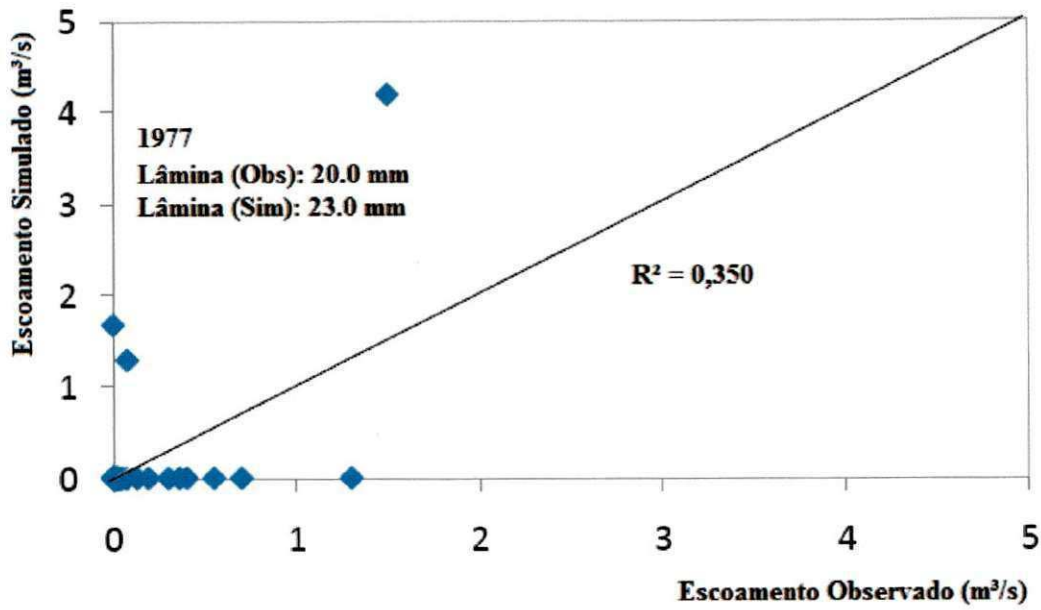


Figura – 5.40 – Hidrogramas diários observados e simulados – Jatobá (1977).
(Figueiredo, 2009)

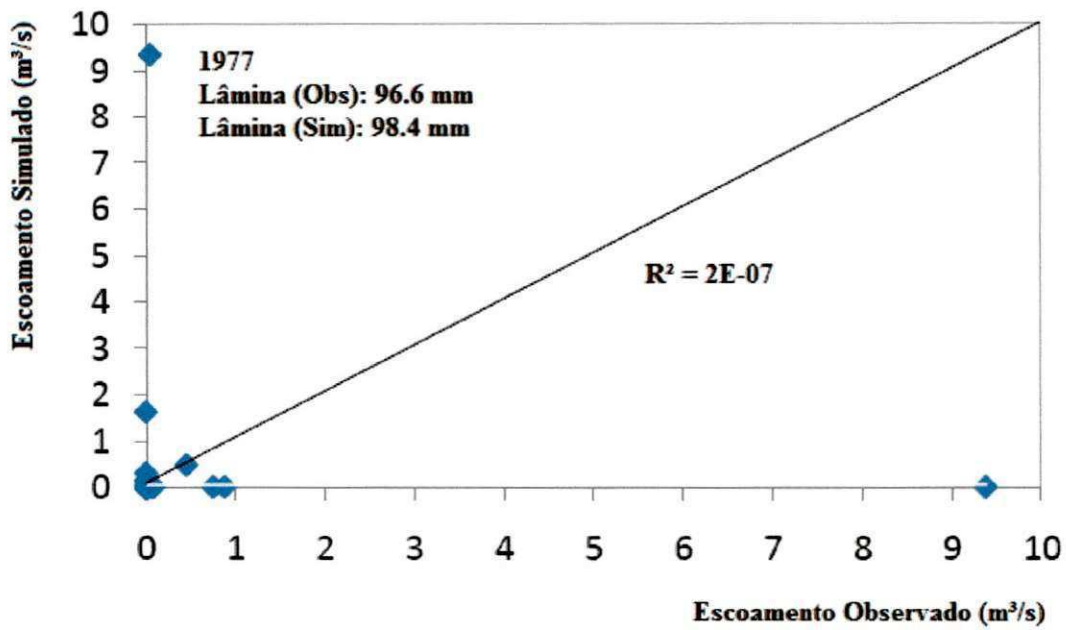


Figura – 5.41 – Hidrogramas diários observados e simulados – Umbrana (1977).
(Figueiredo, 2009)

5.9 Análise do Efeito da Cobertura Vegetal na Geração do Escoamento e Erosão do Solo

A produção de sedimentos é controlada por fatores como intensidades das precipitações, tipo de solos da bacia, condições topográficas e cobertura vegetal. As modificações na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica sejam naturais, ou artificiais como o desmatamento ou reflorestamento, alteram os processos hidrológicos da mesma, provocando impactos no meio ambiente.

Segundo Brandt (1986), a cobertura vegetal atua de duas maneiras no processo de erosão, reduzindo o volume de água que chega ao solo, através da interceptação e, alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva, afetando, com isso, a energia cinética da chuva.

A seguir serão apresentados os resultados da simulação da cobertura vegetal na geração do escoamento e produção de sedimentos, nas áreas estudadas, onde foram consideradas as alterações.

5.9.1 Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BES)

Em Sumé fixou-se a proporção de cobertura vegetal para as microbacias vegetadas em 80% ($C_g = 0.8$) e para as microbacias desmatadas em 0% ($C_g = 0.0$). Para simular os efeitos do desmatamento, reduziu-se progressivamente a proporção da cobertura vegetal das bacias vegetadas de 80% ($C_g = 0.80$) até 0% ($C_g = 0.0$); e fez-se o inverso nas bacias desmatadas, para simular o efeito do reflorestamento. Os valores de K_r para as diversas proporções de cobertura vegetal e as lâminas e erosões simuladas são apresentados nas Tabelas 5.56 a 5.59. As Figuras 5.42 a 5.45 apresentam graficamente os resultados obtidos com as simulações.

Tabela 5.61 – Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M1

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_c (t)
0,80	1,0000	39,4568	0,4920
0,70	1,6250	41,2665	1,2586
0,60	2,2500	44,0382	2,4398
0,50	2,8750	47,7304	4,0489
0,40	3,5000	51,9548	6,1327
0,30	4,1250	56,7999	8,7943
0,20	4,7500	62,7051	12,1745
0,10	5,3750	68,7974	16,2629
0,00	6,0000	75,0798	21,1287

Tabela 5.62 – Resultados da Simulação do Desmatamento Progressivo em M2

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_c (t)
0,80	1,0000	95,9857	0,8330
0,70	1,6250	100,0827	2,1362
0,60	2,2500	105,6865	4,1624
0,50	2,8750	112,6577	6,9787
0,40	3,5000	120,4825	10,6659
0,30	4,1250	129,3189	15,3643
0,20	4,7500	140,1672	21,2394
0,10	5,3750	151,2260	28,5172
0,00	6,0000	162,5072	37,3575

Tabela 5.63 - Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M3

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_c (t)
0,00	6,0000	275,0237	16,4238
0,10	5,3750	257,8517	12,5505
0,20	4,7500	240,9139	9,2889
0,30	4,1250	224,2070	6,6822
0,40	3,5000	210,6173	4,6155
0,50	2,8750	198,4918	3,0123
0,60	2,2500	187,5369	1,7938
0,70	1,6250	178,3780	0,9154
0,80	1,0000	171,2972	0,3563

Tabela 5.64 – Resultados da Simulação do Reflorestamento Progressivo em M4

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_c (t)
0,00	6,0000	268,8924	15,2317
0,10	5,3750	252,0427	11,6307
0,20	4,7500	235,4236	8,6138
0,30	4,1250	219,0271	6,2027
0,40	3,5000	205,6979	4,2872
0,50	2,8750	193,8028	2,7982
0,60	2,2500	183,0660	1,6655
0,70	1,6250	174,1017	0,8505
0,80	1,0000	167,1830	0,3311

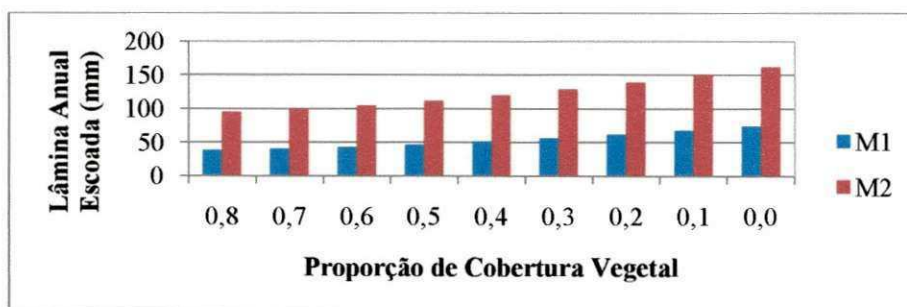


Figura 5.42 – Efeito do Desmatamento na Geração do Escoamento(BES)

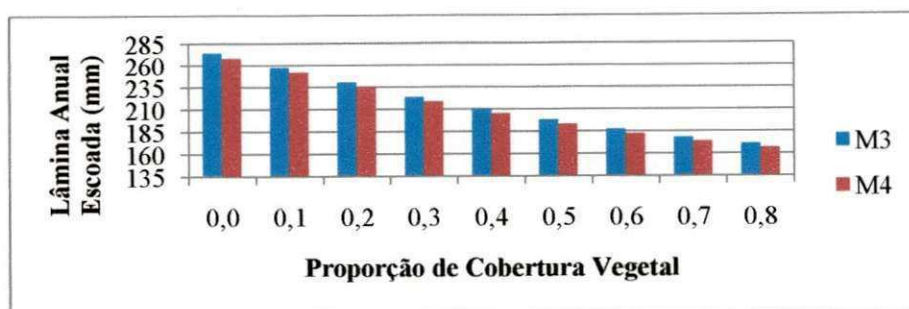


Figura – 5.43 – Efeito do Reflorestamento na Geração do Escoamento (BES)

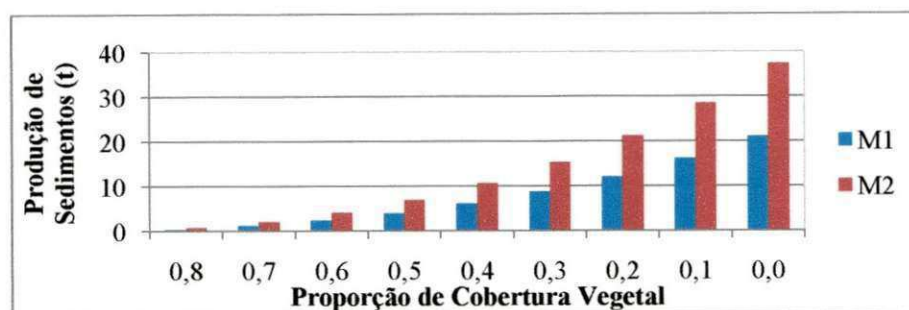


Figura – 5.44 – Efeito do Desmatamento na Produção de Sedimentos (BES)

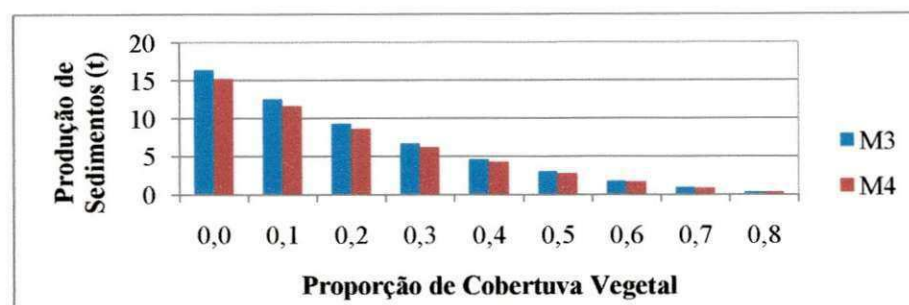


Figura 5.45 – Efeito do Reflorestamento na Produção de Sedimentos (BES)

5.9.2 Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Subbacias (BES)

Figueiredo (2009) simulou o efeito do desmatamento nos processos de geração do escoamento e erosão do solo nas bacias de Gangorra, Jatobá e Umburana. Os resultados para o ano de 1977 são apresentados na Tabela 5.65.

Tabela 5.65 – Resultados Anuais para as condições, vegetadas e não vegetada, das bacias hidrográficas (Figueiredo, 2009)

Bacias	Condição da vegetação	Lâminas (mm)	Sedimentos (t)
Umburana	Vegetada	98	26742
	Desmatada	101	29884
Jatobá	Vegetada	23	63421
	Desmatada	24	69932
Gangorra	Vegetada	70	291220
	Desmatada	87	429303

5.9.3 Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Microbacias (BESJC)

As unidades experimentais em São João do Cariri tem proporções de cobertura vegetal da ordem de 20%(M1) e 40%(M2 e M3). Sendo assim, para simulação dos efeitos das alterações da cobertura vegetal no escoamento e erosão nas microbacias de São João do Cariri ano de 2002, tomou-se como base os coeficientes de erosividade obtidos em Sumé, visto que esses coeficientes foram calibrados para proporções de cobertura vegetal variando de 0% a 80%. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.66 a 5.68, e graficamente, nas Figuras 5.46 a 5.51, a seguir.

Tabela 5.66 – Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_s (t)
0,80	1,0000	59,12	0,0611
0,70	1,6250	61,36	0,1590
0,60	2,2500	63,98	0,3068
0,50	2,8750	66,78	0,5064
0,40	3,5000	69,87	0,7568
0,30	4,1250	73,96	1,0648
0,20	4,7500	78,64	1,3990
0,10	5,3750	83,88	1,7969
0,00	6,0000	88,89	2,2632

Tabela 5.67 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_s (t)
0,80	1,0000	3,934	0,0455
0,70	1,6250	4,17	0,0909
0,60	2,2500	4,47	0,1218
0,50	2,8750	4,82	0,1430
0,40	3,5000	5,22	0,1634
0,30	4,1250	5,75	0,1874
0,20	4,7500	6,43	0,2124
0,10	5,3750	7,02	0,2430
0,00	6,0000	7,69	0,2740

Tabela 5.68 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002

C_r (-)	K_r ($s^2/kg, m^2$)	L_s (mm)	E_s (t)
0,80	1,0000	1,22	0,4569
0,70	1,6250	1,28	0,8060
0,60	2,2500	1,34	0,8915
0,50	2,8750	1,42	0,9694
0,40	3,5000	1,50	1,0559
0,30	4,1250	1,61	1,1563
0,20	4,7500	1,74	1,2651
0,10	5,3750	1,88	1,3802
0,00	6,0000	2,02	1,5027

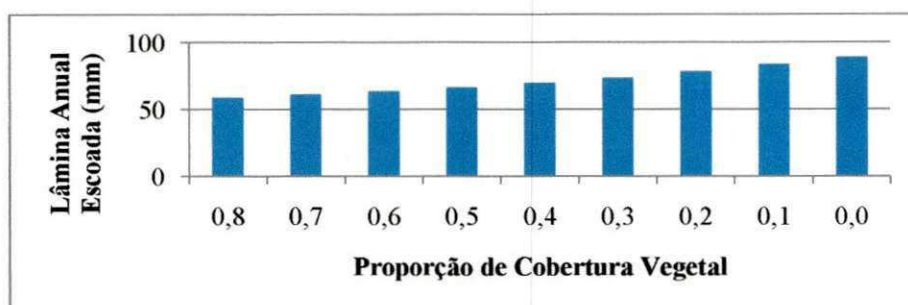


Figura 5.46 – Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002

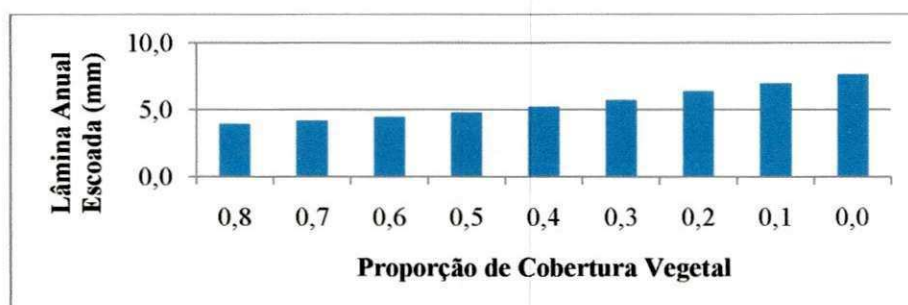


Figura 5.47 – Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002

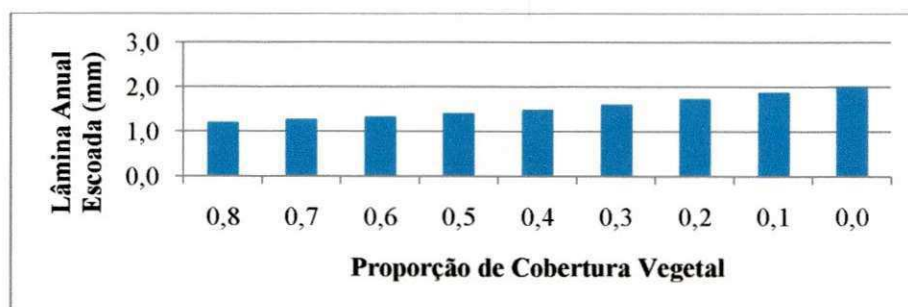


Figura 5.48 – Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002

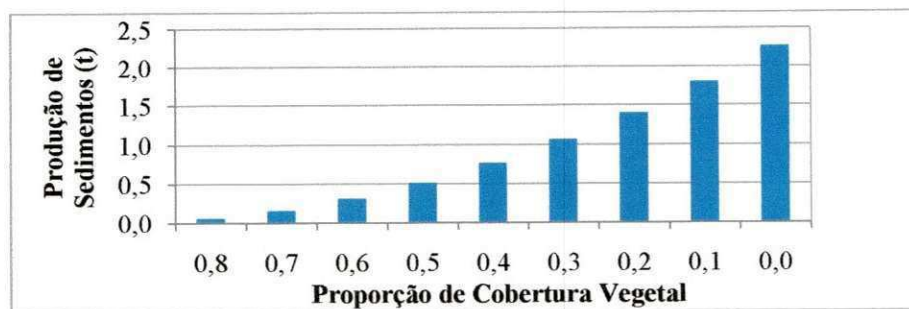


Figura 5.49 – Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M1 (BESJC) – ano de 2002

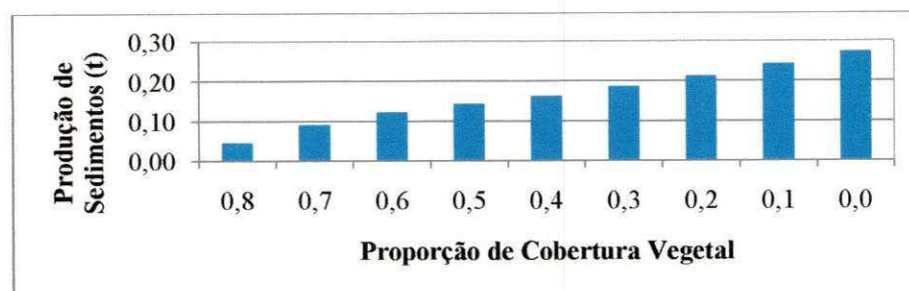


Figura 5.50 – Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M2 (BESJC) – ano de 2002

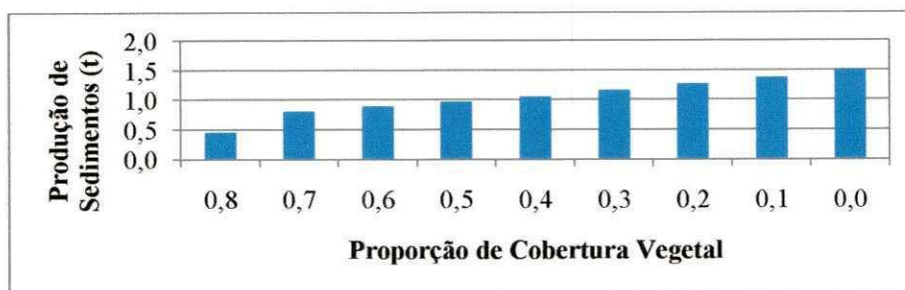


Figura 5.51 – Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em M3 (BESJC) – ano de 2002

5.9.4 Simulações dos Efeitos das Alterações da Cobertura Vegetal – Sub-bacias (BESJC)

Procedimento análogo foi adotado para realização das simulações nas sub-bacias em São João do Cariri. No entanto, como dito anteriormente, o modelo mesmo apresentando resultados satisfatórios no tocante ao escoamento, apresentou um elevado valor de produção de sedimentos. Mesmo assim, foram realizadas as simulações para analisar os efeitos da cobertura vegetal na produção de sedimento, apesar dos resultados não representarem a realidade no tocante a quantidade de sedimento produzido, mas ressaltam a importância da cobertura vegetal na proteção do solo. Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 5.69, e graficamente, nas Figuras 5.52 e 5.53.

Tabela 5.69 - Resultado da simulação para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 e SB2 (BESJC) – ano de 2006

Proporção de Cobertura Vegetal - C_g (-)	SB1 Lâmina (mm)	SB2 Lâmina (mm)
0,80	13,49	17,45
0,70	21,55	28,23
0,60	30,17	39,22
0,50(*)	38,99	50,44
0,40	48,23	62,12
0,30	59,20	76,02
0,20	70,23	89,75
0,10	81,89	104,26
0,00	94,02	119,32

(*) Valor utilizado na modelagem

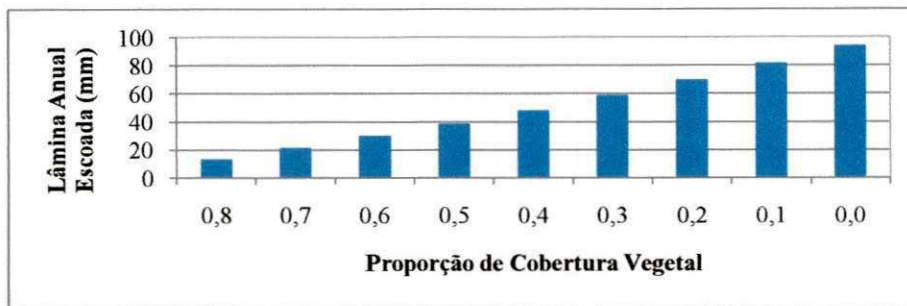


Figura 5.52 – Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2006

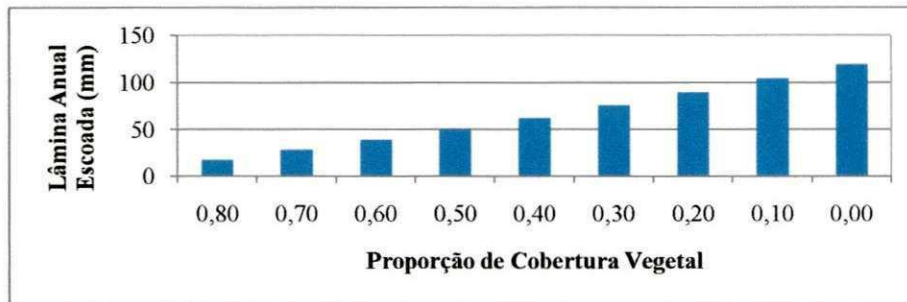


Figura 5.53 – Lâminas simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2006

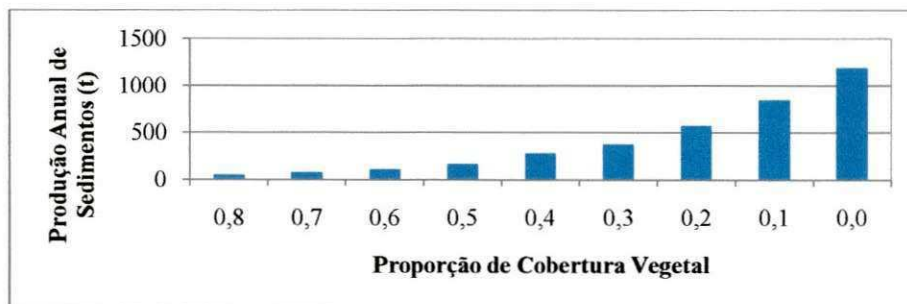


Figura 5.54 – Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB1 (BESJC) – ano de 2004

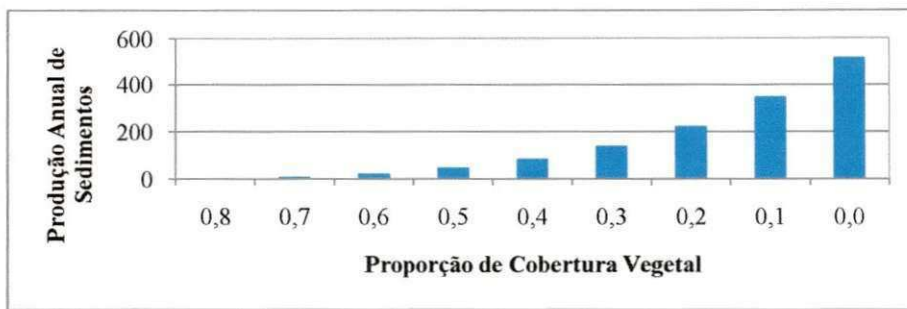


Figura 5.55 – Erosões simuladas para diferentes proporções de cobertura vegetal em SB2 (BESJC) – ano de 2004

CAPÍTULO VI – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo, serão apresentadas a análise e discussão dos resultados, obtidos com a aplicação do modelo MOSEE, na simulação do escoamento e erosão do solo, nas diversas unidades experimentais escolhidas para realização deste trabalho.

Os resultados foram analisados com base na comparação do escoamento superficial e de erosão do solo, com dados observados nas microbacias de Sumé para os anos de 1984 a 1986, nas microbacias em São João do Cariri para os anos de 2002 a 2004, e em duas sub-bacias da BESJC para os anos de 2004 a 2006. Também foram apresentados os resultados obtidos por Figueiredo (2009) com a aplicação do modelo nas bacias que compõem a Bacia Representativa de Sumé (Gangorra, Jatobá e Umburana) no ano de 1977. Em seguida, foi realizada a simulação contínua para três anos de escoamento e erosão com a utilização de parâmetros médios, obedecendo a dois critérios para cada processo: os parâmetros médios da calibração por picos e parâmetros médios da calibração pela lâmina anual para simulação contínua do escoamento; e parâmetro médio calibrado pela produção anual de sedimentos e parâmetro médio calibrado pela erosão máxima para simulação contínua do processo de erosão do solo. Os parâmetros calibrados foram o coeficiente de propagação do escoamento (C) e o coeficiente de erosividade da chuva (K_r). Finalmente, foram realizadas simulações para analisar a influência das alterações da cobertura vegetal do solo nos processos de geração do escoamento e erosão do solo.

6.1 Escoamento Superficial

Pela aplicação do modelo para simulação do escoamento superficial, pode se observar por uma análise gráfica que os resultados foram, de uma forma geral, satisfatórios.

No caso das microbacias de Sumé, inicialmente foi realizado uma primeira calibração dos parâmetros do modelo para o ano de 1986. Os resultados foram melhores nas microbacias desmatadas ($R^2_{\text{médio}} = 0,861$) do que nas vegetadas ($R^2_{\text{médio}} = 0,694$) devido a incerteza nos valores de intercepção e proporção de cobertura vegetal. Para validação do modelo utilizamos os parâmetros obtidos para o ano de 1986 para simulação dos anos de 1984 e 1985. Os resultados foram bons ($R^2 > 0,80$) com exceção da microbacia M2 no ano de 1985 que apresentou um baixo valor do coeficiente de determinação, $R^2 = 0,008$. Objetivando melhores resultados foi realizada a calibração do coeficiente de propagação do escoamento (C) primeiramente para o ajuste da lâmina anual escoada, e depois, dos picos de escoamento. Em ambas as calibrações (por lâmina anual e picos) os resultados foram melhorados, sendo de uma forma geral, os resultados com o coeficiente (C) calibrado pela lâmina um pouco melhores. O problema com a microbacia M2 persistiu, mesmo sofrendo pequena

melhora. A lâmina simulada média aumentou de 44 mm para 193 mm à medida que a chuva aumentou de 547 mm para 1247 mm nos anos 1984 a 1986 (Tabela B1 no anexo B).

Para as microbacias de São João do Cariri, o C calibrado para aproximar a lâmina anual observada da simulada, aproximou satisfatoriamente os picos fato este explicado por ter sido trabalhado na maioria dos casos com o coeficiente de propagação do escoamento no seu limite, com valor próximo de um. A lâmina simulada média aumentou de 1 mm para 60 mm à medida que a chuva aumentou de 158 mm para 717 mm nos anos 2002 a 2004 (ver Tabela B1 no anexo B). No caso das sub-bacias (SB1 e SB2) em São João do Cariri, obtivemos o coeficiente de propagação do escoamento variando $0,840 < C < 0,965$, e na comparação das lâminas anuais observadas e simuladas, $0,250 < R^2 < 0,970$. Na calibração por picos, os resultados foram próximos, com $0,830 < C < 1,000$ e $0,220 < R^2 < 0,970$. A lâmina simulada média não apresenta consistência devido aos poucos eventos com dados observados (Tabela B no anexo B).

Na simulação contínua dos três anos, utilizamos primeiramente a média dos coeficientes de propagação do escoamento calibrados com base na lâmina anual, e depois, a média dos coeficientes calibrados com base nos picos de escoamento.

Utilizando a média dos coeficientes de propagação do escoamento calibrados com base na lâmina anual, obteve-se para as microbacias de Sumé, $0,490 < R^2 < 0,875$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,745$), para as microbacias de São João do Cariri, $0,120 < R^2 < 0,690$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,315$), e para as subbacias de São João do Cariri, $R^2 = 0,726$ (SB1) e $R^2 = 0,806$ (SB2). Nas microbacias em São João do Cariri, a lâmina total simulada se aproximou da lâmina total observada, no entanto, os resultados ruins do R^2 se devem ao fato de que, nos três anos para o ajustamento da lâmina anual os coeficientes calibrados tiveram valores bem distintos, o que faz com que ao se adotar a média no ano em que os coeficientes foram menores estamos superestimando os valores simulados e nos anos em que os coeficientes forem maiores estará subestimando os valores observados, o que faz com que o coeficiente de determinação apresente esses valores baixos.

Utilizando a média dos coeficientes de propagação do escoamento calibrados com base nos picos, obteve-se para as microbacias de Sumé, $0,510 < R^2 < 0,870$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,743$), para as microbacias de São João do Cariri, $0,120 < R^2 < 0,715$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,323$); e para as sub-bacias em São João do Cariri, $R^2 = 0,729$ (SB1) e $R^2 = 0,808$ (SB2). O problema com as microbacias em São João do Cariri se repetiu, principalmente, nas microbacias M2 e M3 que tiveram $R^2 = 0,134$ e $R^2 = 0,124$, respectivamente.

6.2 Produção de Sedimentos

Nas microbacias de Sumé, realizou-se uma primeira calibração do coeficiente de erosividade da chuva K_r para o ano de 1986. De forma semelhante a simulação do escoamento, os resultados foram melhores nas áreas desmatadas, com $R^2_{\text{médio}} = 0,427$

(áreas desmatadas) e $R^2_{\text{médio}} = 0,396$ (áreas vegetadas). Procedimento análogo foi adotado para validação do modelo, ou seja, utilizou-se os coeficientes de erosividade da chuva obtidos para o ano de 1986 e simulou-se a produção de sedimentos nos anos de 1984 e 1985. O melhor resultado no ano de 2004 foi em M1 ($R^2 = 0,678$) e o pior foi em M3 ($R^2 = 0,0101$); e para 2005, o melhor resultado foi também de M1 ($R^2 = 0,684$) e o pior foi de M2 ($R^2 = 0,123$). Tais resultados demonstram a necessidade de calibração do coeficiente de erosividade da chuva, para ajustar os valores observados e simulados. O coeficiente de erosividade da chuva foi calibrado, primeiramente, comparando-se a produção anual de sedimentos, e em seguida comparando-se a erosão máxima observada e a simulada.

A calibração de K_r com base na erosão total anual para as microbacias de Sumé apresentou os seguintes resultados, $R^2_{\text{médio}} = 0,427$ (ano de 1984), $R^2_{\text{médio}} = 0,384$ (ano de 1985) e, $R^2_{\text{médio}} = 0,433$ (ano de 1986), apresentando baixos coeficientes de determinação para a microbacia M3 no ano de 1984 ($R^2 = 0,009$), e para a microbacia M2 no ano de 1985 ($R^2 = 0,149$). Em ambos os casos, conseguimos aproximar satisfatoriamente a lâmina anual simulada da observada, sendo os baixos valores de R^2 oriundos de alguns valores que precisam ser mais bem analisados. Para as microbacias de São João do Cariri, a calibração desse parâmetro resultou nos valores, $R^2_{\text{médio}} = 0,428$ (ano de 2002), $R^2_{\text{médio}} = 0,815$ (ano de 2003) e, $R^2_{\text{médio}} = 0,492$ (ano de 2004) sendo para todas as unidades experimentais os resultados considerados satisfatórios. No caso das sub-bacias, não foi possível a calibração do K_r , visto que, mesmo adotando valores bem próximos de zero, e.g. 0,0005, o valor da erosão simulada ficava bem acima do valor observado.

Para simularmos de forma contínua a produção de sedimentos (para os três anos) foi utilizado primeiramente a média dos coeficientes de erosividade da chuva calibrados com base na produção anual de sedimentos, e em seguida, a média dos coeficientes calibrados com base na erosão máxima.

A utilização da média dos coeficientes de erosividade da chuva calibrados com base na produção anual de sedimentos apresentou os seguintes resultados para as microbacias de Sumé: $0,15 < R^2 < 0,41$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,284$) com valores totais simulados e observados que podem ser considerados satisfatórios. Para as microbacias de São João do Cariri, o mesmo foi observado, ou seja, os valores totais simulados próximos dos observados, mas o coeficiente de determinação varia de $0,10 < R^2 < 0,50$ ($R^2_{\text{médio}} = 0,262$).

6.3 Simulações com diferentes proporções de cobertura vegetal

Para analisar o efeito da cobertura vegetal nos processos de escoamento e erosão simulou-se esses processos para diferentes proporções de cobertura vegetal, tomando como base os coeficientes de erosividade da chuva calibrados inicialmente nas microbacias de Sumé, ou seja, $K_r = 1,0$ para as bacias desmatadas, e $K_r = 6,0$ para as

bacias vegetadas com uma proporção de cobertura vegetal (C_g) da ordem de 80%. Para os valores de proporção de cobertura (C_g) intermediários entre 0% e 80%, utilizou-se valores de K_r entre 1,0 e 6,0 divididos em intervalos iguais. Nas microbacias desmatadas simulou-se o efeito do reflorestamento, alterando progressivamente o valor de C_g de 10 em 10%. No caso das microbacias vegetadas ($C_g = 80\%$) simulou-se o efeito do desmatamento reduzindo gradativamente a cobertura vegetal até chegarmos ao desmatamento total.

Ao simular o desmatamento das unidades experimentais vegetadas da BES observou-se que a produção de sedimentos aumentou 41,9 vezes em M1 e 44,8 vezes em M2. Na geração de escoamento houve um aumento na lâmina anual escoada na ordem de 1,9 vezes em M1 e 1,7 vezes em M2. Na simulação do reflorestamento das unidades experimentais desmatadas da BES observou-se uma redução na produção de sedimentos da ordem de 46,1 vezes em M3 e 46,0 vezes em M4. Com relação ao escoamento houve uma redução da lâmina anual escoada em torno de 1,6 em ambas as bacias (M3 e M4).

Para a análise dos efeitos da cobertura vegetal nas outras áreas estudadas, foi adotado os coeficientes utilizados em Sumé para as diferentes proporções de cobertura vegetal. As microbacias de São João do Cariri apresentam $C_g = 0,20$ (M1) e $C_g = 0,40$ (M2 e M3) e as sub-bacias $C_g = 0,50$ (SB1 e SB2), o que impossibilitou a calibração de K_r para $C_g = 0,0$ e $C_g = 0,80$ nas unidades experimentais de São João do Cariri.

Com relação ao escoamento superficial nas microbacias de São João de Cariri, quando foi alterado a proporção de cobertura vegetal de 80,0% para 0,0% observou-se que a lâmina escoada aumentou 1,50 vezes em M1, 1,96 vezes em M2, e 1,65 vezes em M3. Para realização desta simulação utilizou-se os dados de chuva do ano de 2002. Nas sub-bacias quando foi realizado a mesma alteração na cobertura vegetal viu-se que o escoamento superficial aumentou 6,97 vezes para a sub-bacia SB1, e 6,98 vezes para SB2.

Com relação à erosão do solo, quando foi alterada a proporção de cobertura vegetal de $C_g = 0,80$ para $C_g = 0,0$, observou-se que a produção de sedimentos aumentou 37 vezes em M1, 6,02 vezes em M2 e 3,29 vezes em M3. A alta produção de sedimentos simulada na microbacia M1 está diretamente relacionada ao escoamento simulado. Os dados observados de lâmina escoada em M1 apresentam-se muito superiores aos escoamentos nas demais microbacias. Nas sub-bacias a produção de sedimentos aumentou 21,7 vezes na SB1 e 154,6 vezes em SB2. O resultado das simulações nas sub-bacias mostra que o modelo superestimou a produção de sedimentos, e apresentou para essas unidades inconsistência na resposta das alterações da proporção de cobertura vegetal.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 – Conclusões

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que

- a) O modelo simulou satisfatoriamente os processos de escoamento e erosão do solo de forma contínua, sob diferentes condições de precipitação e uso do solo, na maioria das escalas investigadas.
- b) Os resultados obtidos para o escoamento foram, de forma geral, melhores do que os resultados da erosão do solo;
- c) Os resultados obtidos com a parametrização do modelo em diferentes condições de uso do solo, e a utilização desses parâmetros calibrados para simulações dos efeitos das alterações do uso do solo, mostraram-se bastante consistentes.
- d) Com a utilização dos parâmetros calibrados em uma pequena área (microbacia) sob um determinado regime pluviométrico, em outras pequenas áreas hidrologicamente semelhantes, mas sob regimes pluviométricos diferentes, os resultados foram satisfatórios.
- e) A simulação dos processos para três anos de forma contínua utilizando parâmetros médios apresentou resultados que podem ser considerados bons.
- f) Nota-se claramente o efeito da cobertura vegetal, amortecendo o impacto das gotas de chuva, e retardando o escoamento superficial, conseqüentemente, reduzindo a lâmina escoada e a produção e transporte de sedimentos.
- g) A boa qualidade dos resultados com a calibração do coeficiente de propagação do escoamento (C) para ajuste dos picos anuais, e do coeficiente de erosividade da chuva (K_r) para ajuste das erosões máximas anuais, mostra que a calibração, se realizada evento a evento levaria a resultados ainda melhores.
- h) O modelo MOSEE não produziu escoamento sub-superficial significativo, visto que nas áreas estudadas o escoamento é gerado predominantemente pelo excesso de precipitação sobre a capacidade de infiltração do solo.
- i) Os resultados de lâminas escoadas foram bastante sensíveis aos índices de precipitação anual.

7.2 – Recomendações

Segue como recomendações para novas pesquisas:

- a) Utilizar outras metodologias de cálculo de transporte de sedimentos visando identificar qual delas melhor descreveria o processo.
- b) Analisar o efeito da cobertura vegetal realizando as simulações com base em dados de desmatamento e/ou reflorestamento reais sob diferentes condições de chuva, nas mesmas áreas ou em áreas hidrologicamente semelhantes.
- c) Investigar alternativas de cálculo da capacidade de infiltração com base em dados experimentais.
- d) Testar as várias metodologias de cálculo para a parametrização do modelo, já inseridas no programa.
- e) Analisar o efeito de escala sobre os parâmetros do modelo e processos simulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. e Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.*, 87: 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. e Rasmussen, J. (1986b). An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.*, 87: 61-77.
- Albuquerque, J. do P. T. de. (1970) Inventário hidrogeológico do Nordeste; folha 15 Jaguaribe – SE. Recife, SUDENE. 187. Série Brasil. SUDENE. Hidrogeologia, 32.
- Alonso, C. V.; DeCoursey, D. G. (1983) Small watershed model, Proc. of the Natural Resources Modeling Symposium, U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Pingree Park, CO, pp. 40-46.
- Aragão, R. (2006) Análise da Influência Antrópica na Produção de Escoamento Superficial e Sedimentos em Bacias Hidrográficas do Cariri Paraibano Através da Modelização dos Processos Físicos e Empregos de Sig. Relatório Técnico, Edital 002/03 – FAPESQ-PB/MCT/CNPq, CNPq – Processo Nº 35.0599/2004-1
- Aragão, R. (2000). Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé – PB. Dissertação de mestrado, DEC/CCT/UFPB.
- Averjanov, S.F. (1950). About Permeability of Subsurface Soils in Case of Incomplete Saturation. *Eng. Collect.*, 7, 1950.
- Bathurst, J.C. e Purnama, A. (1991). Design and Application of a Sediment and Contaminant Transport Modelling System. IAHS, Proceedings of the Vienna Symposium, Publ. 203, 305-313.
- Bathurst, J.C., Wicks, J.M., e O'Connell, P.E. (1995). The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P.Singh (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States, pp. 563-594.
- Beasley, D.B.; Huggins, L.F.; Monke, E.J. (1980) ANSWERS: a model for watershed planning. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*; 23(4): 938-944.
- Bennett, J.P. (1974). Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3):485-492.
- Borah, D. K.; Alonso, C. V.; Prasad, S. N. (1981) Stream channel stability, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., Appendix I.

- Braga, B.; Porto, M.; Tucci, E.M. (2002a). Monitoramento de quantidade e qualidade das águas. In: Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. Org. por Rebouças, A.C., Braga, B. e Tundisi, J.G. 2.ed. São Paulo: Escrituras Editora. Cap.19, pp.635-649.
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. & Stephenson, G.R. (1984). Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE Paper No. PNR-84-203, St. Joseph, MI.
- Brandt, C.J.(1986) Transformation of the kinetic energy of rainfall with variable tree canopies. Londres: Universidade de Londres, 446 p. Tese de Doutorado.
- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrol. Paper No. 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Cadier, E. Freitas, B. J. (1982). Bacia Experimental de Sumé: Primeira Estimativa dos Recursos de Água. Recife, SUDENE. 195p.
- Cadier, E. Freitas, B.J., e Leprun, J.C. (1983). Bacia Experimental de Sumé - Instalação e Primeiros Resultados. Série Hidrologia No. 16, SUDENE, Recife-Pe, Brazil. p. 89.
- Campbel, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117:311-314.
- Campos, J. N. B. (2009). Lições em modelos e simulação hidrológica. Fortaleza - CE, Astef/Expressão Gráfica, 2009.
- Carvalho, N. O. (1994). Hidrossedimentologia Prática. Rio de Janeiro, CPRM, 372p.
- Chaves, L. H. G.; Chaves, I. B.; Vasconcelos, A. C. F.; Silva, A. P. P. (2002) Salinidade das Águas Superficiais e Suas Relações com a Natureza dos Solos na Bacia Escola do Açude Namorado e Diagnóstico do Uso e Degradação das Terras - RELATÓRIO TÉCNICO, UFPB, Campina Grande, Vol. 1, 114p.
- Checchia, T.(2005). Avaliação da Perda de Solo por Erosão Hídrica e Estudo de Energia na Bacia do Rio Caeté, Alfredo Wagner – Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. UFSC.
- Chow, V. T., Maidment. D. R. e Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, 572p.
- Christofolletti, A.(1981). A Geomorfologia fluvial. São Paulo: Ed Blucher, 313p
- Christofolletti, A.(1999). Modelagem de sistemas ambientais. 1a ed. São Paulo: Editor Edgard Blucher, 236p.

- Cosby, B.J., Hormberger, G.M., Clapp, R.B. & Ginn, T.R. (1984). A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Res. Res.* 20(6), 682-690.
- Crawford, N. H.; Donigian, A. S. Jr. (1973) Pesticide transport and runoff model for agricultural lands. Report No. EPA 660/274-013, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Cruz, E. S. (2004). Estudo dos Impactos do Uso do Solo Através da Modelagem da Geração do Escoamento Superficial e Erosão do Solo na Região do Cariri Paraibano. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.
- Davi, H. H. R. C.(2004). Um Modelo para Simulação Hidrossedimentológica em Pequena Escala. Dissertação de mestrado, UAEC/CCT/UFCG.
- Engelund, F. & Hansen, E. (1967). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen.
- Ewen, J., Parkin, G. e O'Connell, P. E. (2000). SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *J. Hydrologic Engineering*, vol. 5, No. 3, ASCE.
- Feddes, R.A. & Zaradny, H. (1977). Numerical model for transient water flow in non-homogeneous soil-root systems with groundwater influence. In: *Modeling, Identification and Control in Environmental Systems*, Vansteenkiste, ed., IFIP North-Holland Publishing Company (1978).
- Feddes, R.A., Kowalik, P., Neuman, S.P & Bresler, E. (1978). Finite Difference and Finite Element Simulation of Field Water Uptake by Plants. *Hydrol. Sci. Bull.*,21, 81-98.
- Figueiredo E. E. (2008). Sediment yield modelling at micro-basin and basin scales in semi-arid regions of Brazil. *Sediment Dynamics in Changing Environments*. IAHS Publ. 325, pp. 157-166. Christchurch, New Zealand.
- Figueiredo E.E.(2009). MOSESS_2D. A model for runoff and soil erosion prediction at the catchment scale .Projeto de pós-doutoramento. University of Sheffield, UK
- Figueiredo, E. E. & Davi, H. H. R. C. (2006) A model for soil erosion prediction at small scales. In: *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*, 556–563. IAHS Publ. 306. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Figueiredo, E. E. & Srinivasan, V. S. (1999). Avaliação dos Impactos do uso do solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o açude Sumé - PB. CDROM, Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte - MG.

- Figueiredo, E. E. (1998) Scale effects and land use change impacts in sediment yield modelling in a semi-arid region of Brazil. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, England.
- Foster, G.R. (1982). Modeling the Erosion Process. In: Haan, C.T.; Johnson, H. P. e Brakensiek, D.L., Ed. Hydrologic Modeling os Small Watersheds, St. Joseph, American Society Agricultural Engineers, p. 297-380.
- Frere, H. M.; Onstad, C. A.; Holtan, H. N. (1975) ACTMO, na agricultural chemical transport model. ARS - H -3, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Garde, R. J; Ranga Raju, K. G.(1985). Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, p1-420.
- Guerra, A. J. T., A. S., Botelho, R. G. M. (1999). Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Horton, R. E. (1919). Rainfall interception. Monthly Weather Review. 47:603-623.
- Jetten, V. G. (1996). Interception of Tropical Rain Forest: Performance of a Canopy Water Balance Model. Hydrological Processes, Vol. 10, 671-685.
- Kerby, W.S. (1959). Time of concentration for overland flow. ASCE Civil Engineering. 29(3).
- Kirpich, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watershed. ASCE. Civil engineering, 10(6).
- Lacroix, M. P.; Martz, L. W.; Kite, G. W.; Garbrecht, J.(2002) Using Digital Terrain Analysis Modeling Techniques for the Parametrization of a Hydrological Model. Environmental Modelling & Software, v. 17, p.127-136.
- Laursen, E.M. (1958). The Total Sediment Load of Streams. J. Hydr. Div. ASCE, 54(HY1) 1-36.
- Li, R. M.(1979) Water and sediment routing from watersheds, In:H. W. Shen(editor), Modeling of Rivers. Wiley-Interscience, New York, pp. 9-1-9-88.
- Lopes, V.L. (1987). A Numerical Model of Watershed and Sediment Yield, Ph.D. Dissertation, University of Arizona.
- Lopes, W.T.A. (2003). Efeito de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba. Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFCG.
- Maidment, D. R. (1993). GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.;Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, Cap. 14, p.147-167.

- Markowitz, A.; Green, L.T.; Laine, J. (2003). The 3c's: communicate, coordinate, collaborate doing together what we can't do alone. Herndon . Water Resources Impact, v.5, n.5, pp.03-07, sept.
- McCuen, R.H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, United States.
- Medeiros, P.H.A.; De Araújo, J.C.; Bronstert, A.(2009) Interception measurements and assessment of Gash Model performance for a tropical semi-arid region. Revista Ciência Agronômica, 40(2).
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and Environment. In: The State and Movement of Water in Living Organisms, Proc. 15th Symposium for Experimental Biology, Swansea, Cambridge Univ. Press, London, 205-234.
- Mualem, Y. (1978). Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media: Generalized Macroscopic Approach. Water Res. Res., Vol. 14, No. 2, 325-334.
- Nouvelot, J. F. (1974). Planificação da Implantação de Bacias Representativas: Aplicação à Área de SUDENE. SUDENE, Recife. (in Portuguese).
- Paiva, F. M. L. (2008) Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Microbacias na região Semi-árida Paraibana. Dissertação de Mestrado. UAEC/CTRN/UFCCG.
- Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-145.
- Pimentel da Silva, L.E.; Ewen, J. (2000). Modelagem hidrológica para grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas tecnologias. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 5, n.4, 81-92.
- Ramos, C. L. (1995). Erosão Urbana e Produção de Sedimentos. In: Carlos E. M. Tucci, R. L. Porto, & M. T. Barros, Drenagem Urbana (pp. 241-275). Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS.
- Rawls, W.J. AND Brakensiek, D.L. (1989). Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties. In: H.J.Morel-Seytoux (editor). Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling Theory and Practice, 275-300, Kluwer Academic Publisher.
- Rawls, W.J., Gimenez, D., Grossmann, R. (1998). Use of soil texture, bulk density and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulics conductivity. Trans. ASAE 41 (4), 983-988.
- Rennó, C. D.; Soares, J.V. (2000). Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Relatório Técnico Parcial. São José dos Campos: INPE. 65p.
- Righetto, A. M. (1998). Hidrologia e Recursos Hídricos. São Paulo: EESC/USP.

- Santos, I; Fill, H.D.; Sugai, M. R. V. B.; Buba, H.; Kishi, R.T.; Marone, E.; Lautert, L. F.; (2001). *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento. 372p.
- Santos, L. L. (2008). *Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três Modelos em Pequenas Sub-Bacias na Região Semi-Árida Paraibana*. Dissertação de Mestrado. UAEC/CTRN/UFCG
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Rosemberger, J.S. and Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 50, 1031-1036.
- Shaw, E.M. (1994). *Hydrology in practice*. Chapman and Hall. London.
- Simons, D. B.; Li, R. M.; Stevens, M. A. (1975) Development of models for predicting water and sediment routing and yield from storms on small watersheds. USDA Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 130p.
- Simons, D. B. & Sentürk, F. (1992). *Sediment Transport Technology*. Fort Collins, Water Resources Publications. 807 p.
- Siqueira, L. (1964) Aspectos hidrogeológicos do Cariri paraibano. *SUDENE, Boletim de Recursos Naturais, Recife*, 2(1/4):11-44.
- Siviero, M. R. L. (1999). *A produção de sedimentos a montante de uma seção do Rio Atibaia associada à descarga sólida transportada*. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. Campinas – SP.
- Smith, R. E. (1976) Simulating erosion dynamics with a deterministic distributed watershed model. *Proc. of the 3th Fed. Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, CO*, 1.163-1.173.
- Smith, R. E., Woolhiser, D. A. (1981) A kinematic model for surface mine sediment yield. *Trans. of Am. Soc. Agr. Eng.*, 24 (6):1508-1514. Apud Lopes, 1987.
- Sousa, G. (2007). *MODFIPE - Um modelo Distribuído de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão do Solo*. Dissertação de Mestrado. UAEC/CTRN/UFCG.
- Srinivasan, V. S. e Galvão, C.O. (2003). *Bacia Experimental de Sumé: Descrição e Dados Coletados*. Campina Grande – PB: UFCG/CNPq.
- Srinivasan, V. S., Lopes, W. T. A. & Figueiredo, E. E. (2004) An investigation of the scale effects in runoff-erosion modeling in the semi-arid region of Brazil. In: *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation (18–21 October 2004, Yichang, China)*.
- Srinivasan, V.S., Galvão, C.O., Santos, C.A.G., Figueiredo, E.E., Rêgo, J.C., Alcântara, H.M., Albuquerque, J.P.T., Aragão, R., Melo, R.N.T., Cruz, E., Guedes, G.A., Lacerda,

- I., Santos, L.L., Alves, F.M. (2004). Bacia Experimental de São João do Cariri-PB. In: Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido, Cap. 4.
- Steyaert, L.T. (1993). A perspective on the state of environmental simulation modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T. (Eds.). Environmental modeling with GIS. Oxford : Oxford University Press. Cap.3, p. 16-30.
- Suguio, K. (2003) Geologia sedimentar. São Paulo: Edgard Blücher. 400 p.
- Tucci, C. E. M. (2006). Modelos Hidrológicos. Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre-RS, 668p.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Proc. SSSA, 44(5): 892-898.
- Vanoni, V. A.(1975) Sedimentation engineering: manuals and reports on engineering practice. n. 54. New York: ASCE, . 745 p.
- Vanoni, V. A.(1977) Sedimentation Engineering. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 743p.
- Vertessy, R. A., Hatton, T. J., O'Shaughnessy, P. J., Jayasuriya, M. D.(1993) A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. Journal of Hydrology, n.150, p.665-700.
- Villela, S, M., & Mattos, A. (1975) Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- Wicks, J.M. (1988). Physically-Based Mathematical Modelling of Catchment Sediment Yield. PhD Thesis. Dept. of Civil Eng., Univ. of Newcastle upon Tyne, England, UK., 238 p.
- Wicks, J.M. e Bathurst, J.C. (1996). SHESED: A Physically-Based, Distributed Erosion and Sediment Yield Component for the SHE Hydrological Modelling System. J.Hydrol., 175: 213-238
- Williams, J. R. (1975). Sediment Routing for Agricultural Watersheds. Water Res. Bulleting, Am. Water Res. Ass. (AWRA), 11, No. 5, pp. 965-974.
- Wischmeier, W. H. (1960). A Universal Soil-Loss Estimating Equation to Guide Conserv. Farm Planning. Trans. of the 7th Cong. Int. Soil Sci. Soc., 1:418-425.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., e Goodrich, D.C. (1990). KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- Yalin, M.S. (1963). An Expression for Bedload Transportation. J.Hydr.Div., Proc. ASCE, 89(HY3):221-250.

ANEXO A

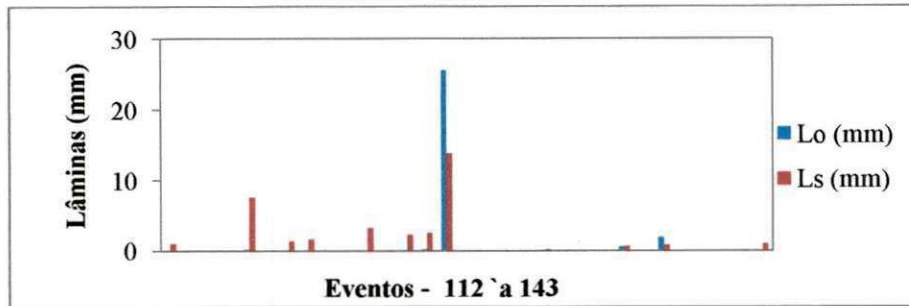


Figura A.1 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1986) – BES

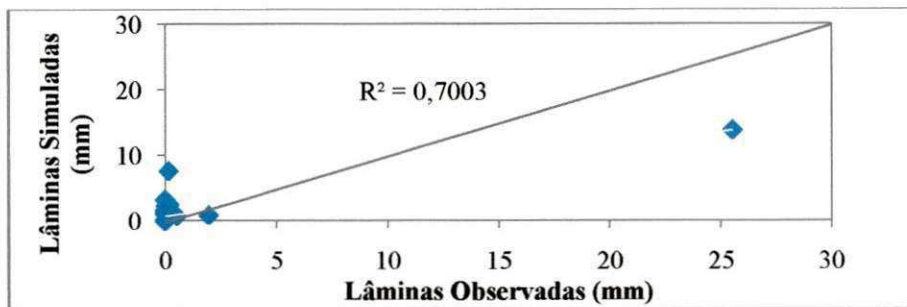


Figura A.2 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(1986) – BES

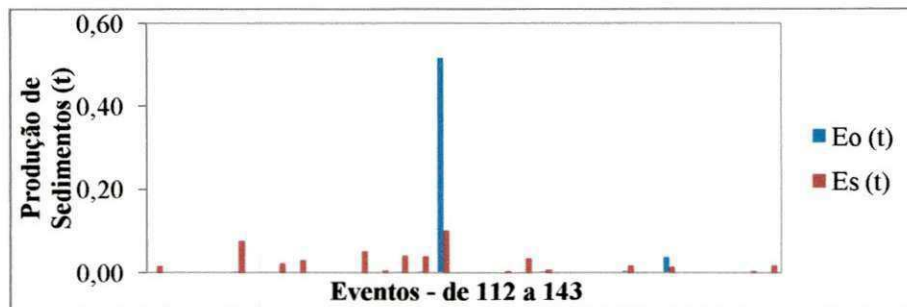


Figura A.3 – Erosão Observada e Simulada em M1 (1986) – BES

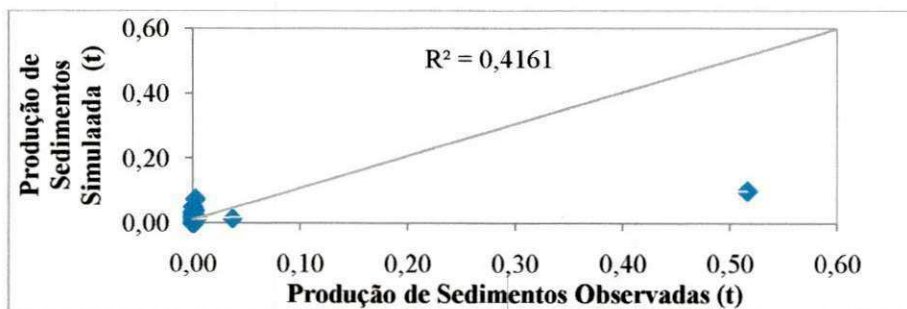


Figura A.4 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1986) - BES

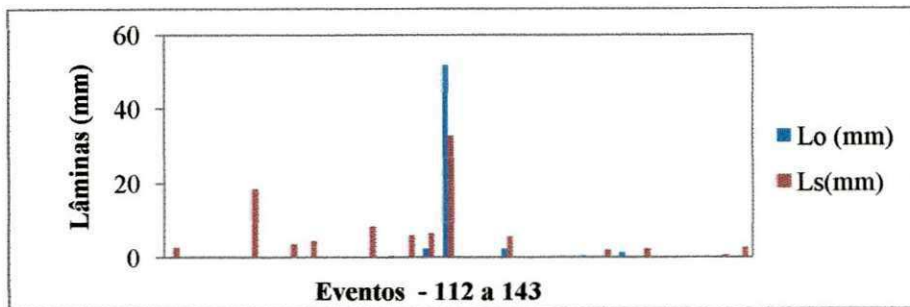


Figura A.5 – Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1986) – BES

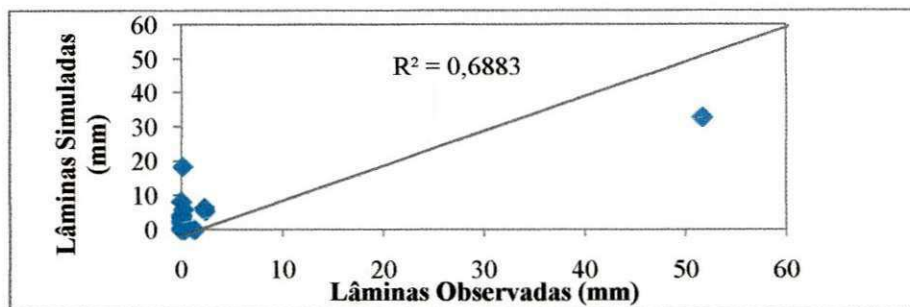


Figura A.6 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1986) – BES

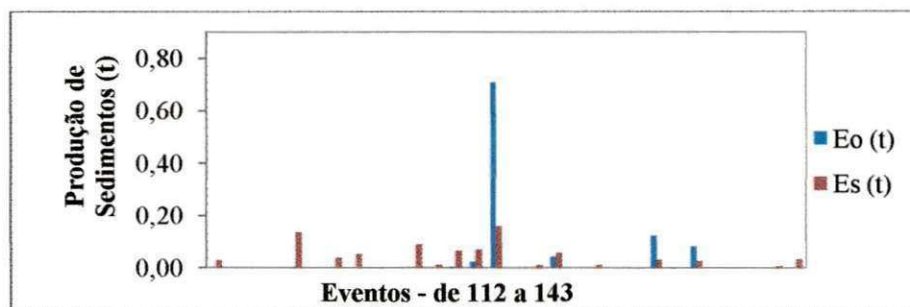


Figura A.7 – Erosão Observada e Simulada - M2 (1986) – BES

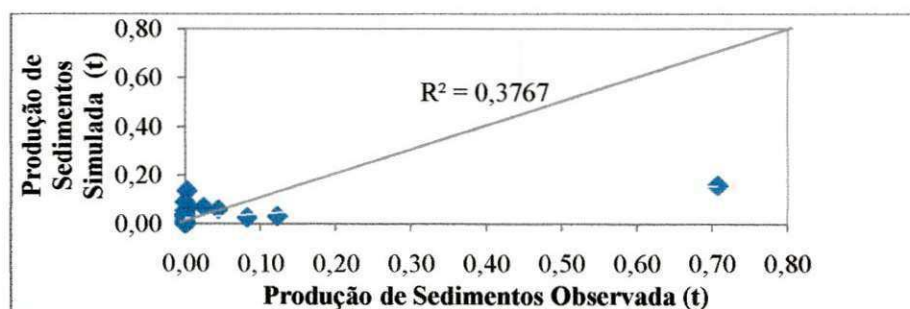


Figura A.8 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1986)- BES

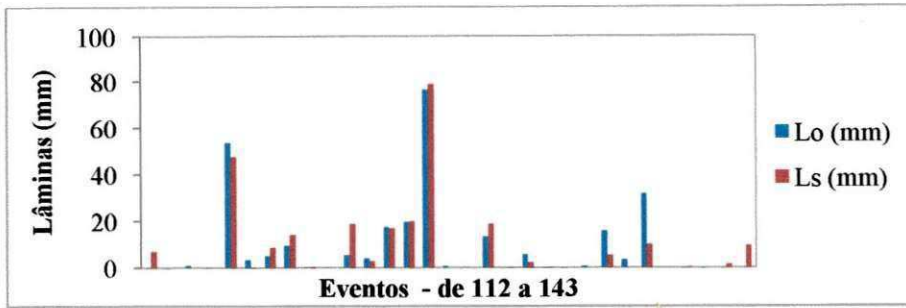


Figura A.9 – Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) – BES

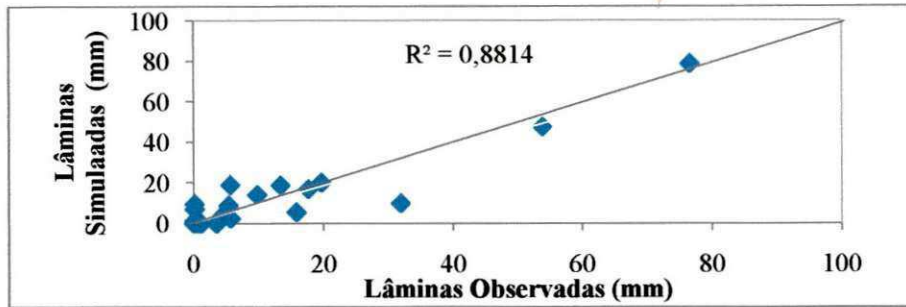


Figura A.10 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M4 (1986) – BES

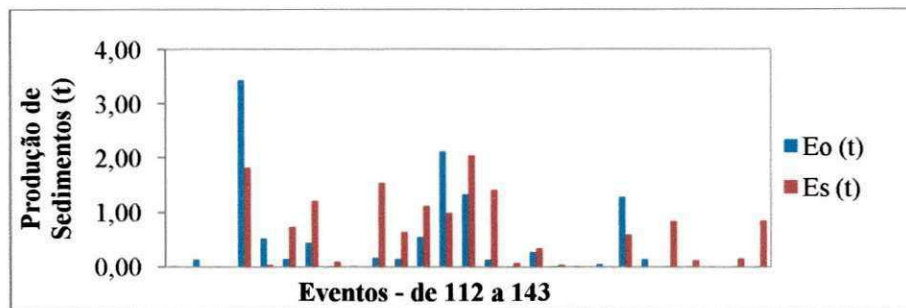


Figura A.11 – Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) – BES

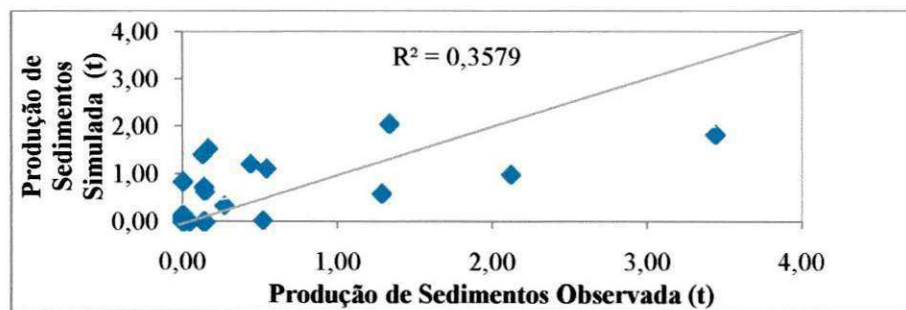


Figura A.12 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M4 (1986) – BES

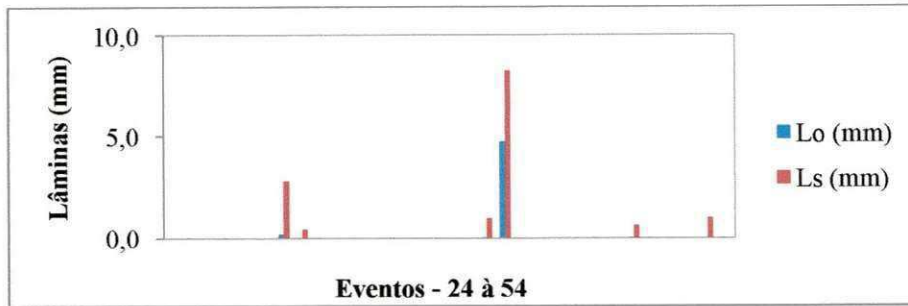


Figura A.13 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES

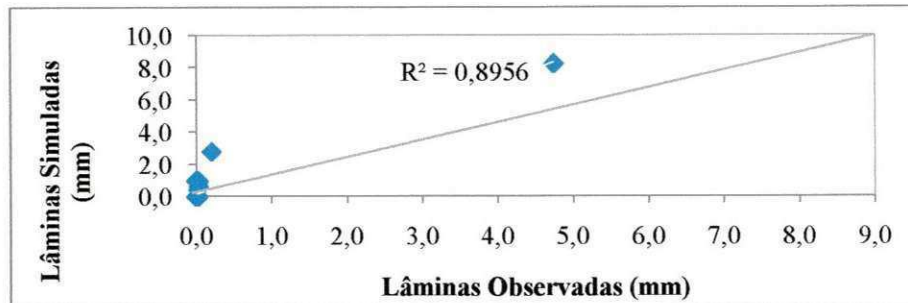


Figura A.14 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1984) – BES

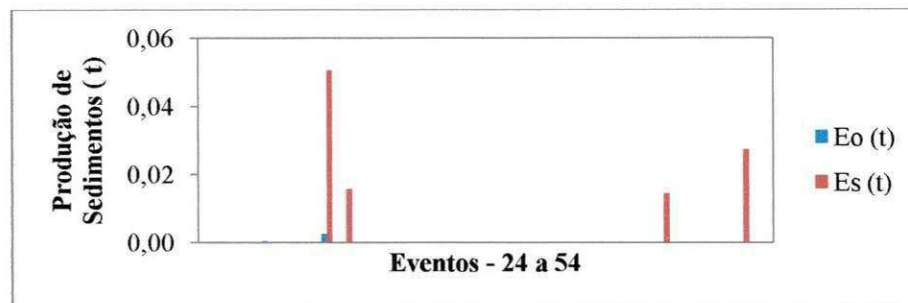


Figura A.15 – Erosão Observada e Simulada - M1 (1984)- BES

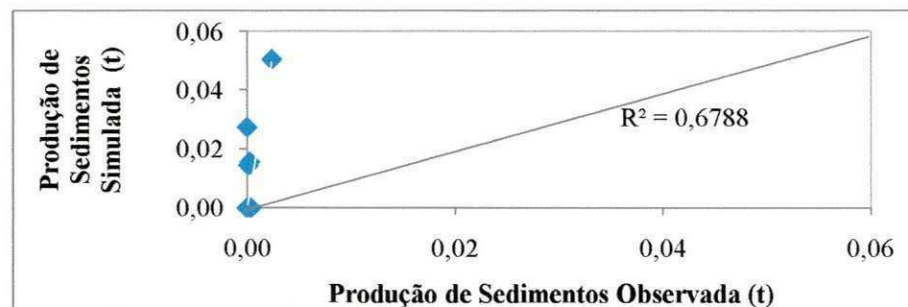


Figura A.16 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1984) - BES

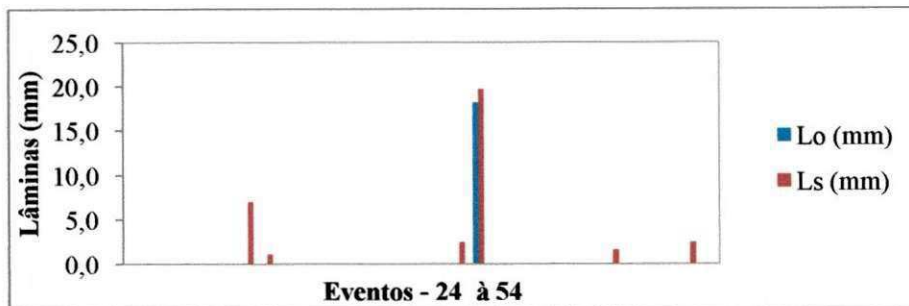


Figura A.17 – Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) – BES

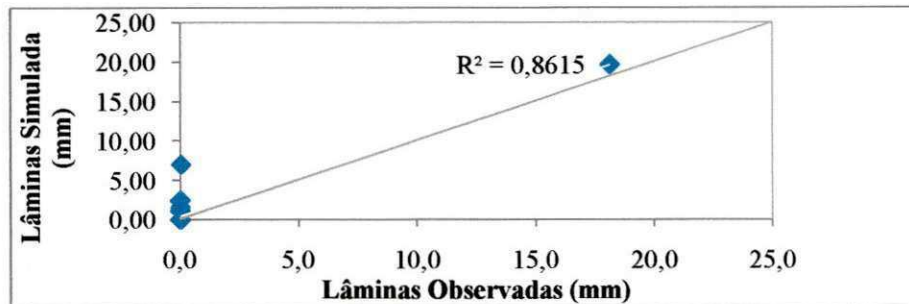


Figura A.18– Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1984) - BES

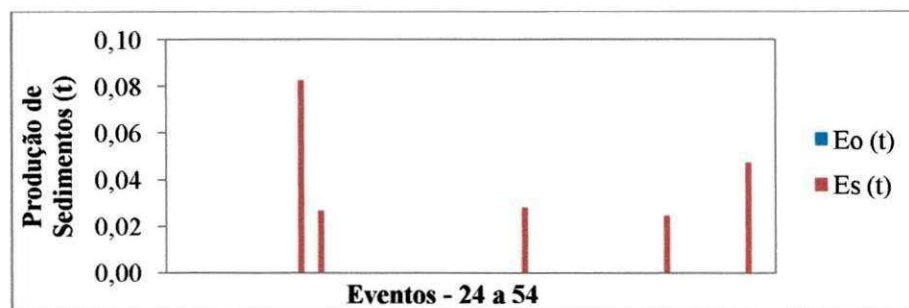


Figura A.19- Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) –BES

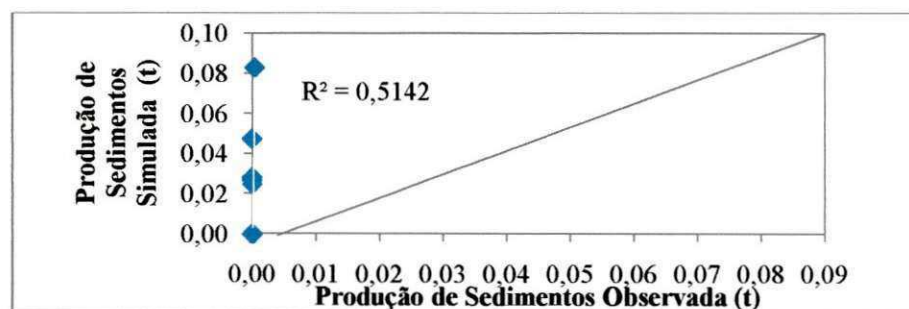


Figura A.20 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1984) - BES

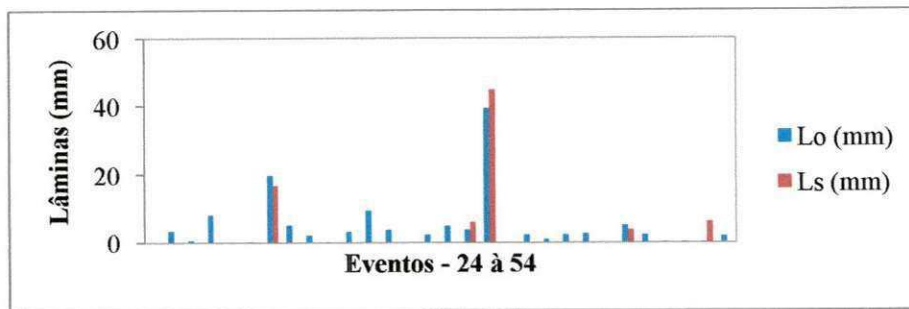


Figura A.21 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1984) – BES

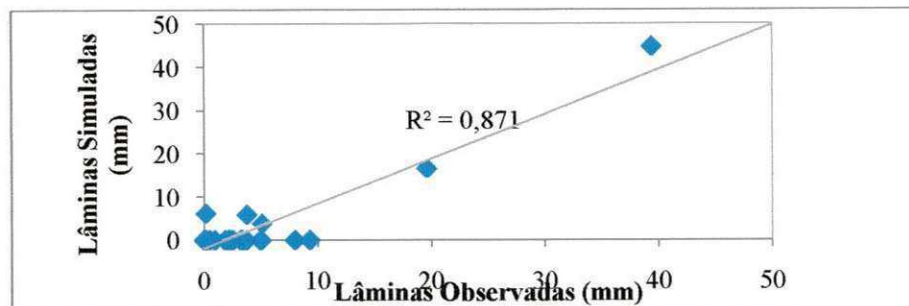


Figura A.22 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1984) – BES

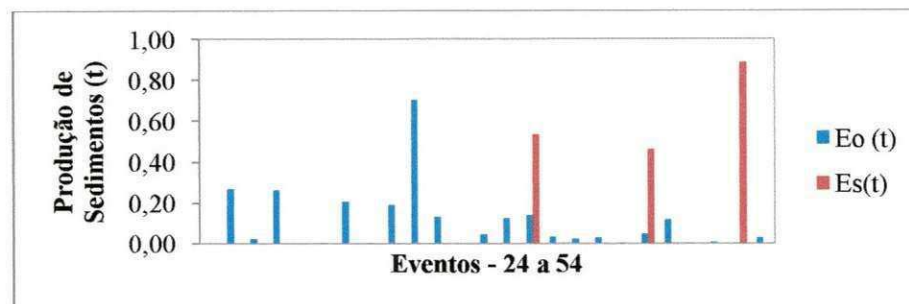


Figura A.23– Erosão Observada e Simulada em M3 (1984) – BES

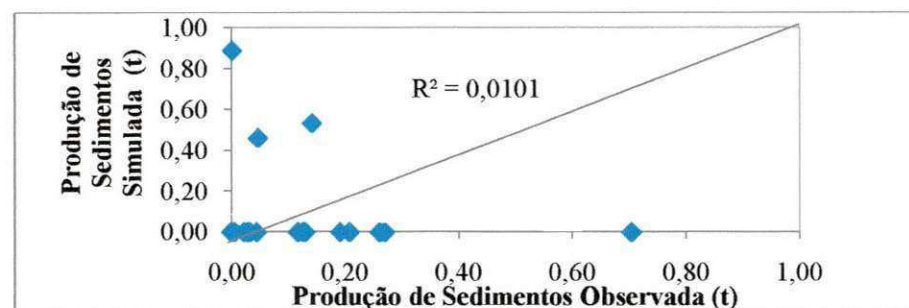


Figura A.24– Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (1984) - BES

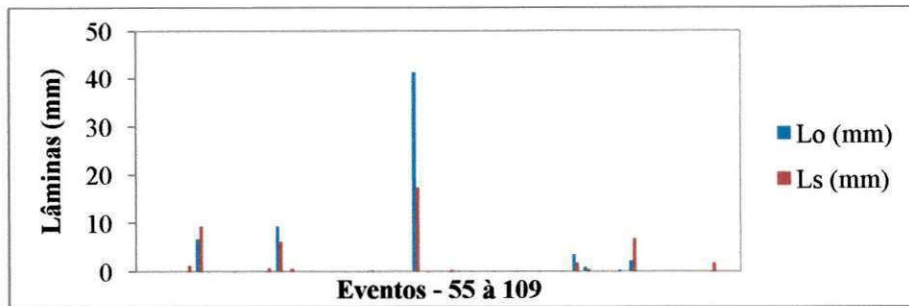


Figura A.25 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1985) –BES

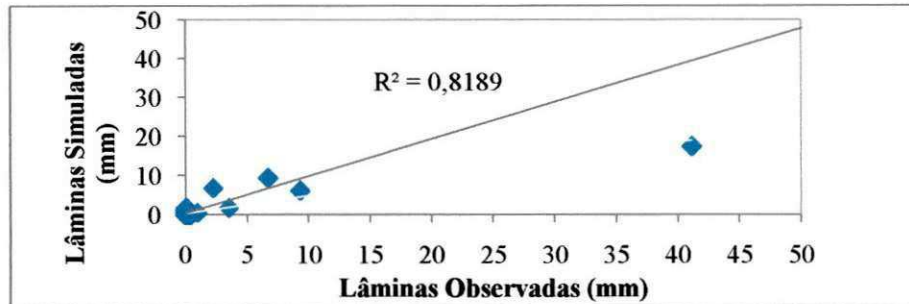


Figura A.26 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (1985) -BES

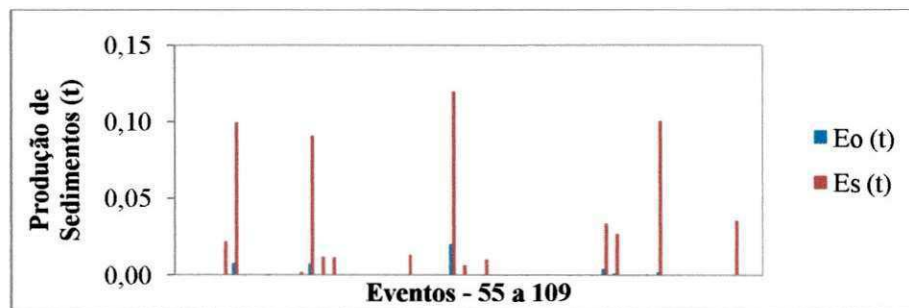


Figura A.27 – Erosão Observada e Simulada - M1 (1985) – BES

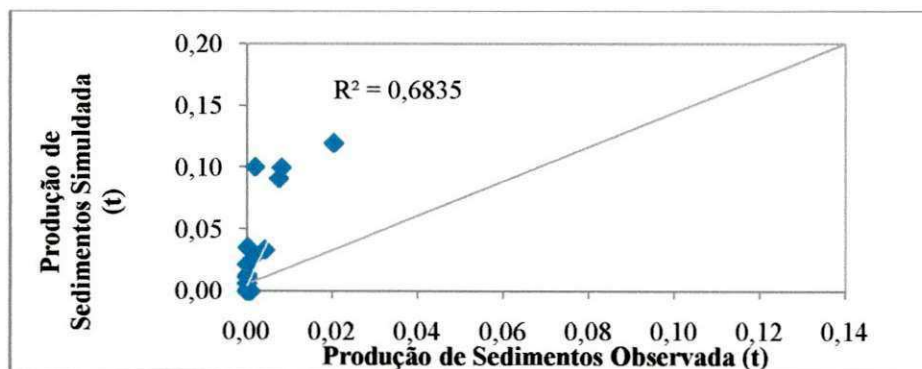


Figura A28. – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (1985) - BES

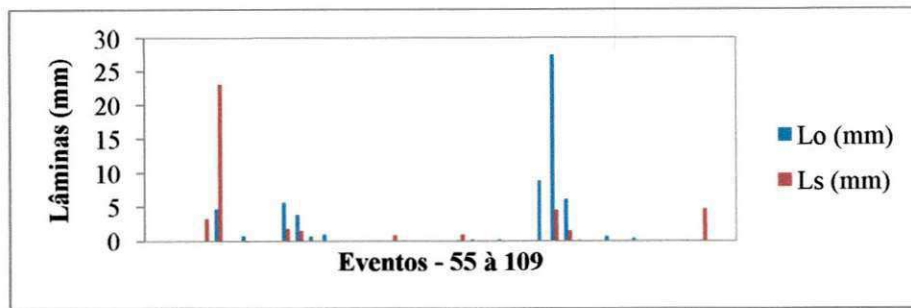


Figura A.29 – Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES

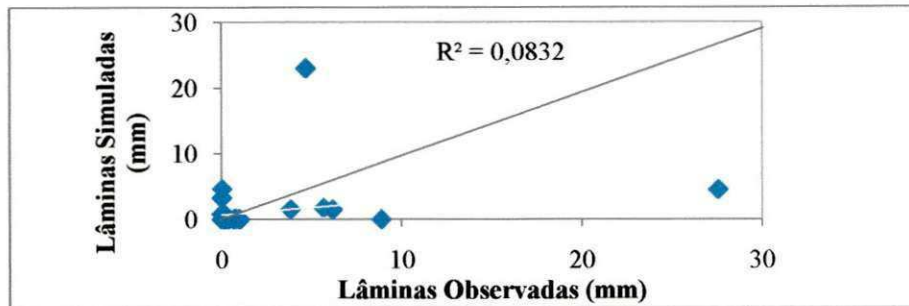


Figura A.30 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (1985) – BES

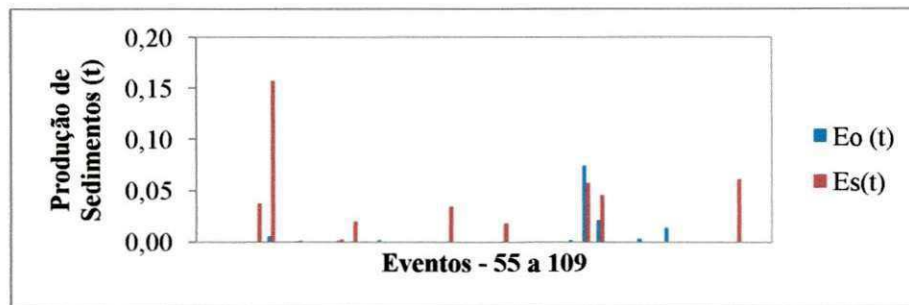


Figura A.31 – Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES

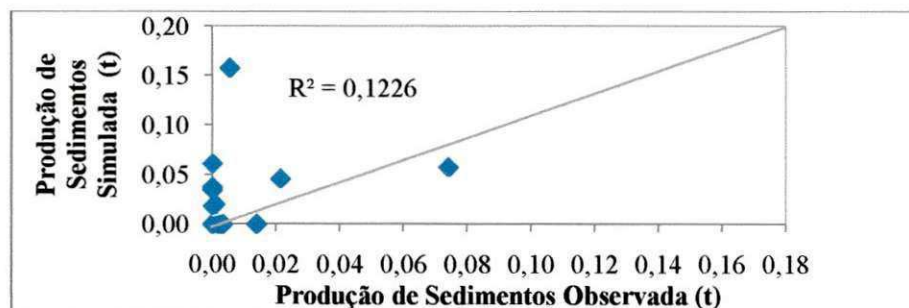


Figura A.32 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (1985) – BES

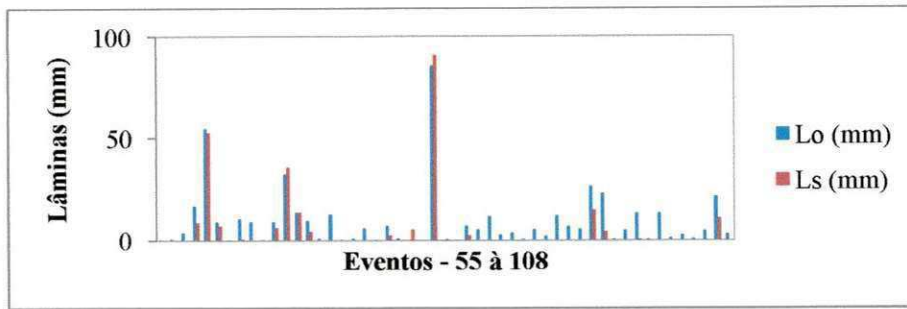


Figura A.33– Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (1985) – BES

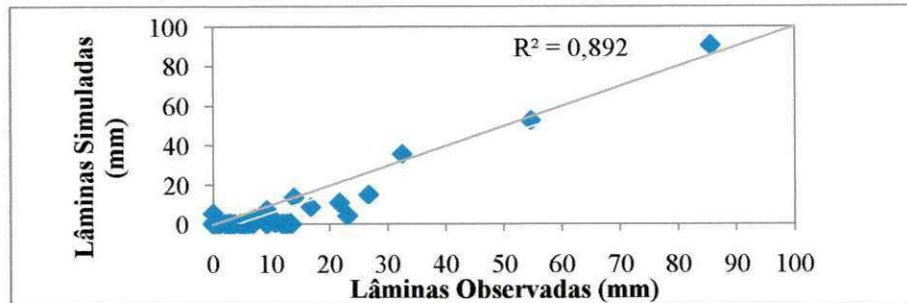


Figura A.34 – Comparação das Lâminas Observadas e Simulada - M3(1985) – BES

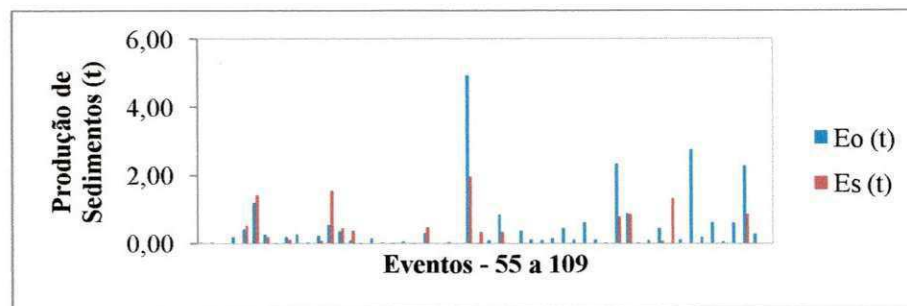


Figura A.35 – Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES

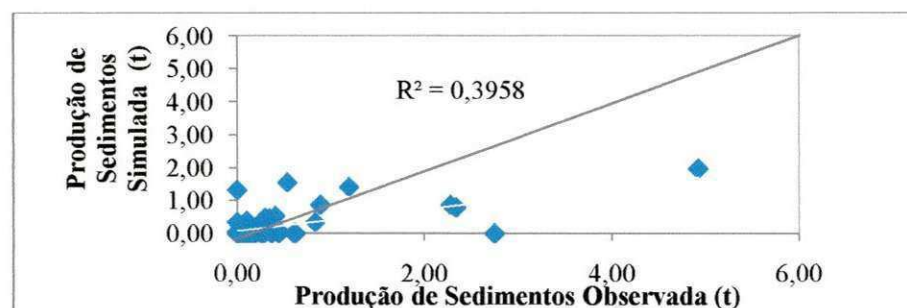


Figura A.36 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(1985) – BES

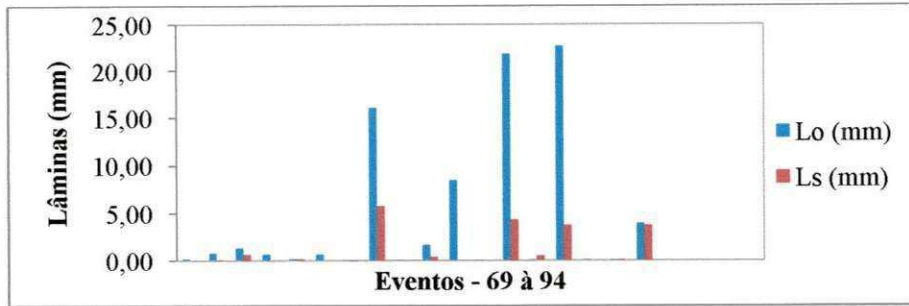


Figura A.37 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC

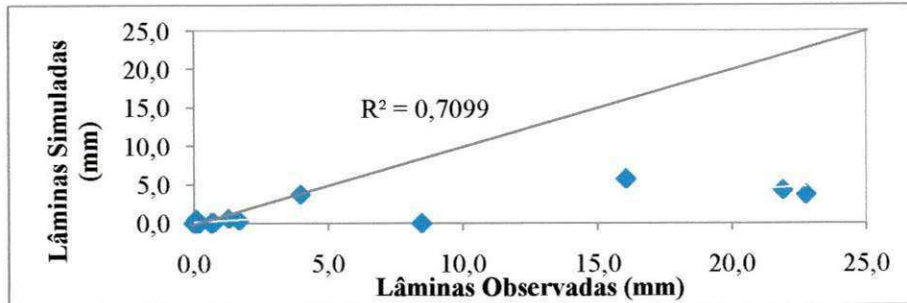


Figura A.38 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2002) – BESJC

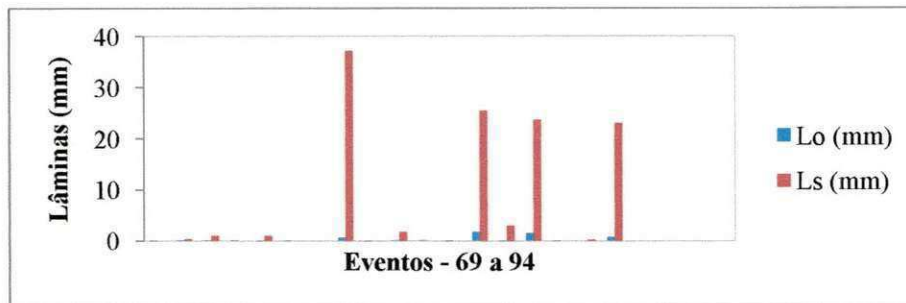


Figura A.39 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC

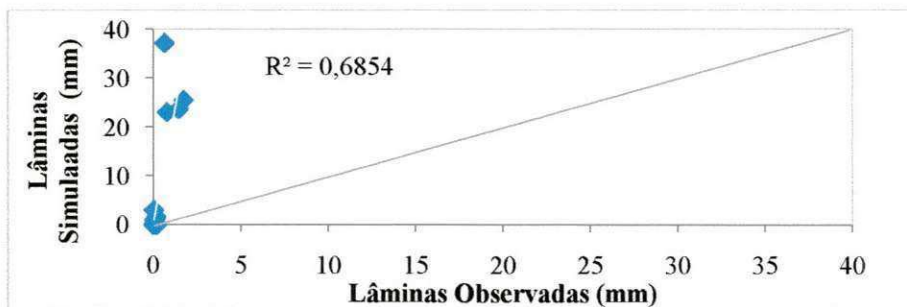


Figura A.40– Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2002) – BESJC

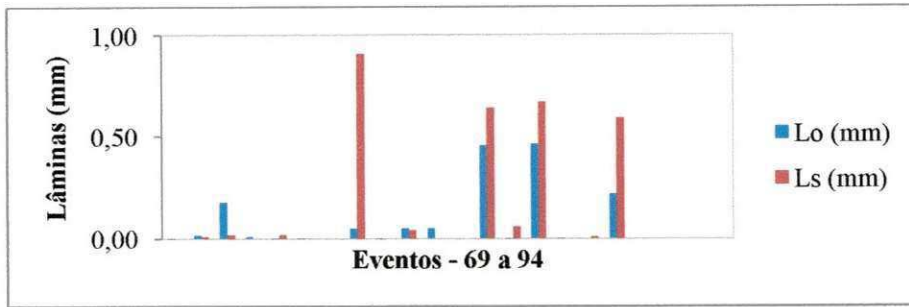


Figura A.41 – Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2002) – BESJC

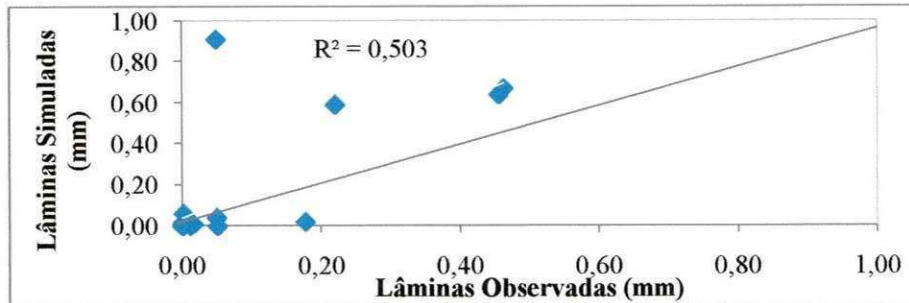


Figura A.42 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2002) – BESJC

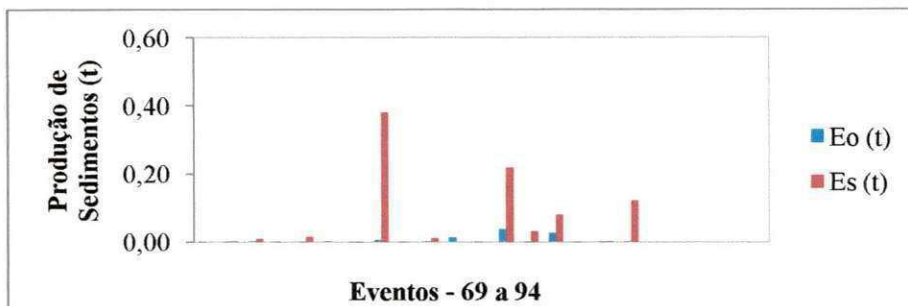


Figura A.43 – Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC

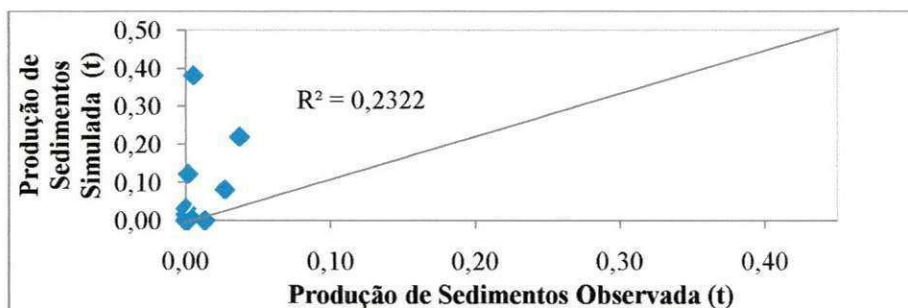


Figura A.44 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2002) – BESJC

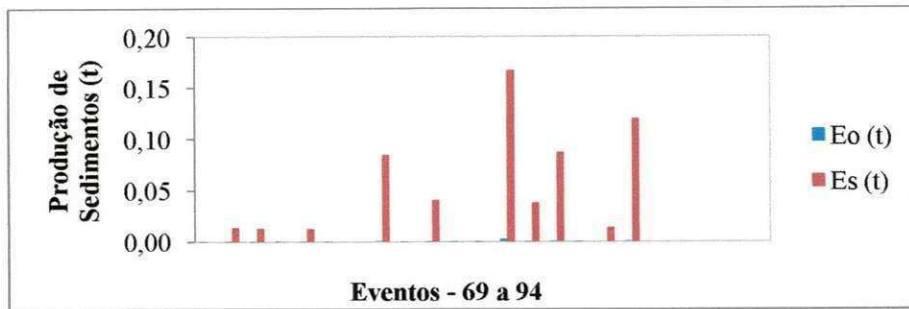


Figura A.45– Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC

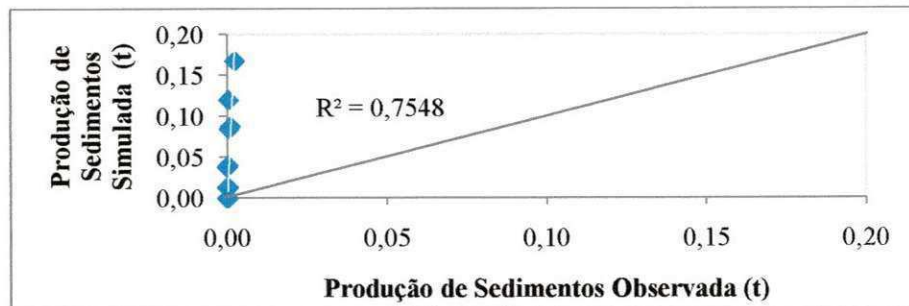


Figura A.46 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2002) – BESJC

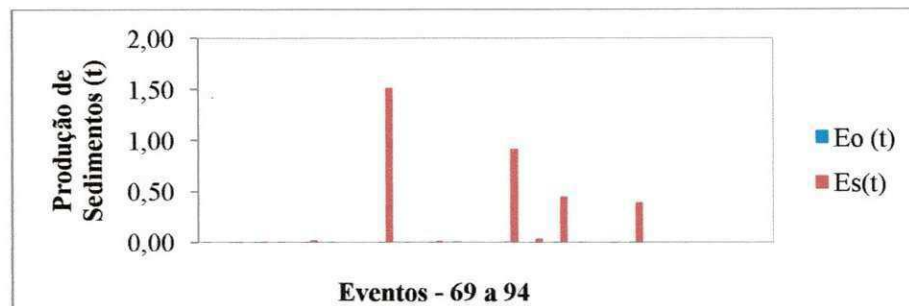


Figura A.47 – Erosão Observada e Simulada - M3 (2002) – BESJC

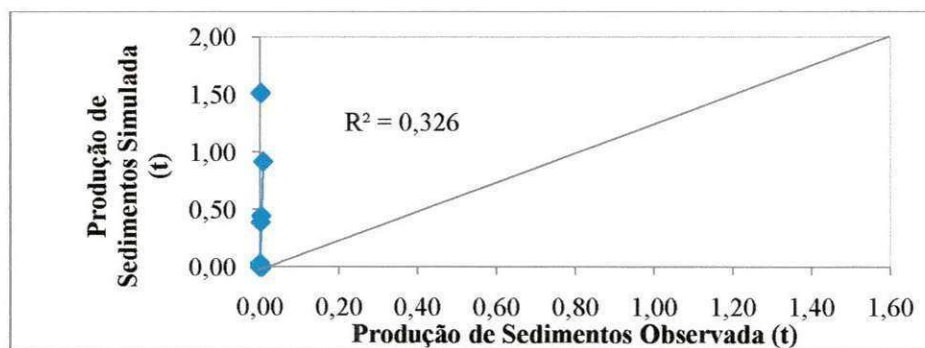


Figura A.48 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (2002) – BESJC

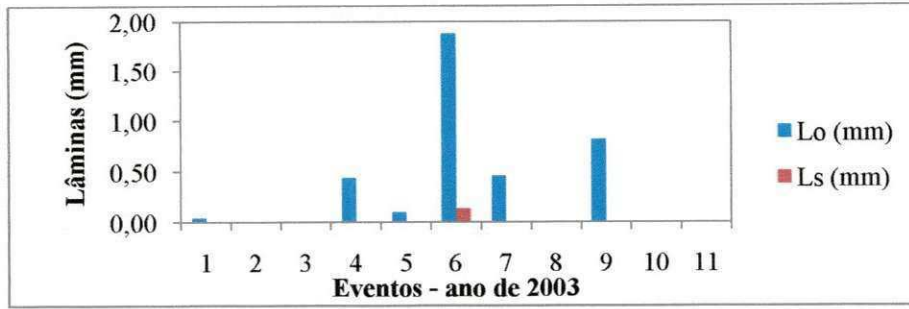


Figura A.49 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2003) – BESJC

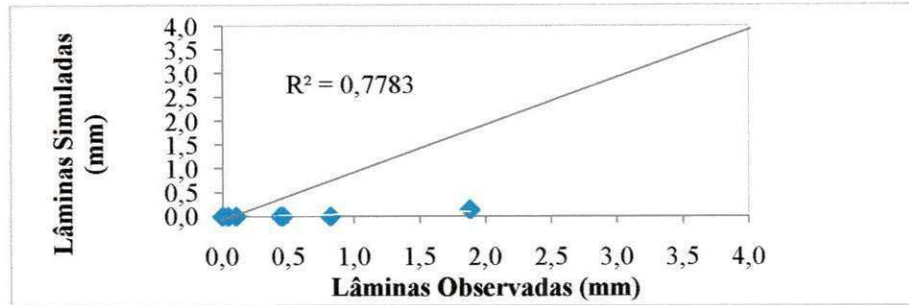


Figura A.50 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1(2003) – BESJC

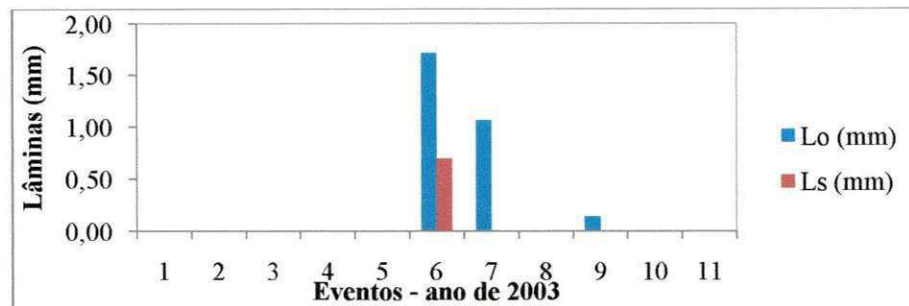


Figura A.51 - Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) – BESJC

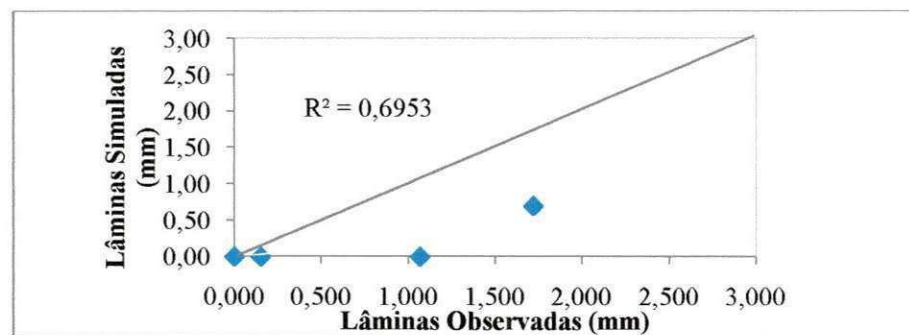


Figura A.52 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2(2003) - BESJC

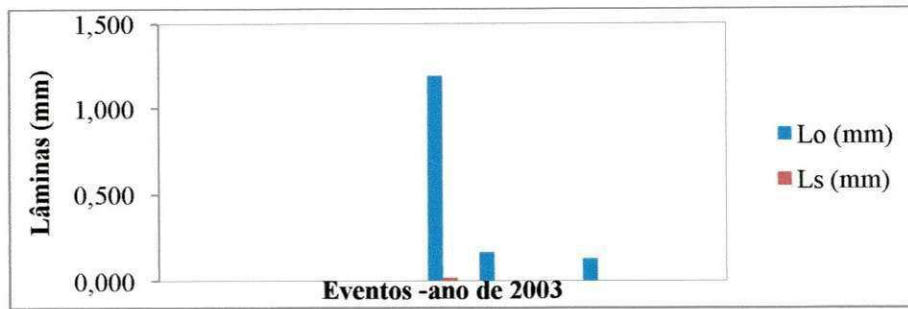


Figura A.53 - Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC

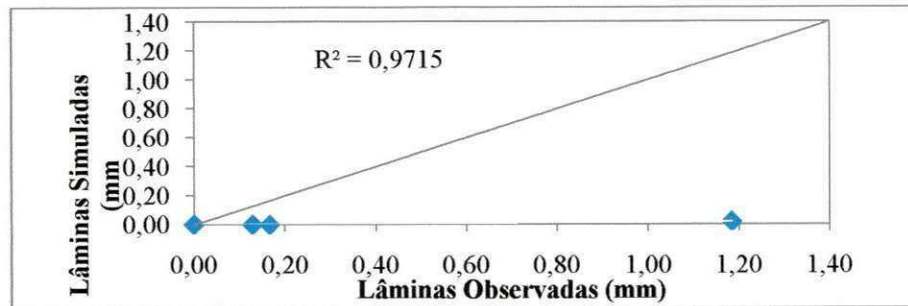


Figura A.54 - Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3(2003) - BESJC

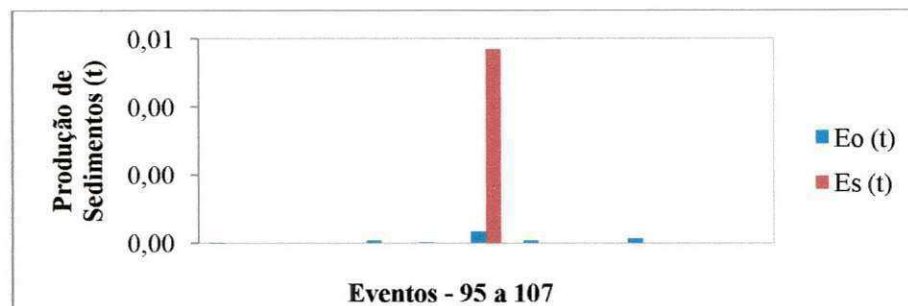


Figura A.55 - Erosão Observada e Simulada - M1(2003) - BESJC

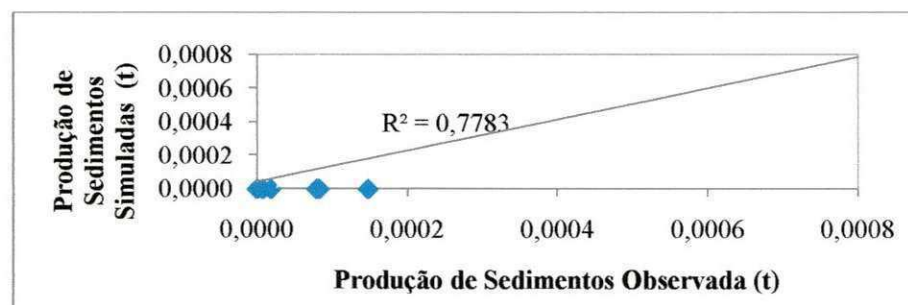


Figura A.56 - Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1(2003) - BESJC

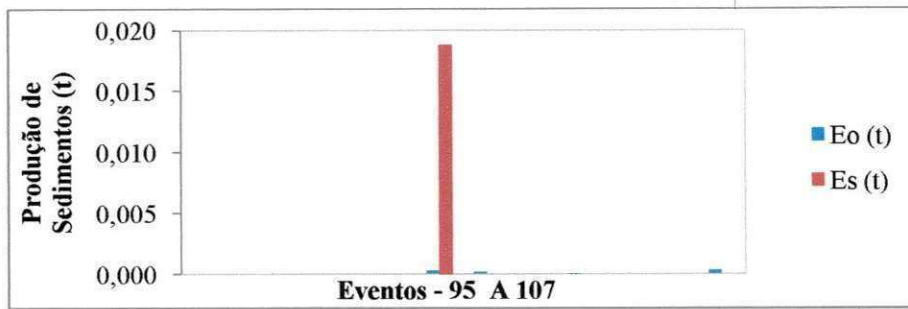


Figura A.57 – Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC

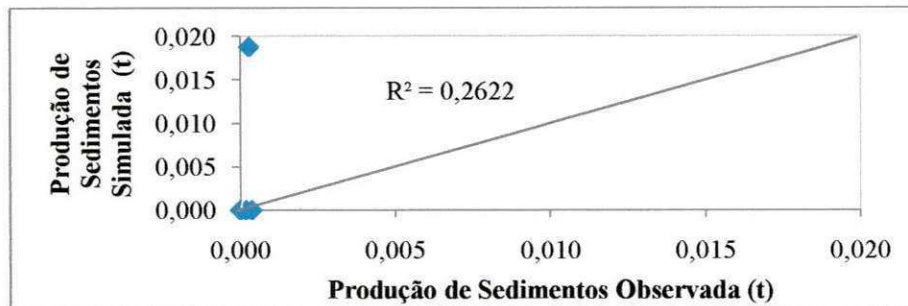


Figura A.58 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2(2003) – BESJC

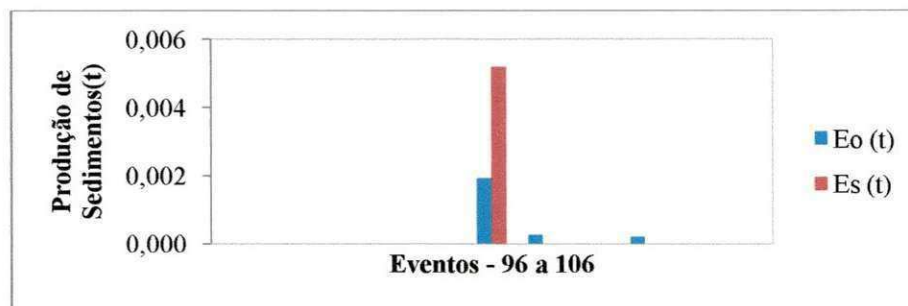


Figura A.59 – Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC

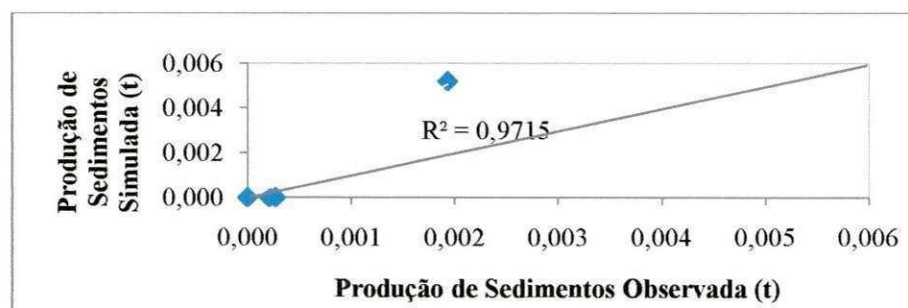


Figura A.60 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3(2003) – BESJC

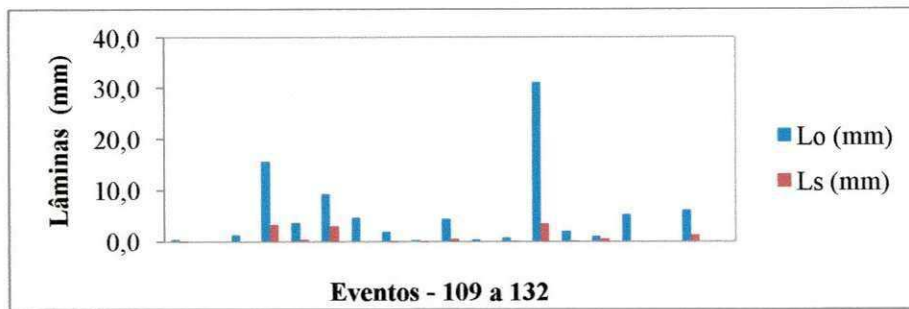


Figura A.61 – Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC

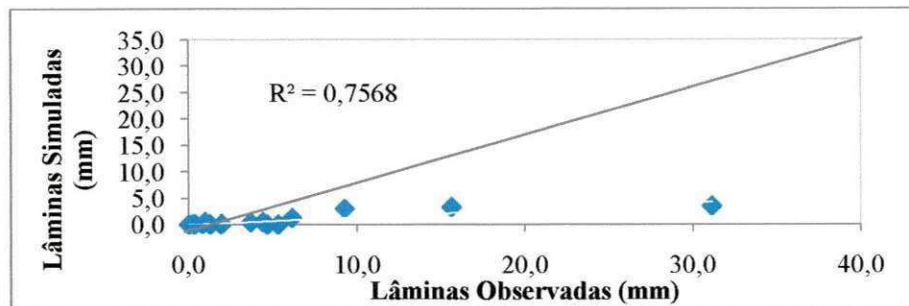


Figura A.62 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M1 (2004) – BESJC

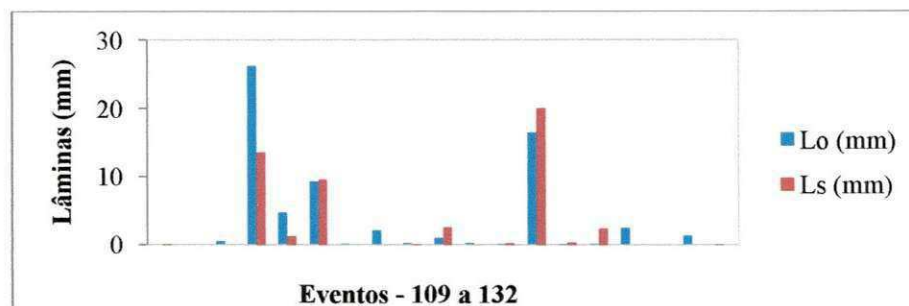


Figura A.63 – Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (2004) – BESJC

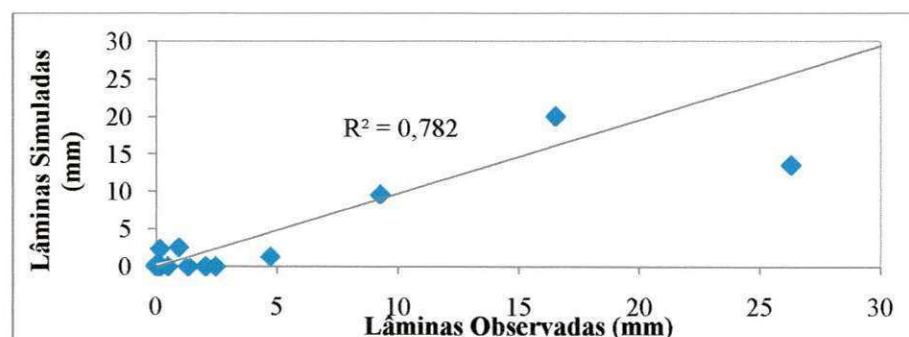


Figura A.64 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M2 (2004) – BESJC

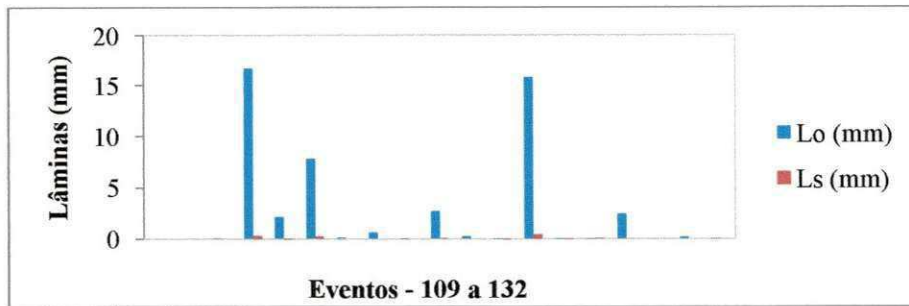


Figura A.65 – Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC

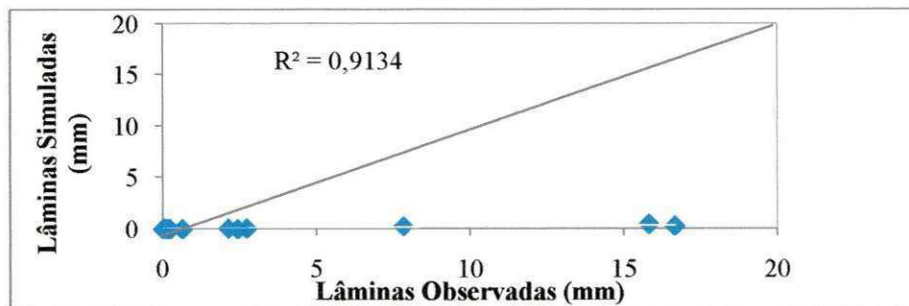


Figura A.66 – Comparação das Lâminas Observadas e Simuladas - M3 (2004) – BESJC

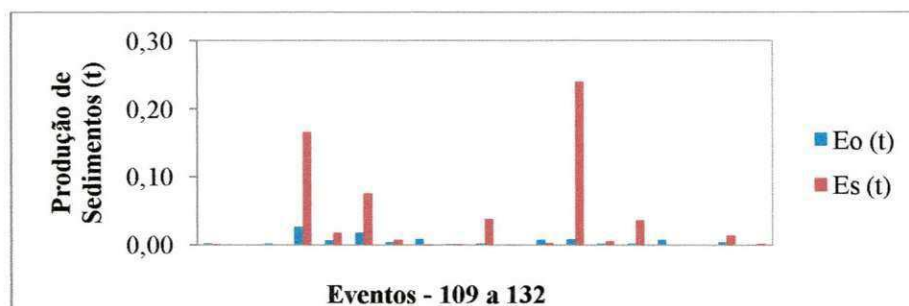


Figura A.67 – Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC

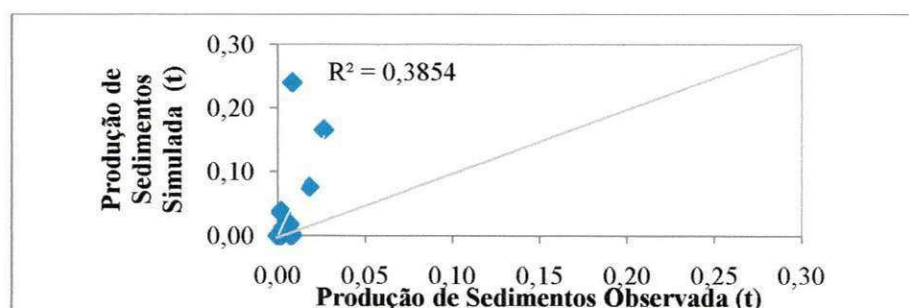


Figura A.68 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M1 (2004) – BESJC

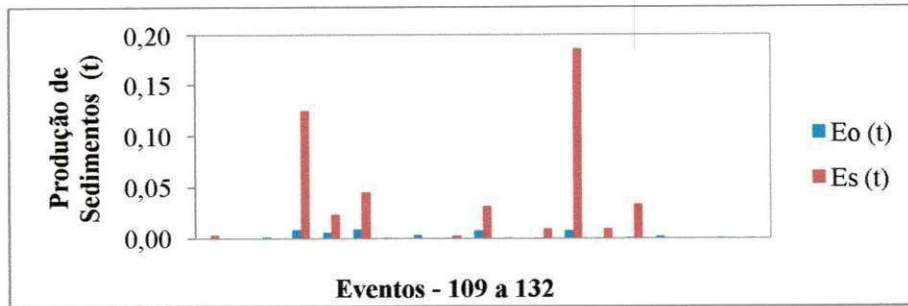


Figura A.69 – Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC

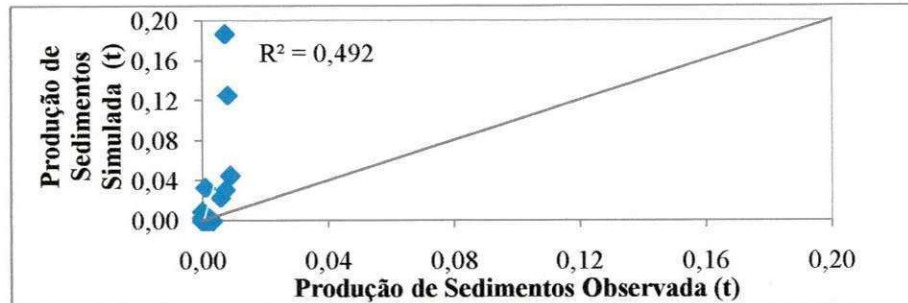


Figura A.70 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M2 (2004) – BESJC

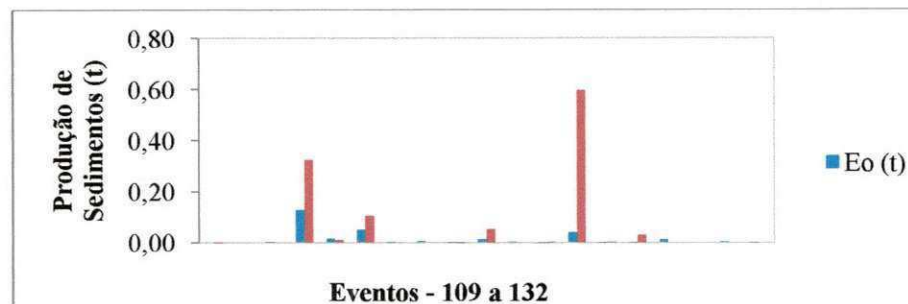


Figura A.71 – Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC

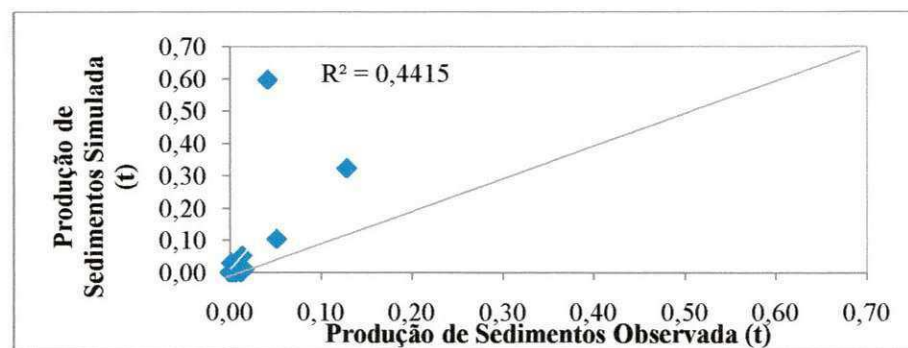


Figura A.72 – Comparação da Erosão Observada e Simulada - M3 (2004) – BESJC

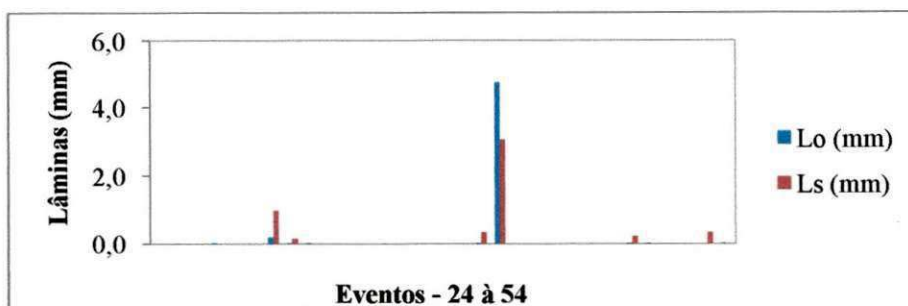


Figura A.73 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 1984 (BES)

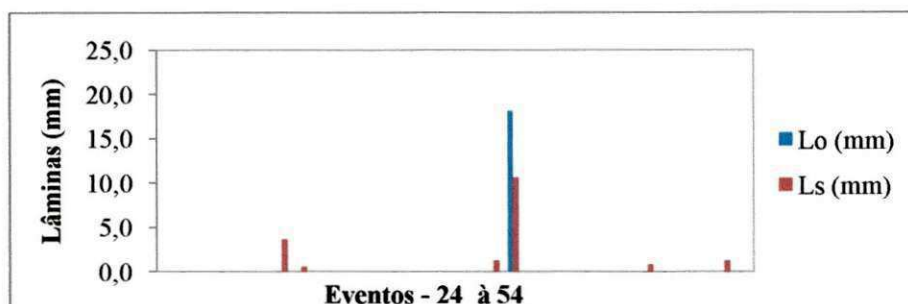


Figura A.74 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 - 1984 (BES)

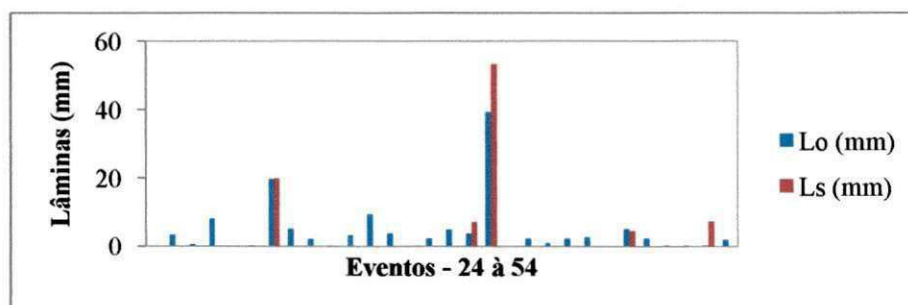


Figura A.75 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 - 1984 (BES)

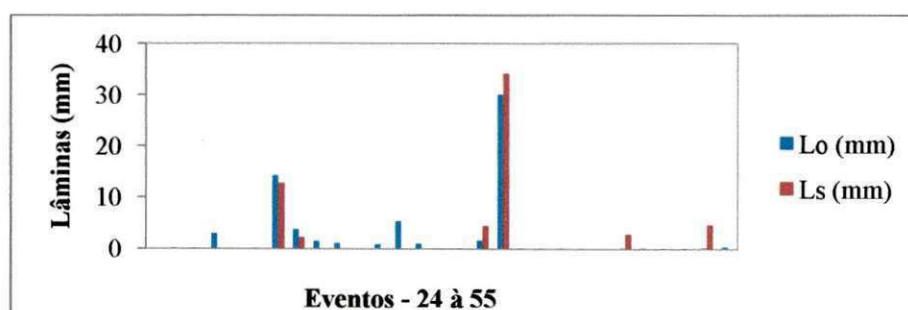


Figura A.76 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M4 - 1984 (BES)

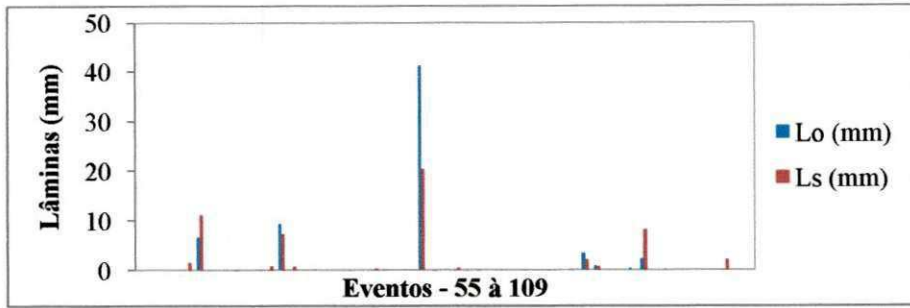


Figura A.77 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 1985 (BES)

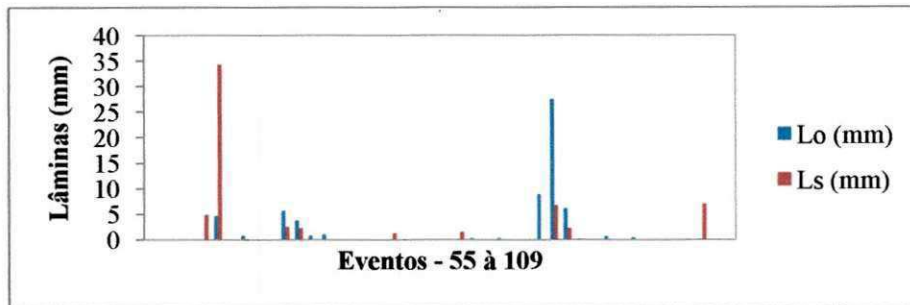


Figura A.78 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 - 1985 (BES)

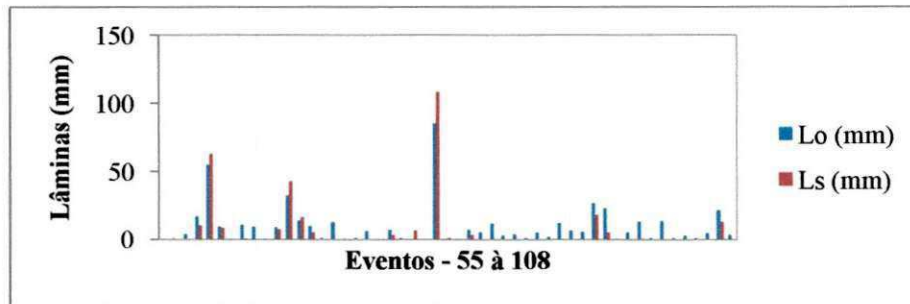


Figura A.79 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 - 1985 (BES)

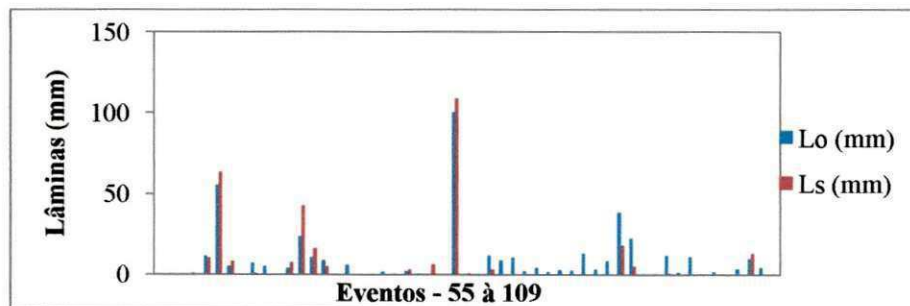


Figura A.80 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M4 - 1985 (BES)

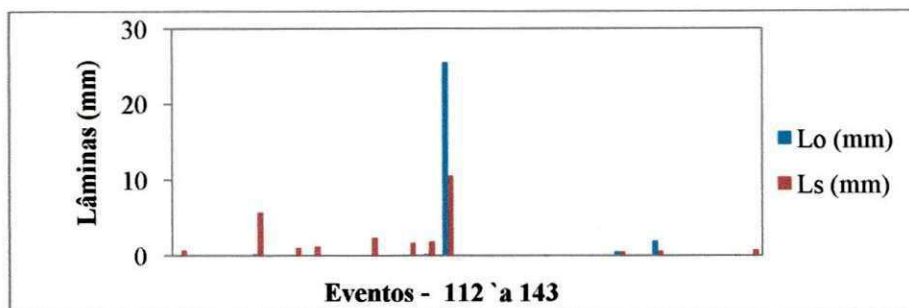


Figura A.81 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 1986 (BES)

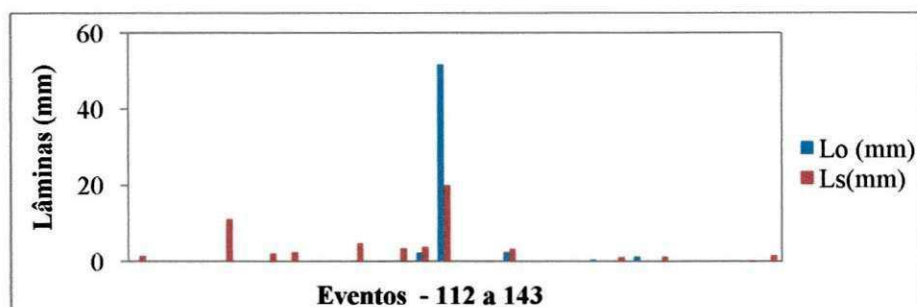


Figura A.82 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 - 1986 (BES)

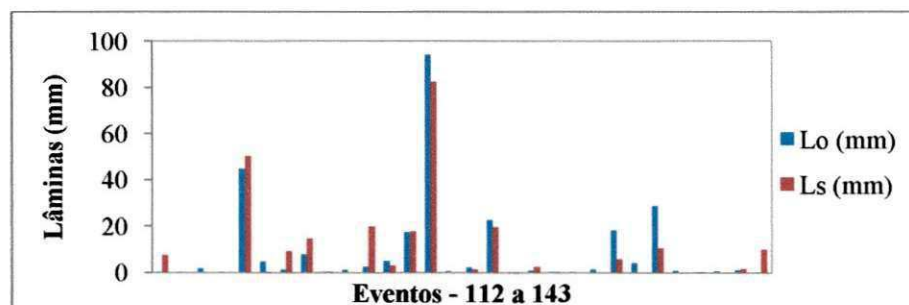


Figura A.83 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 - 1986 (BES)

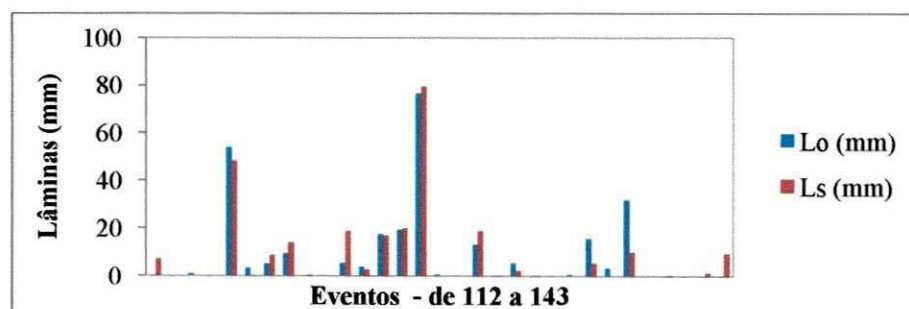


Figura A.84 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M4 - 1986 (BES)

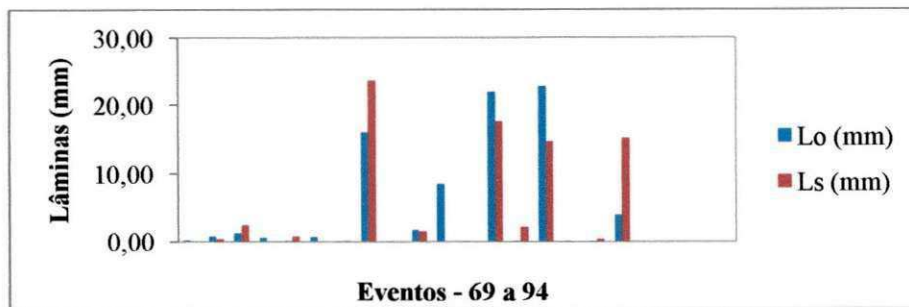


Figura A.85 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 2002 (BESJC)

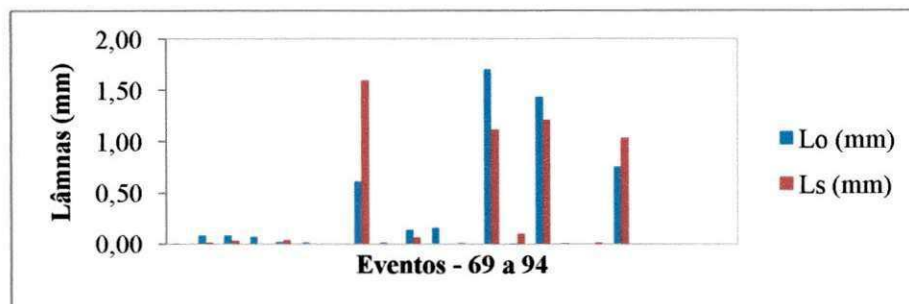


Figura A.86 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 - 2002 (BESJC)

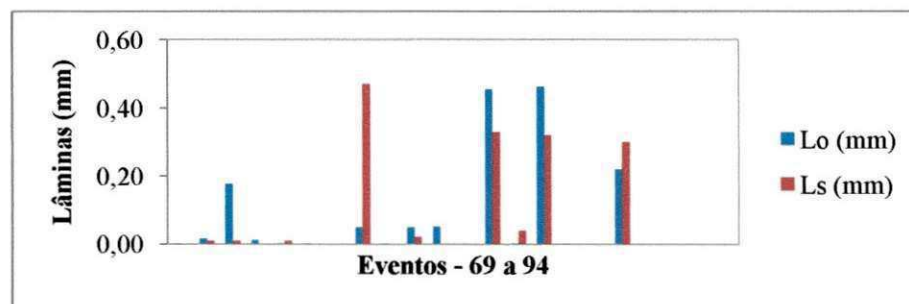


Figura A.87 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 - 2002 (BESJC)

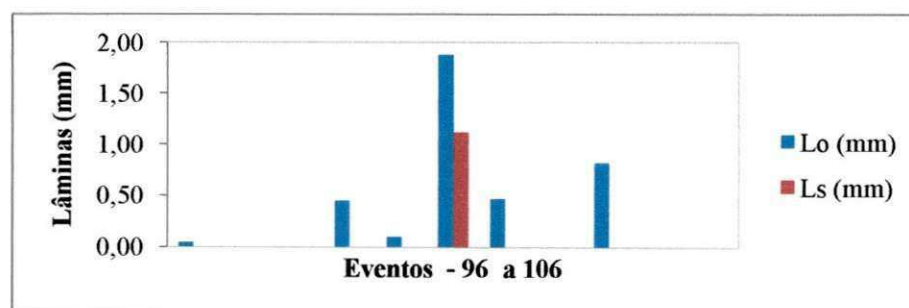


Figura A.88 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M1 - 2003 (BESJC)

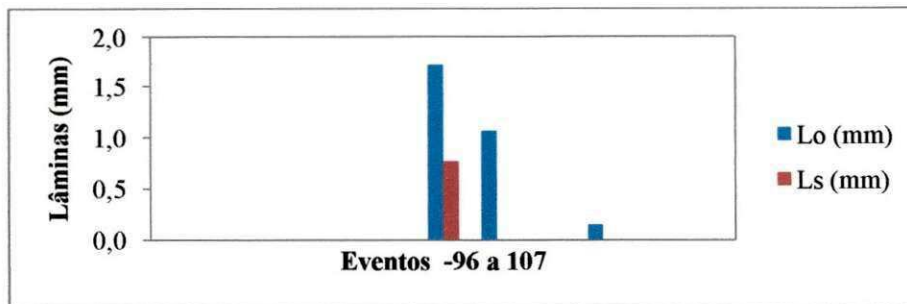
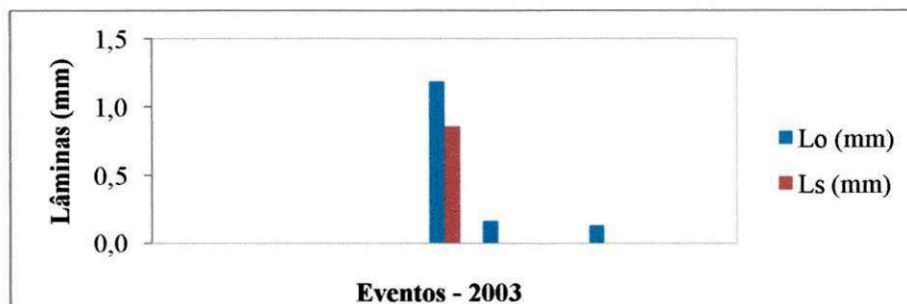


Figura A.89 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M2 – 2003 (BESJC)



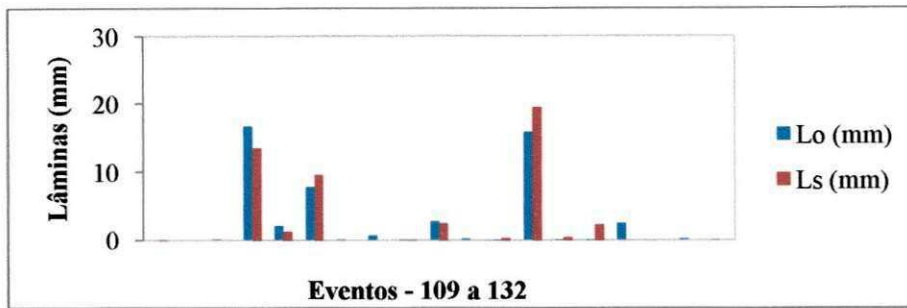


Figura A.93 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - M3 - 2004 (BESJC)

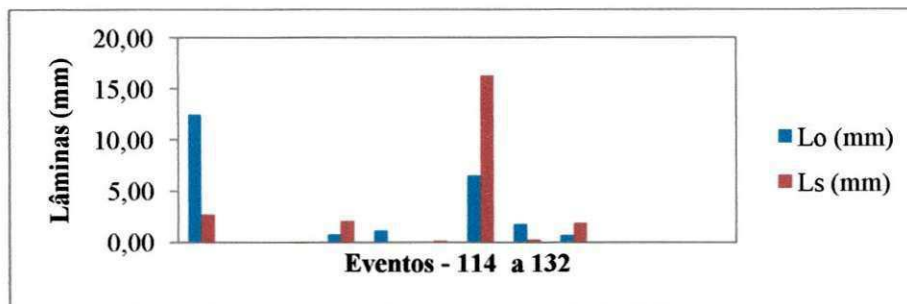


Figura A.94 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 - 2004 (BESJC)

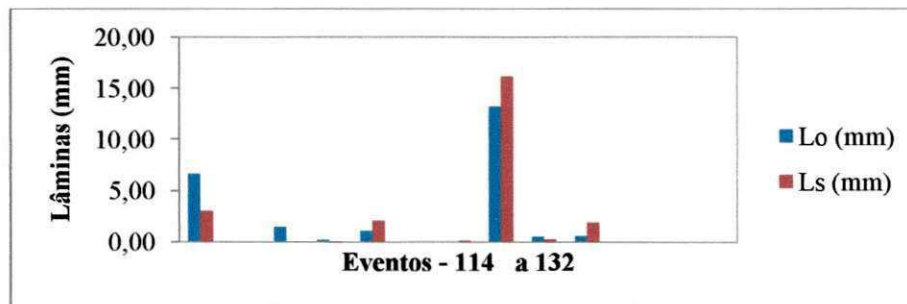


Figura A.95 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB2 - 2004 (BESJC)

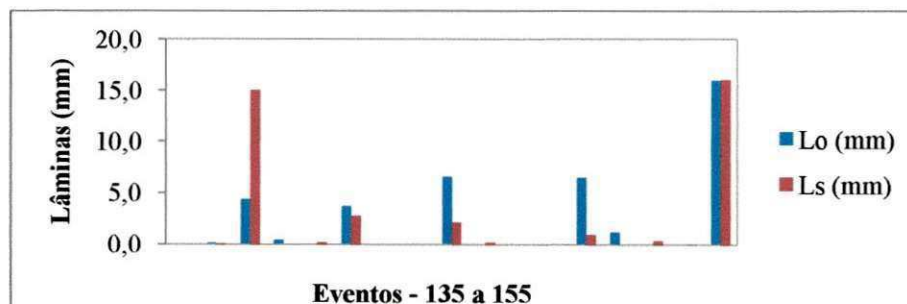


Figura A.96 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 - 2005 (BESJC)

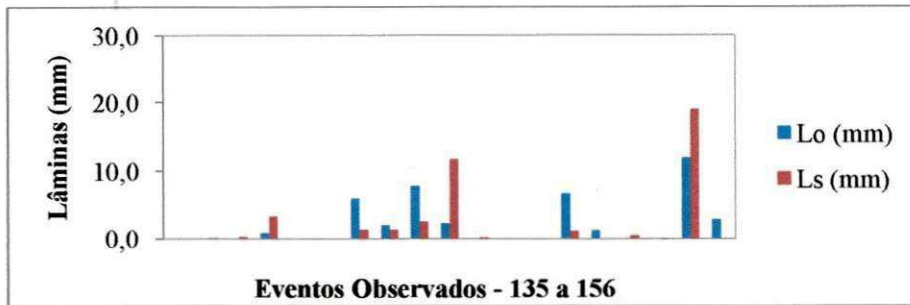


Figura A.97 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB2 - 2005 (BESJC)

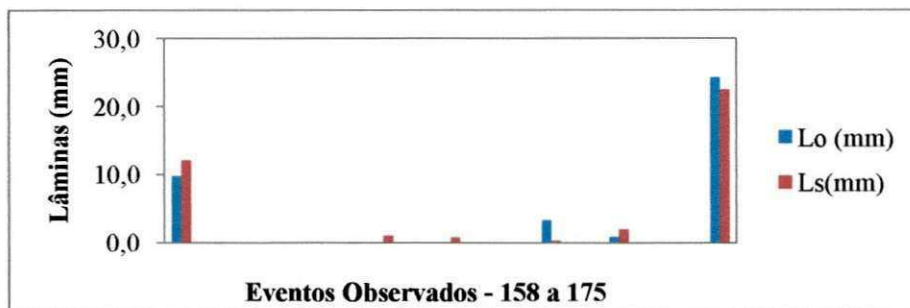


Figura A.98 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB1 - 2006 (BESJC)



Figura A.99 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste da Lâmina Anual - SB2 - 2006 (BESJC)

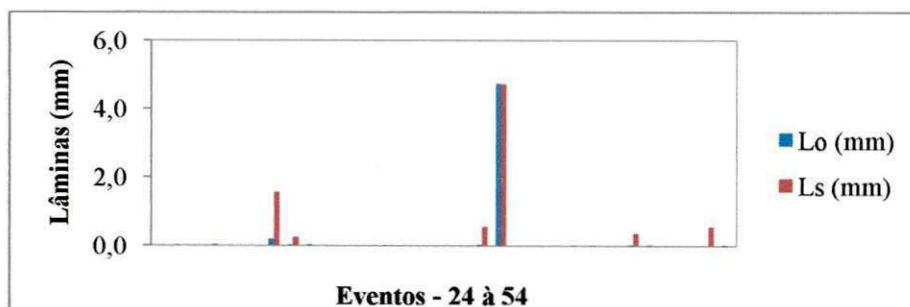


Figura A.100 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 1984 (BES)

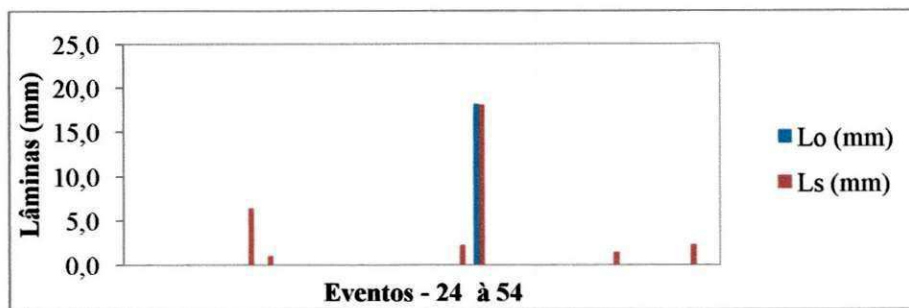


Figura A.101 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 1984 (BES)

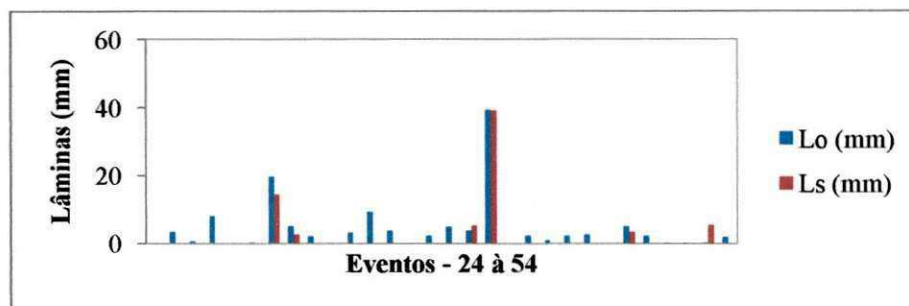


Figura A.102 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 1984 (BES)

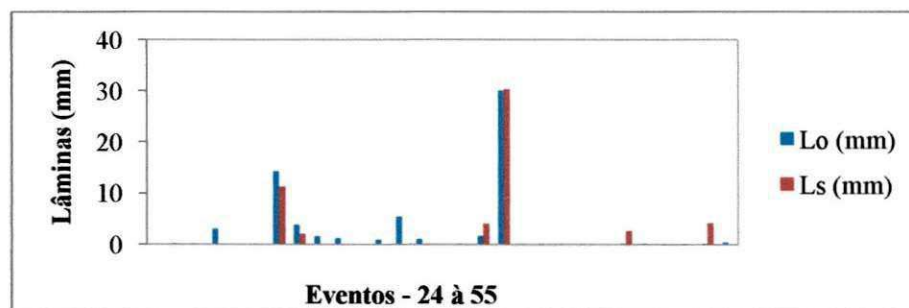


Figura A.103 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M4 - 1984 (BES)

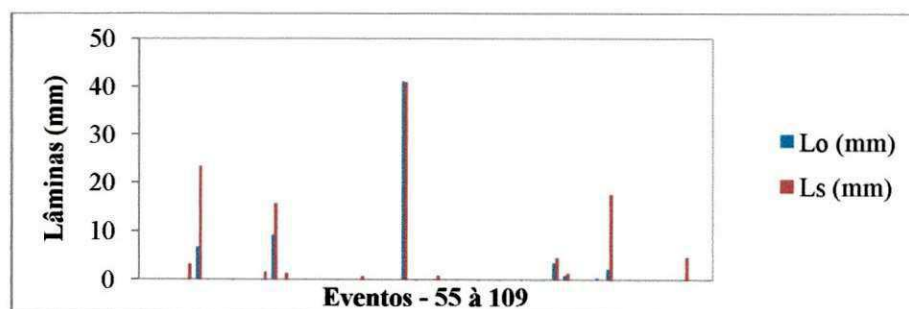


Figura A.104 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 1985 (BES)

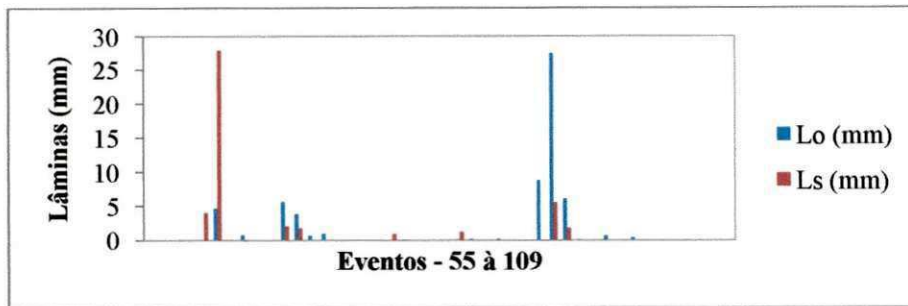


Figura A.105 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 1985 (BES)

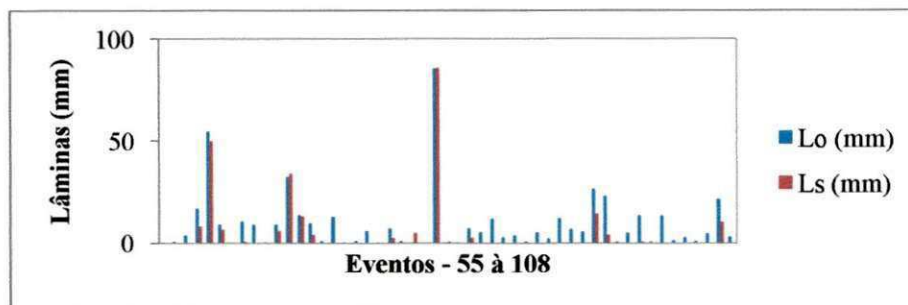


Figura A.106 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 1985 (BES)

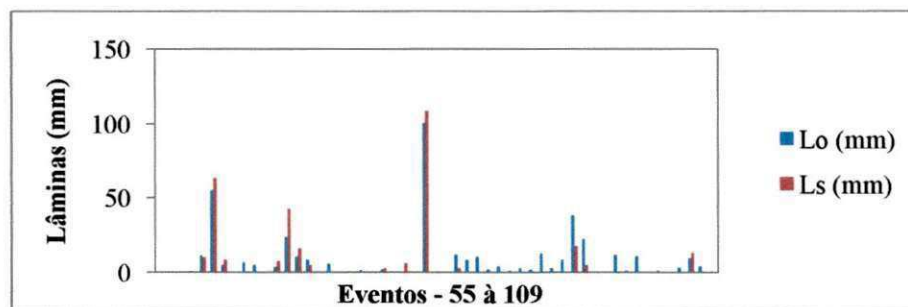


Figura A.107 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M4 - 1985 (BES)

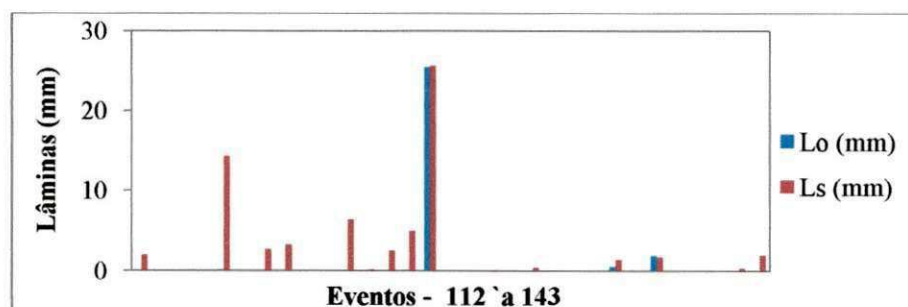


Figura A.108 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 1986 (BES)

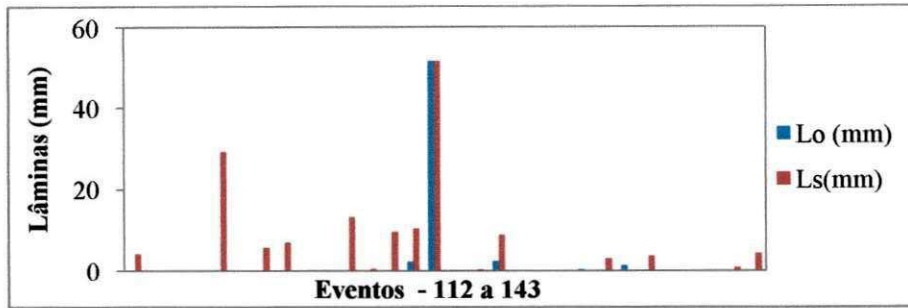


Figura A.109 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 1986 (BES)

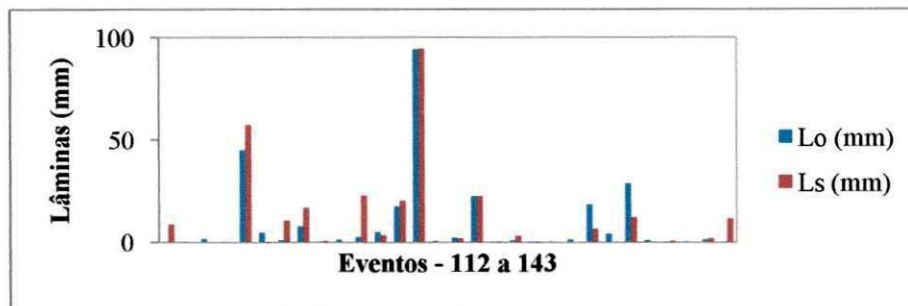


Figura A.110 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 1986 (BES)

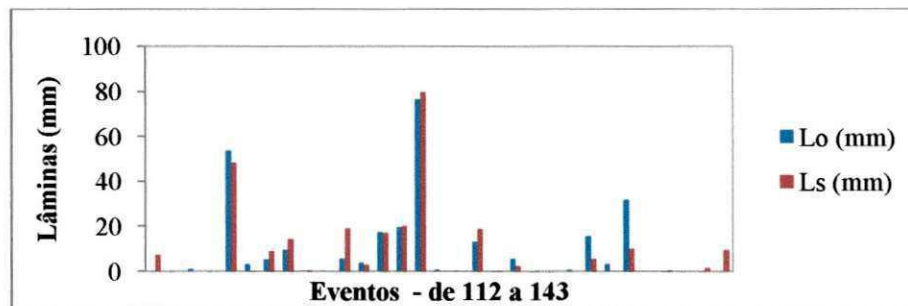


Figura A.111 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M4 - 1986 (BES)

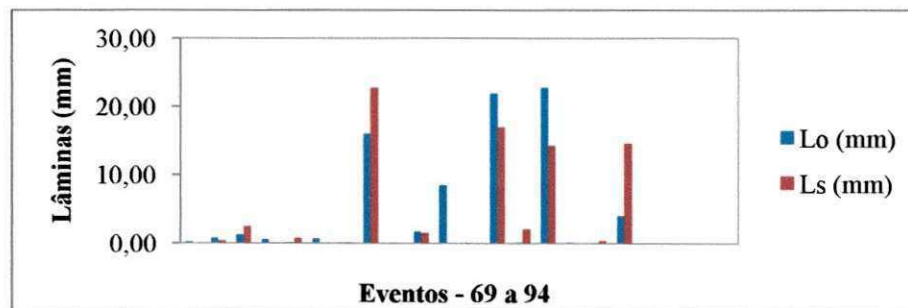


Figura A.112 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 2002 (BESJC)

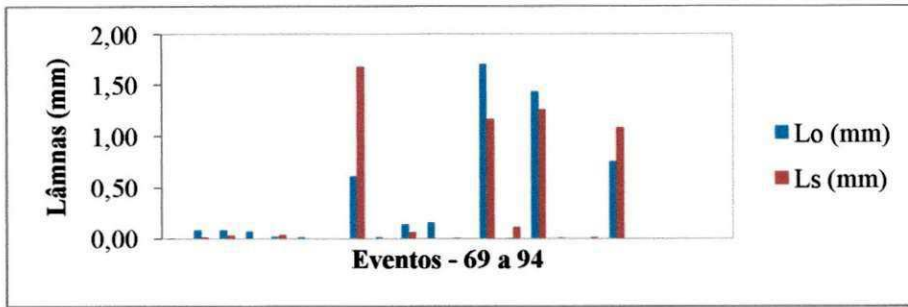


Figura A.113 Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 2002 (BESJC)

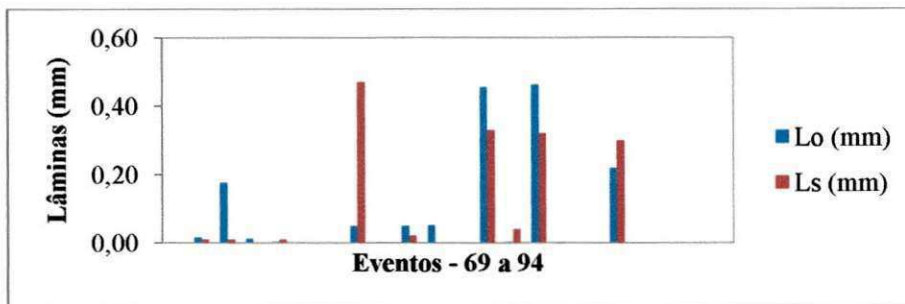


Figura A.114 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 2002 (BESJC)

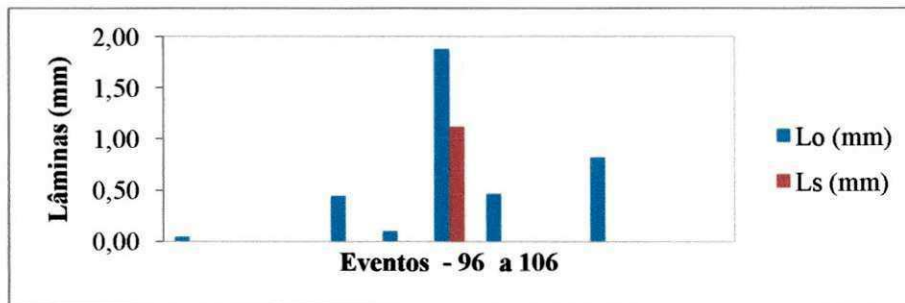


Figura A.115 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 2003 (BESJC)

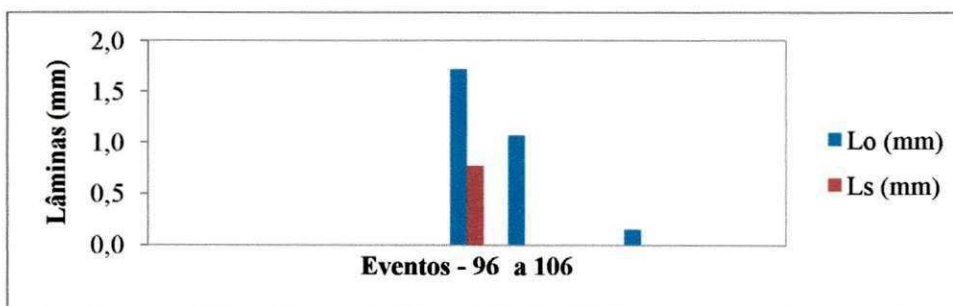


Figura A.116 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 2003 (BESJC)

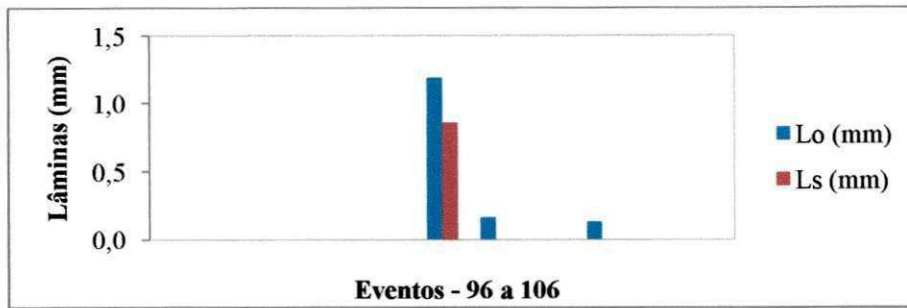


Figura A.117 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 2003 (BESJC)

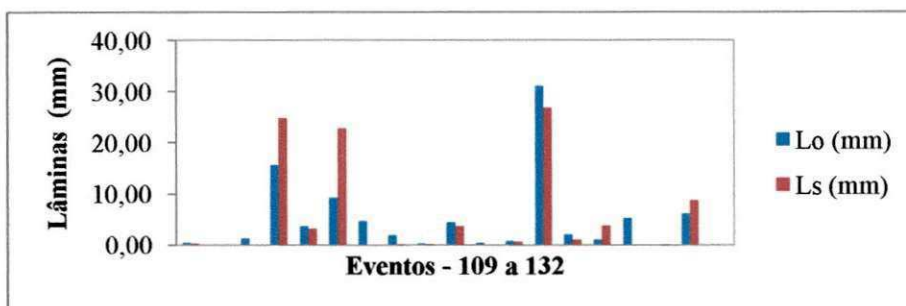


Figura A.118 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M1 - 2004 (BESJC)

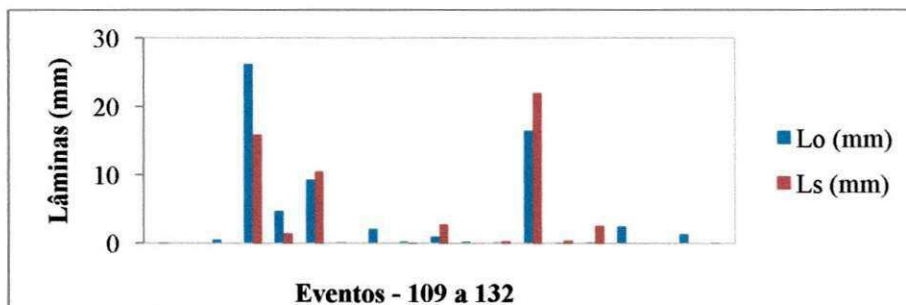


Figura A.119 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M2 - 2004 (BESJC)

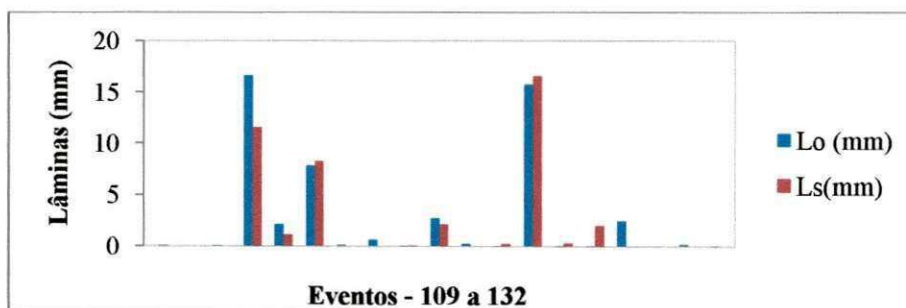


Figura A.120 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - M3 - 2004 (BESJC)

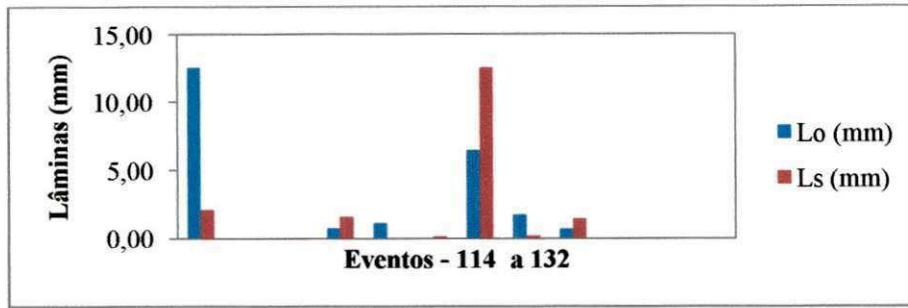


Figura A.121 - Calibração Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB1 - 2004 (BESJC)

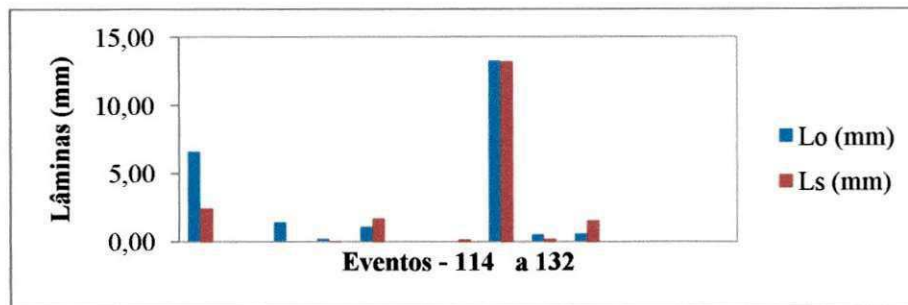


Figura A.122 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB2 - 2004 (BESJC)

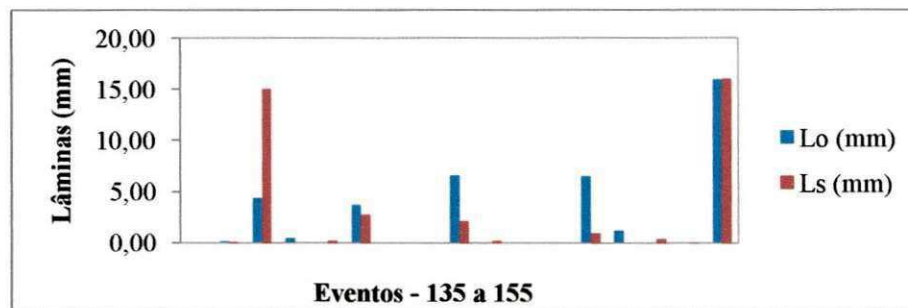


Figura A.123 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB1 - 2005 (BESJC)

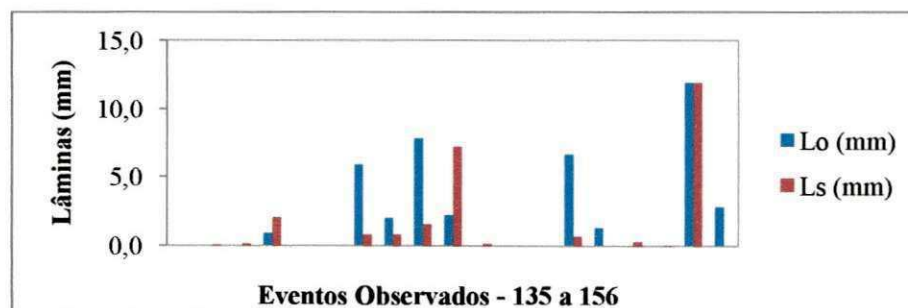


Figura A.124 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB2 - 2005 (BESJC)

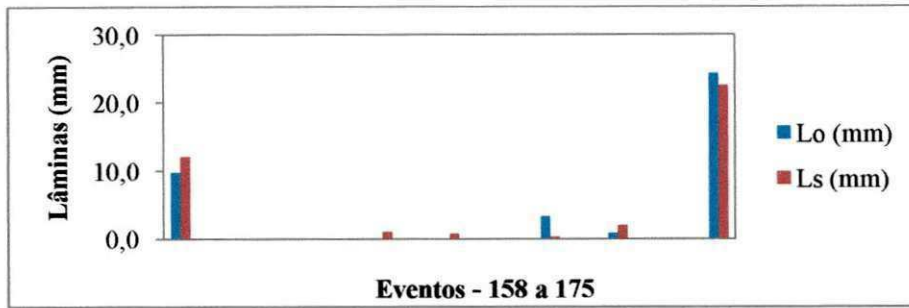


Figura A.125 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB1 - 2006 (BESJC)

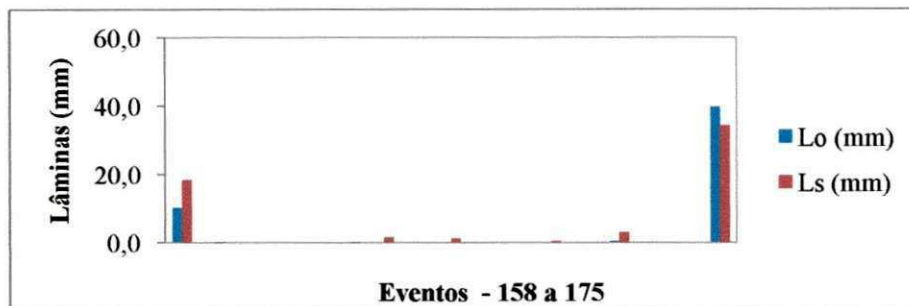


Figura A.126 - Lâminas observadas e simuladas com C calibrado para ajuste do Pico - SB2 - 2006 (BESJC)

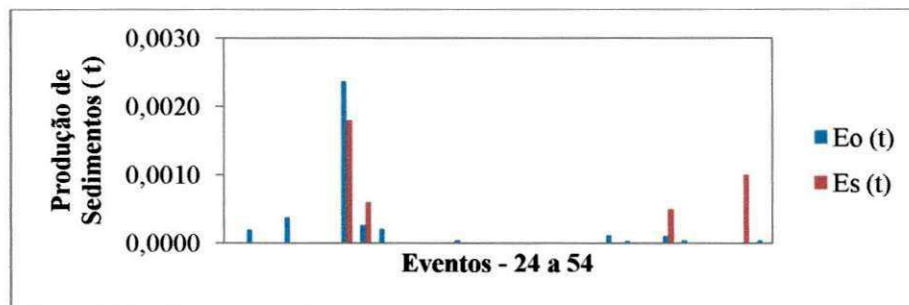


Figura A.127 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 -1984 (BES)

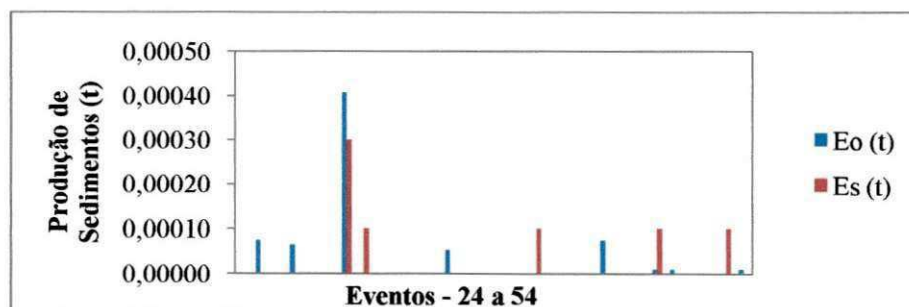


Figura A.128 - - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 -1984 (BES)

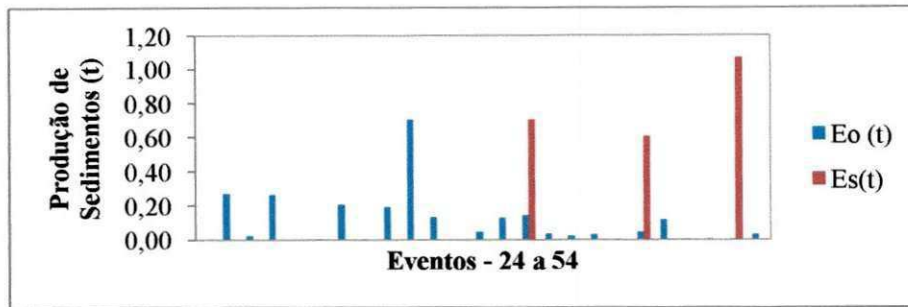


Figura A.129 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1984 (BES)

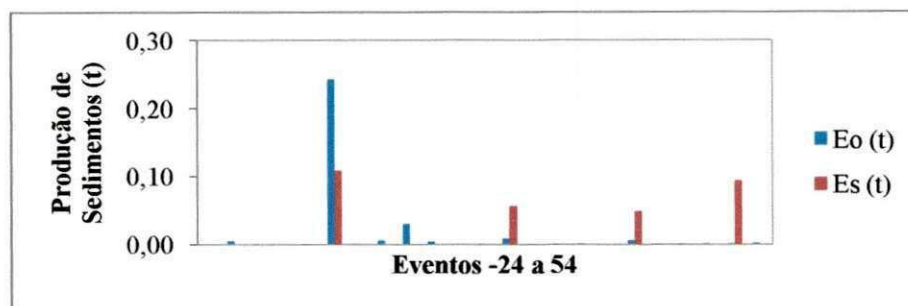


Figura A.130 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1984 (BES)

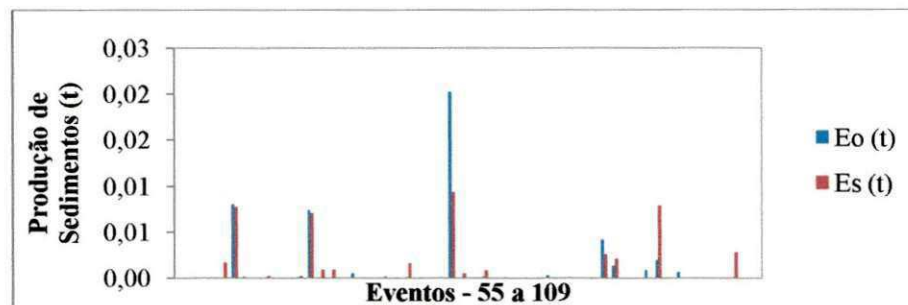


Figura A.131 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1985 (BES)

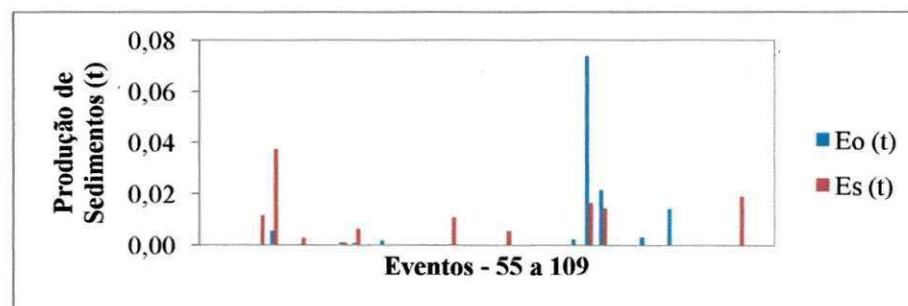


Figura A.132 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1985 (BES)

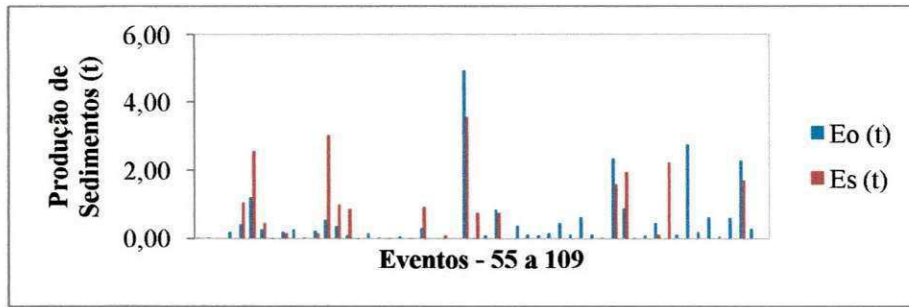


Figura A.133 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 1985 (BES)

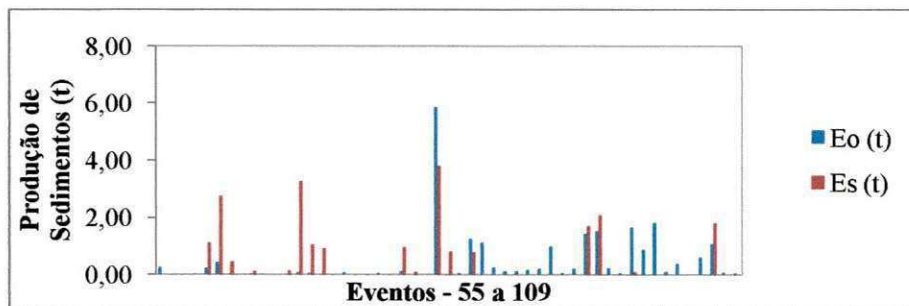


Figura A.134 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1985 (BES)

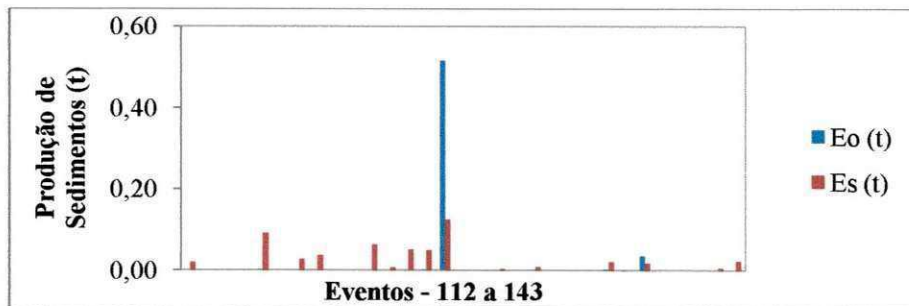


Figura A.135 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 1986 (BES)

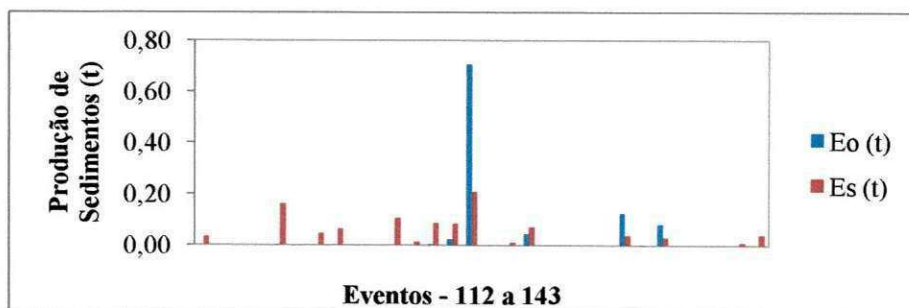


Figura A.136 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 1986 (BES)

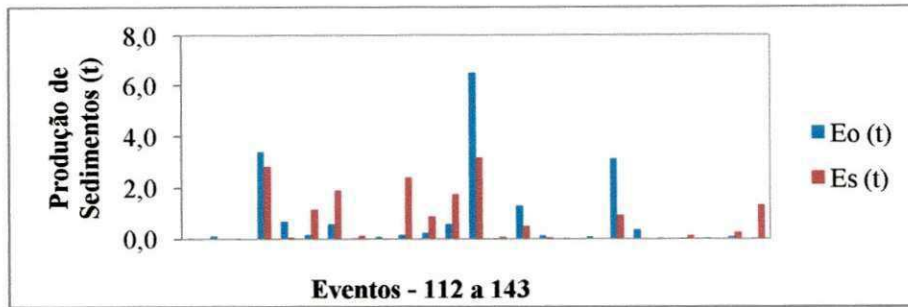


Figura A.137 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 -1986 (BES)

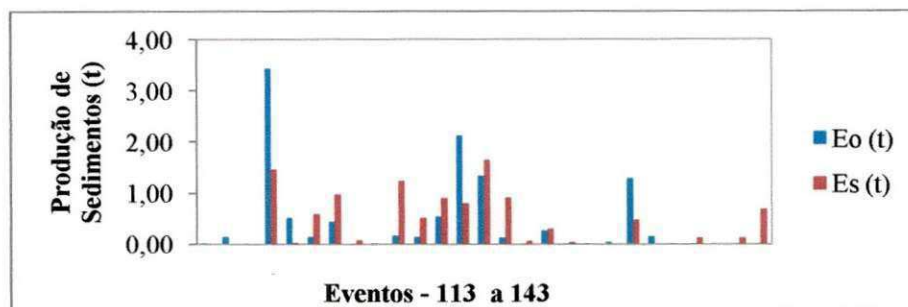


Figura A.138 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M4 - 1986 (BES)

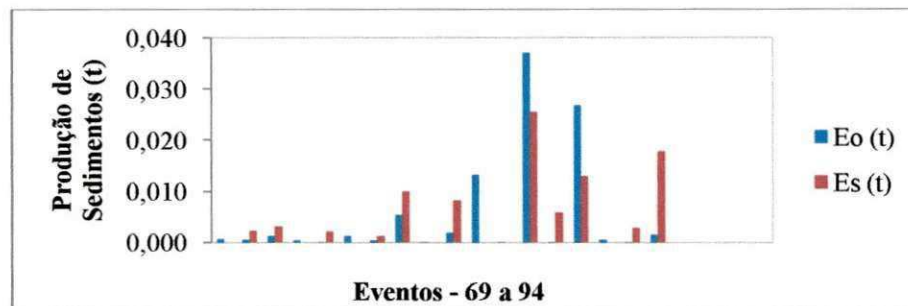


Figura A.139 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1-2002 (BESJC)

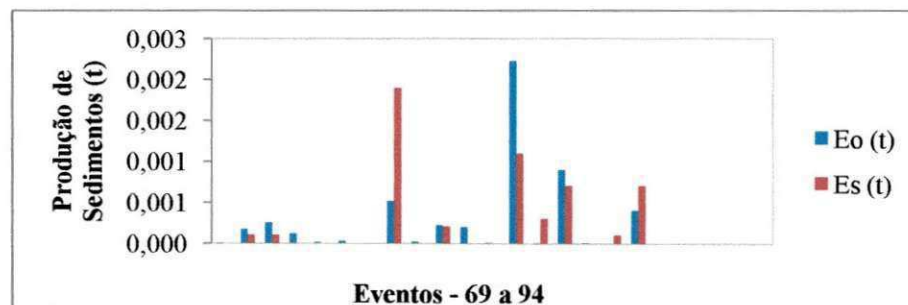


Figura A.140 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2002 (BESJC)

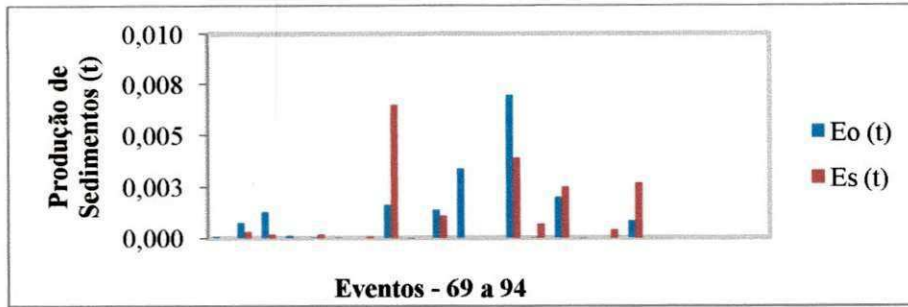


Figura A.141 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2002 (BESJC)

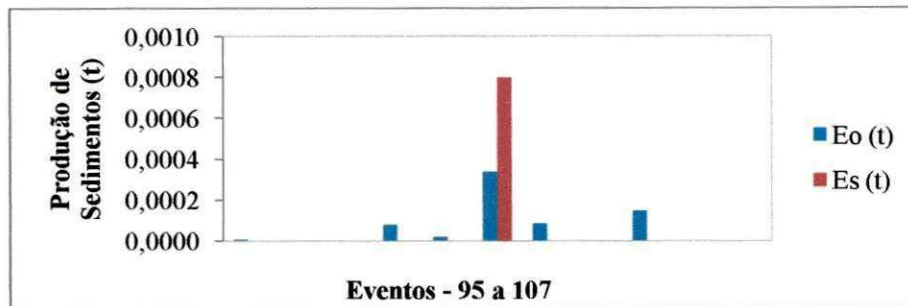


Figura A.142 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2003 (BESJC)

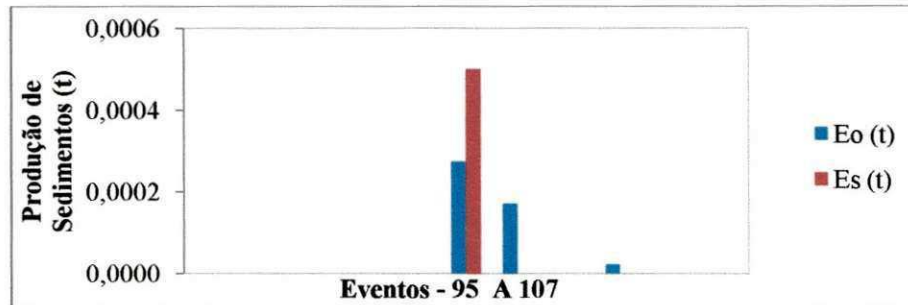


Figura A.143 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2003 (BESJC)

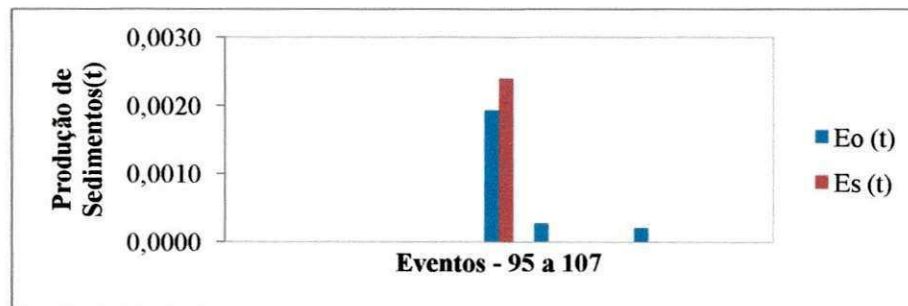


Figura A.144 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2003 (BESJC)

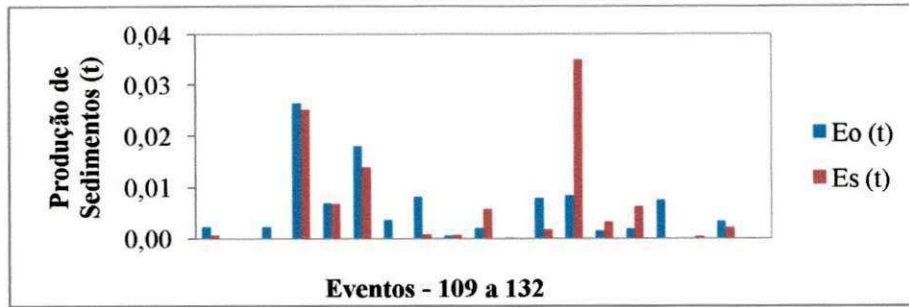


Figura A.145 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M1 - 2004 (BESJC)

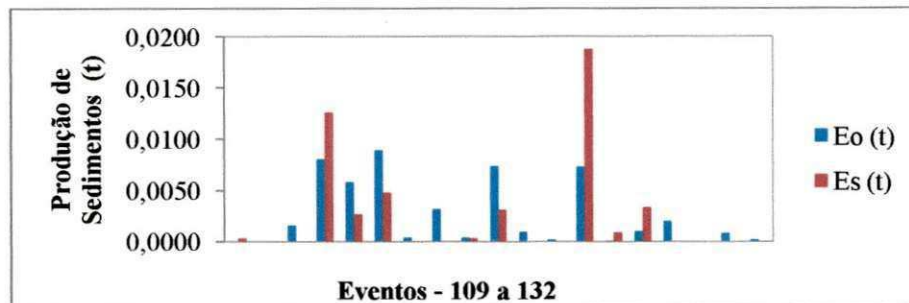


Figura A.146 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M2 - 2004 (BESJC)

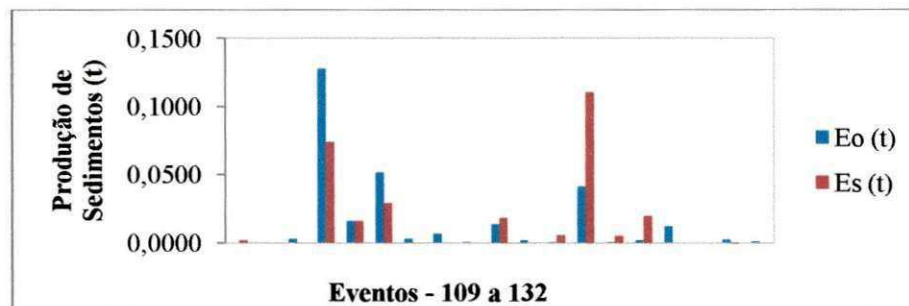


Figura A.147 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da produção anual de sedimentos - M3 - 2004 (BESJC)

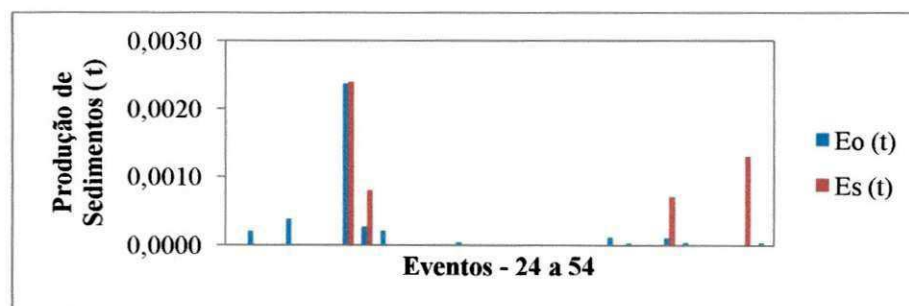


Figura A.148 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1- 1984 (BES)

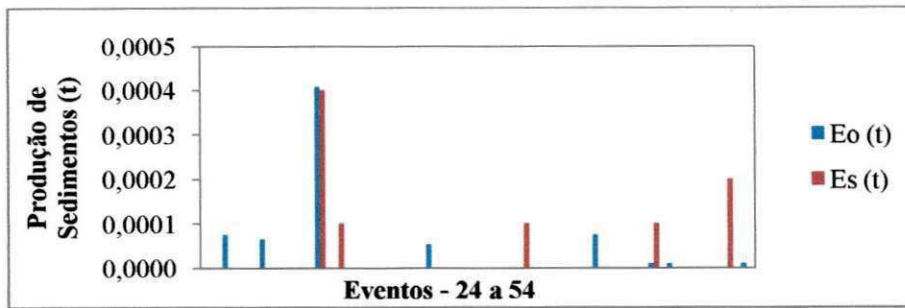


Figura A.149 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2- 1984 (BES)

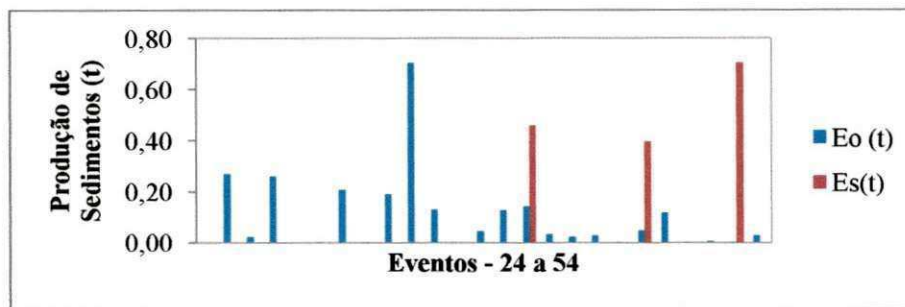


Figura A.150 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1984 (BES)

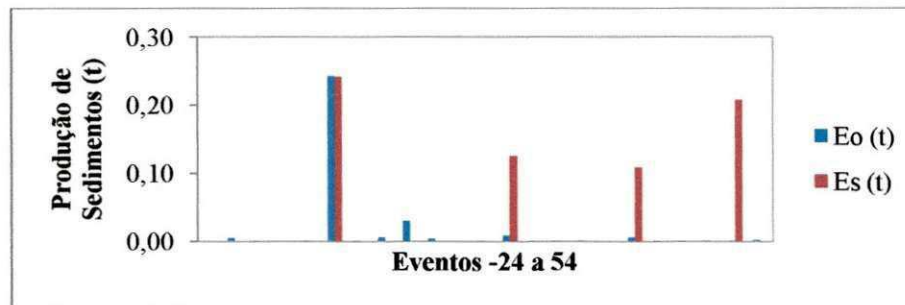


Figura A.151 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1984 (BES)

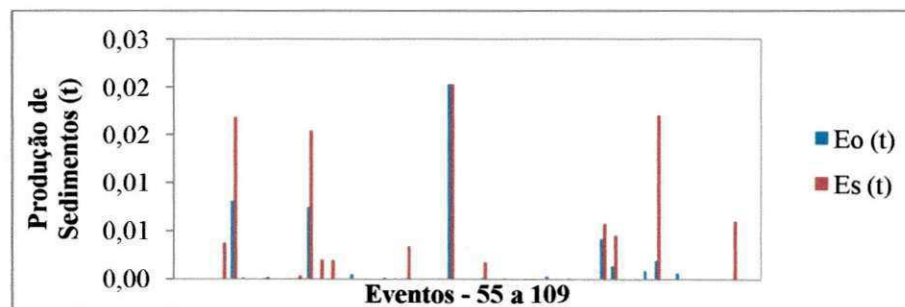


Figura A.152 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1985 (BES)

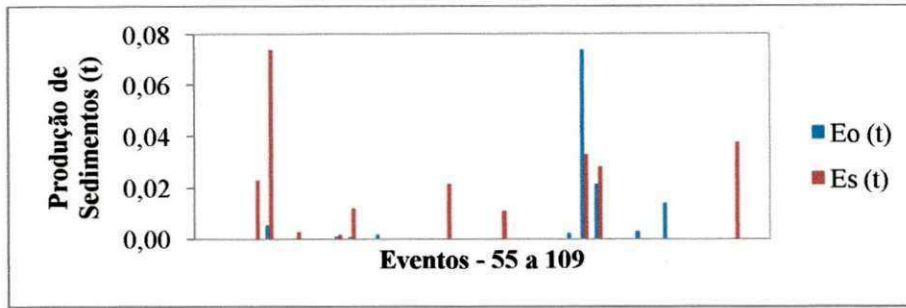


Figura A.153 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1985 (BES)

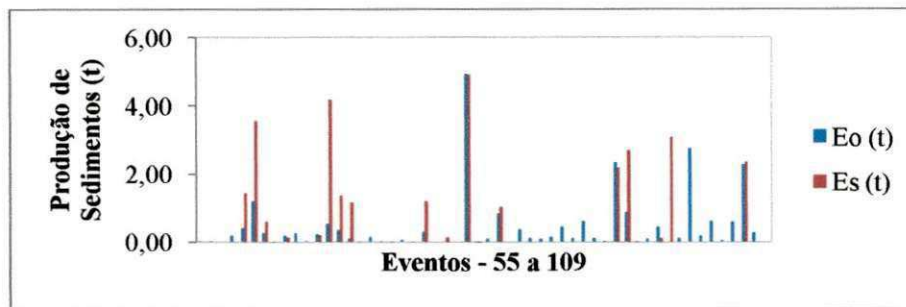


Figura A.154 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1985 (BES)

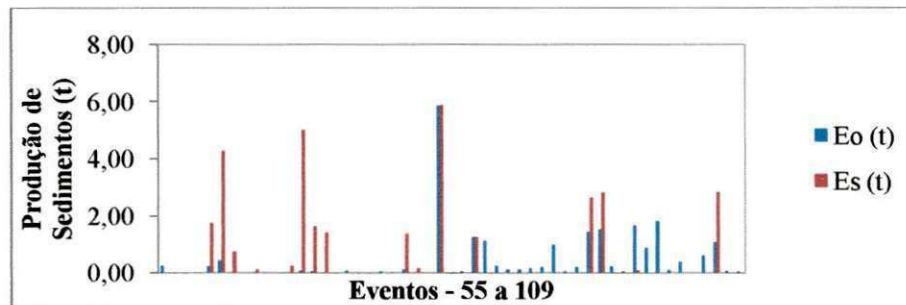


Figura A.155 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1985 (BES)

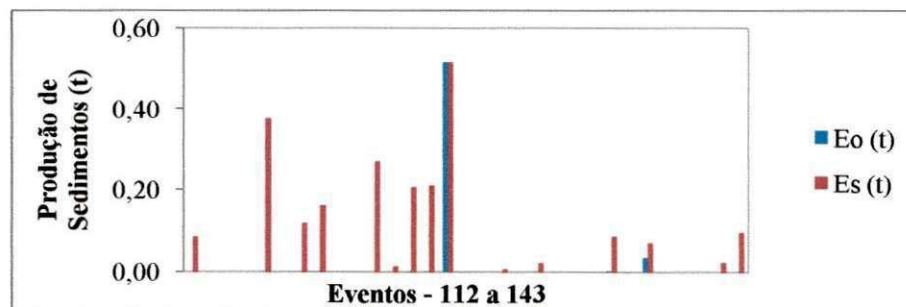


Figura A.156 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 1986 (BES)

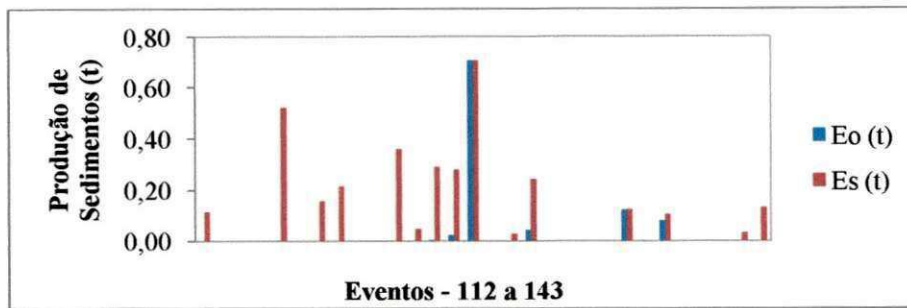


Figura A.157 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 1986 (BES)

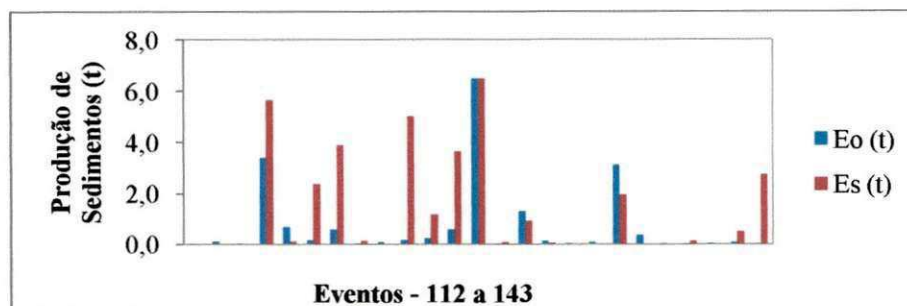


Figura A.158 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 1986 (BES)

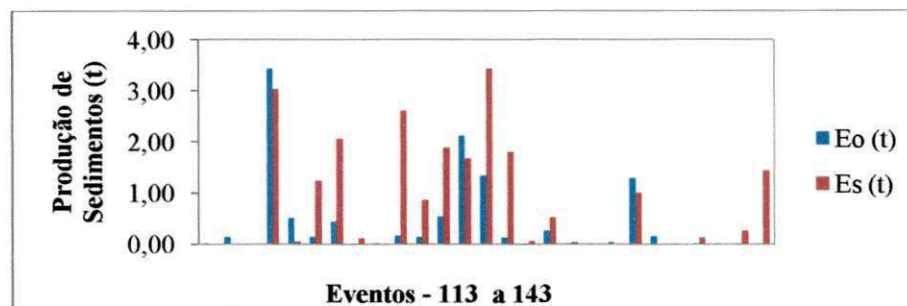


Figura A.159 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M4 - 1986 (BES)

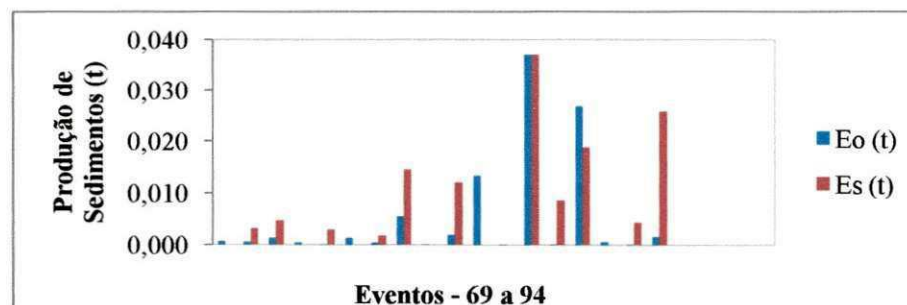


Figura A.160 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2002 (BESJC)

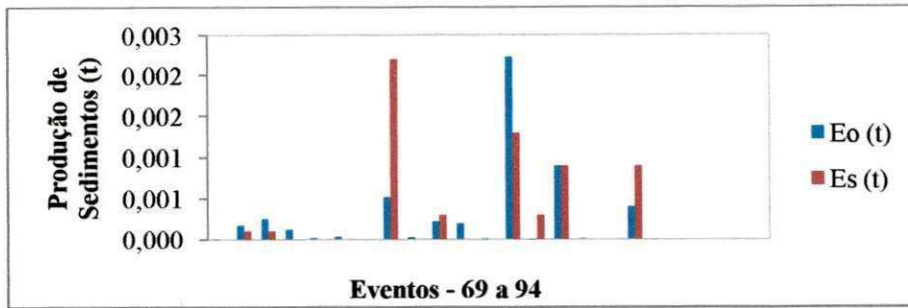


Figura A.161 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2002 (BESJC)

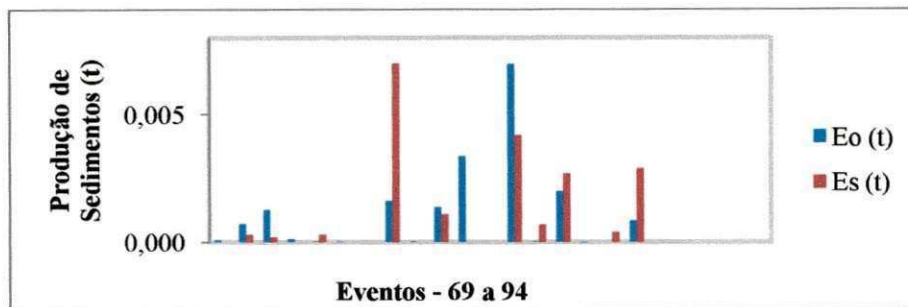


Figura A.162 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2002 (BESJC)

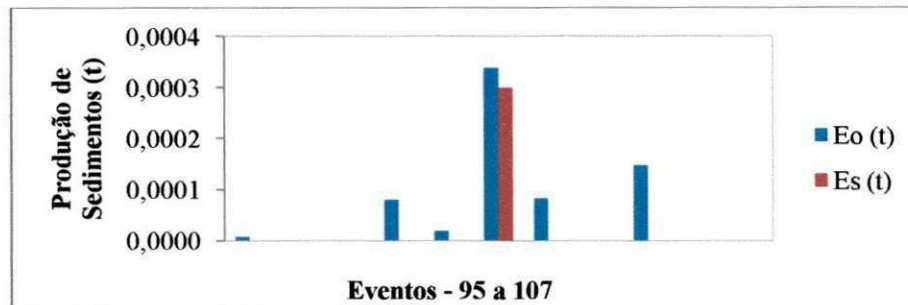


Figura A.163 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2003 (BESJC)

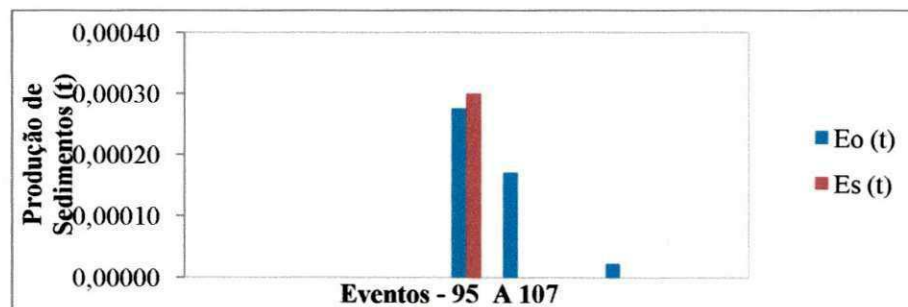


Figura A.164 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2003 (BESJC)

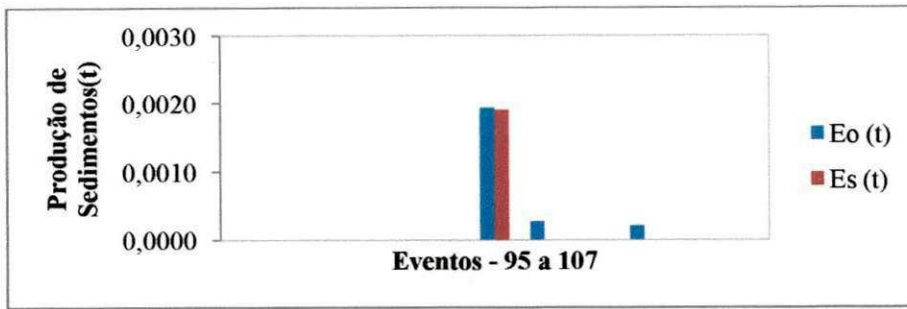


Figura A.165 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2003 (BESJC)

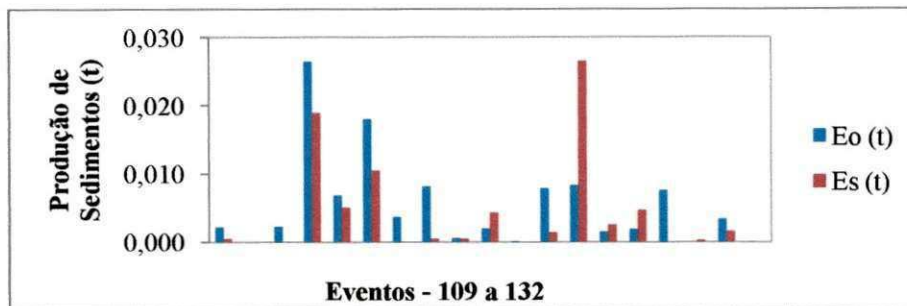


Figura A.166 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M1 - 2004 (BESJC)

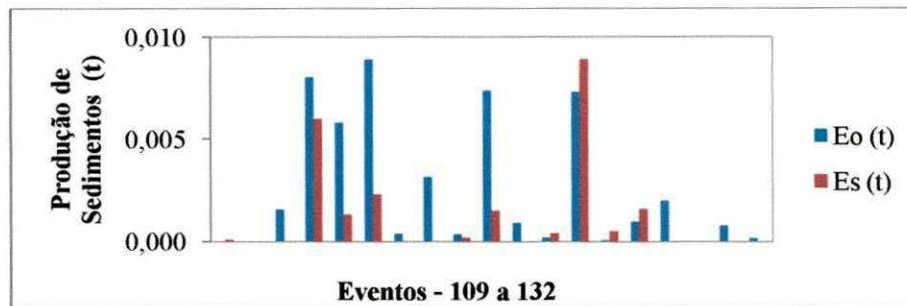


Figura A.167 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M2 - 2004 (BESJC)

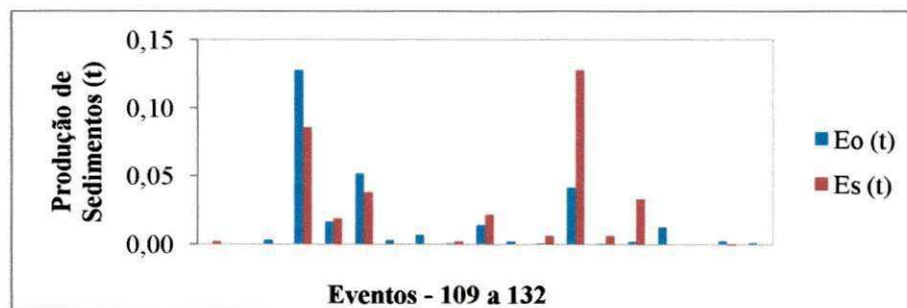


Figura A.168 - Erosões observadas e simuladas com K_r calibrado para ajuste da erosão máxima - M3 - 2004 (BESJC)

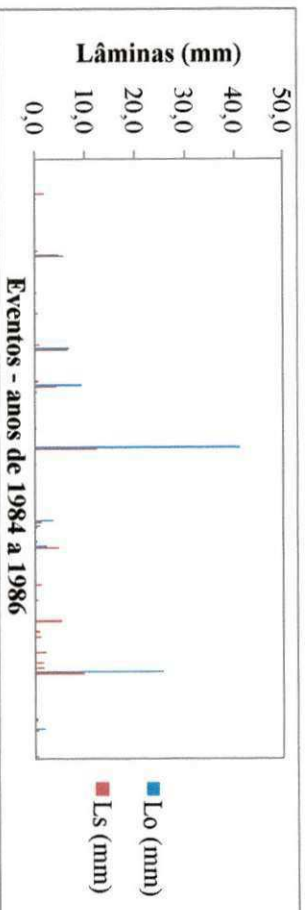


Figura A.169 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M1 (BES)

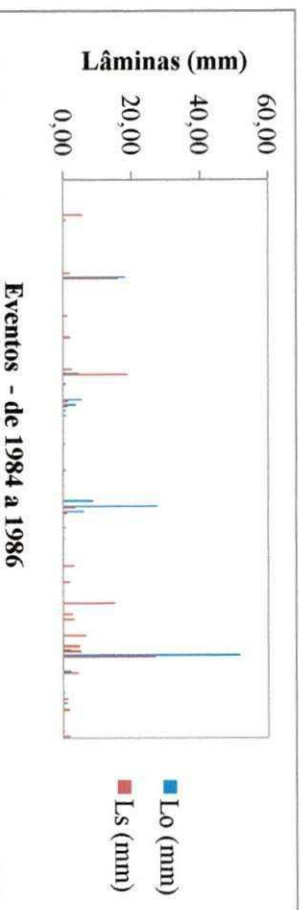


Figura A.170 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BES)

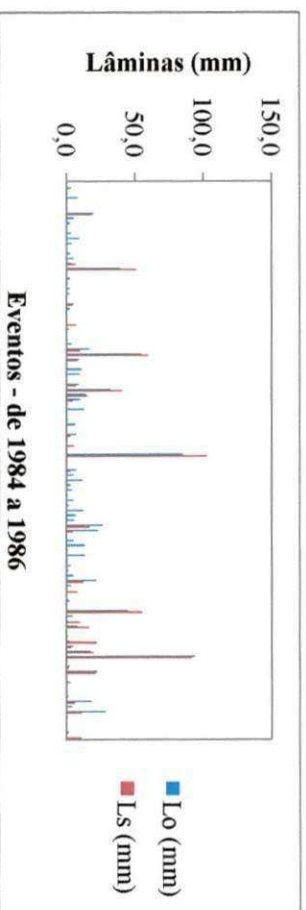


Figura A.171 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BES)

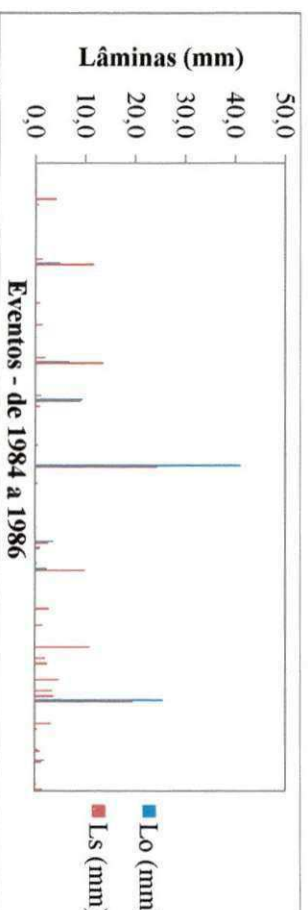


Figura A.172 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M1 (BES)

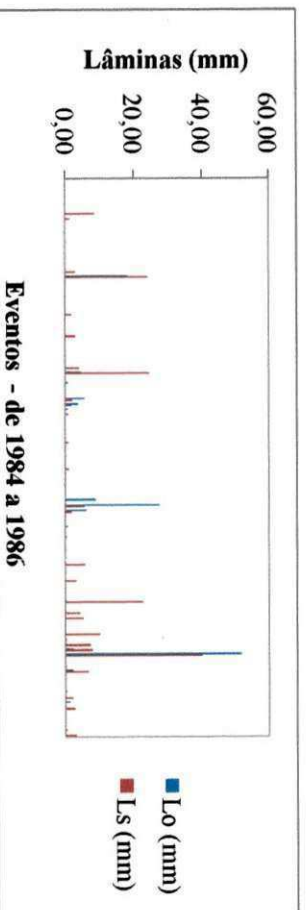


Figura A.173 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M2 (BES)

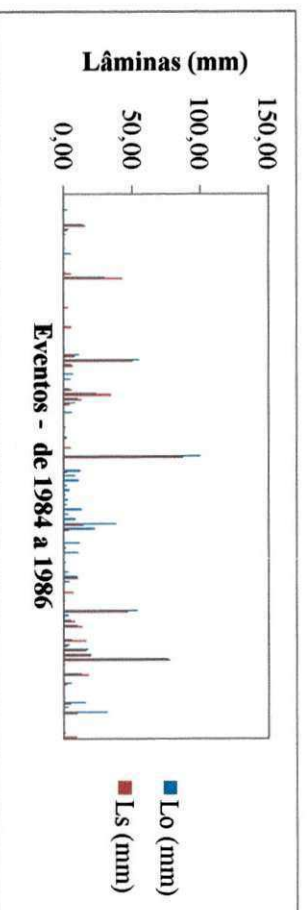


Figura A.174 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração do pico – M4 (BES)

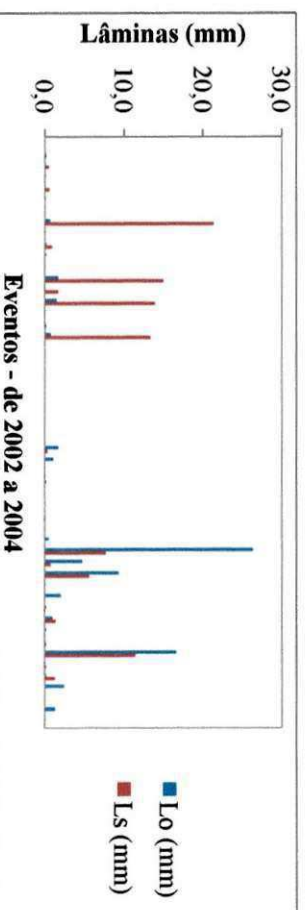


Figura A.175 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M2 (BESIC)

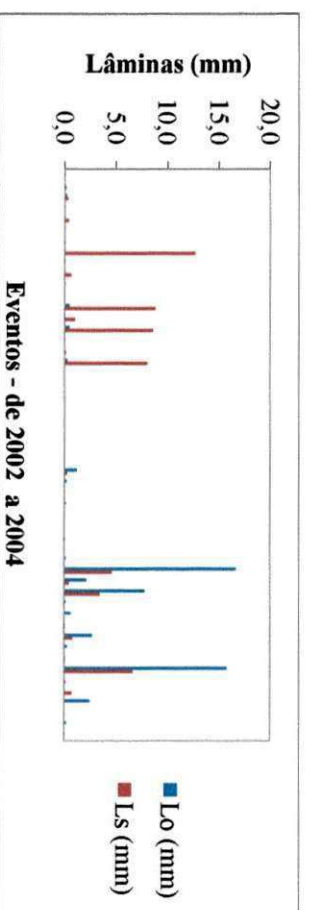


Figura A.176 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{médio}$ baseado na calibração da lâmina anual – M3 (BESIC)

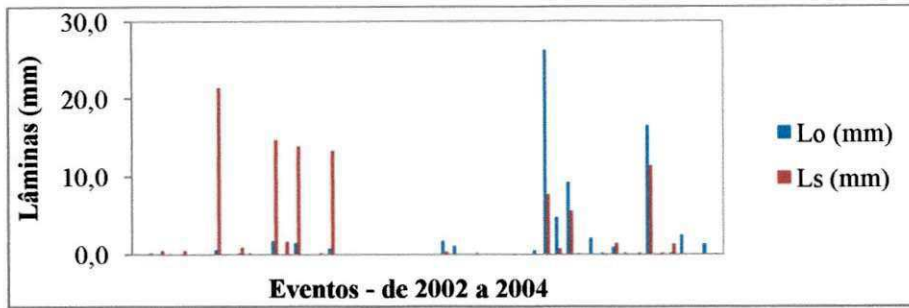


Figura A.177 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado no pico – M2 (BESJC)

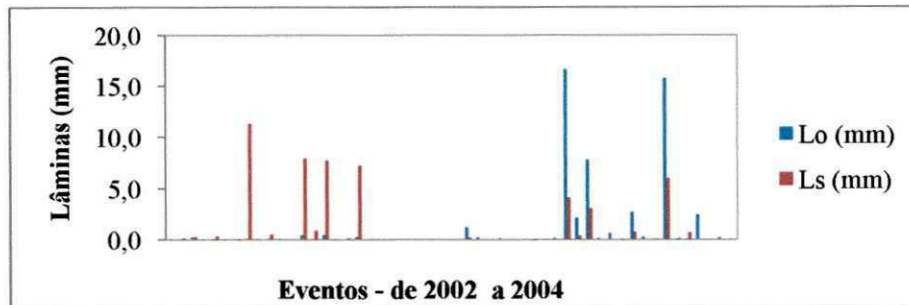


Figura A.178 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado no pico – M3 (BESJC)

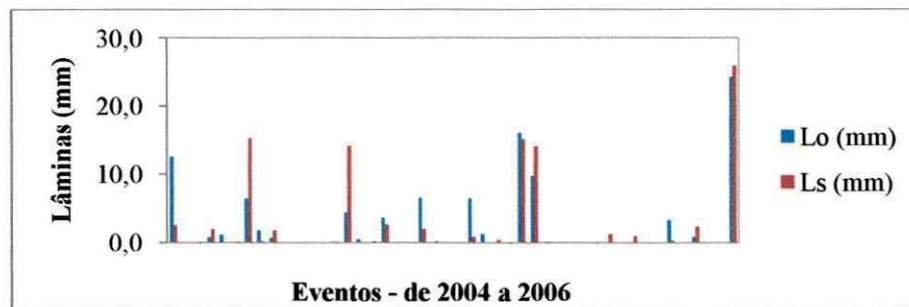


Figura A.179 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado na lâmina anual – SB1 (BESJC)

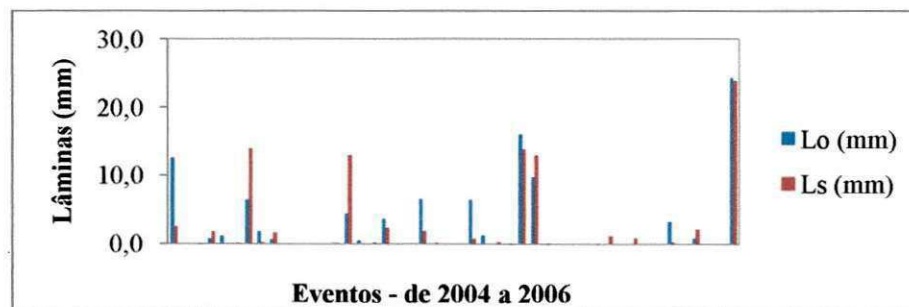


Figura A.180 – Lâminas Observadas (L_o) e Simuladas (L_s) com $C_{\text{médio}}$ baseado no pico - SB1 (BESJC)

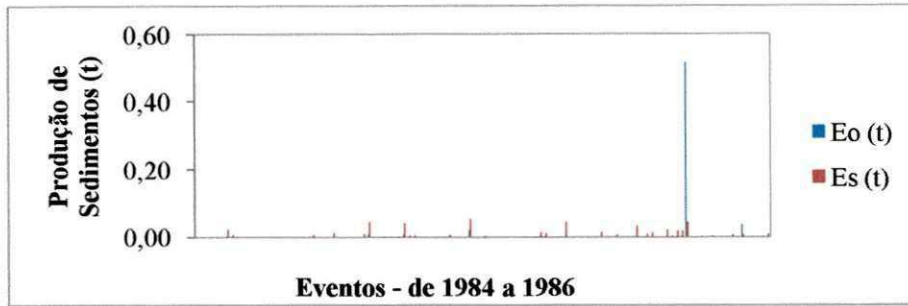


Figura A.181 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M1(BES)

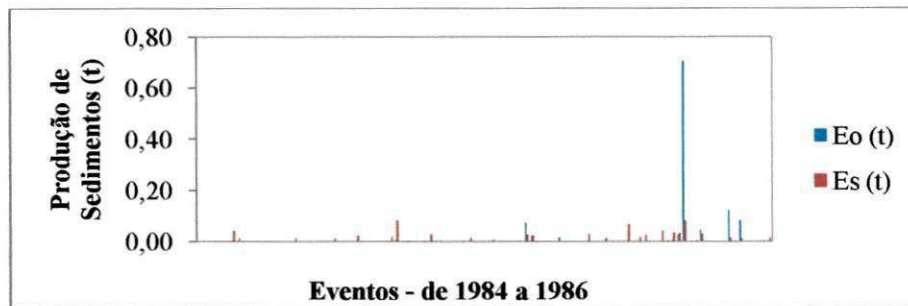


Figura A.182 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M2 (BES)

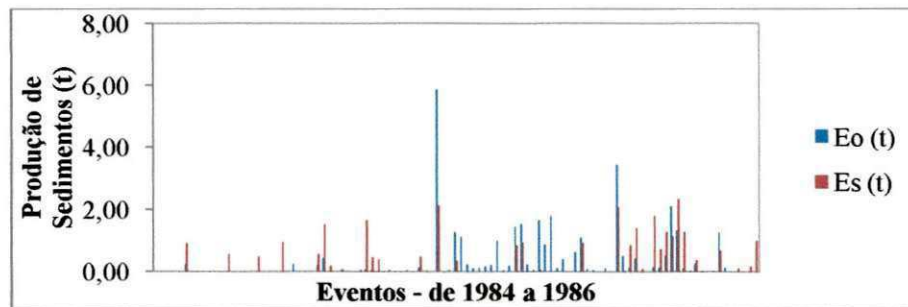


Figura A.183 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M4 (BES)

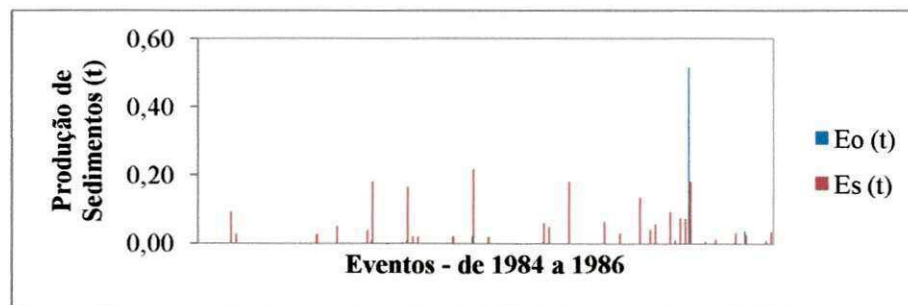


Figura A.184 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na erosão máxima – M1(BES)

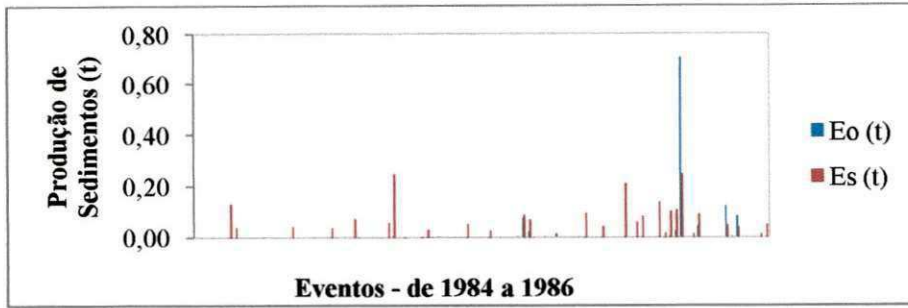


Figura A.185 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na erosão máxima – M2 (BES)

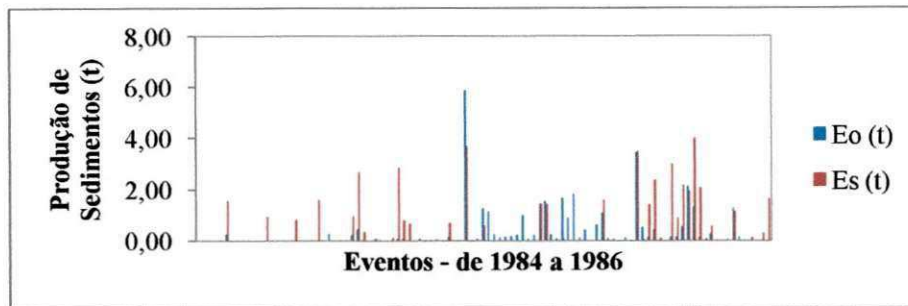


Figura A.186 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na erosão máxima – M4 (BES)

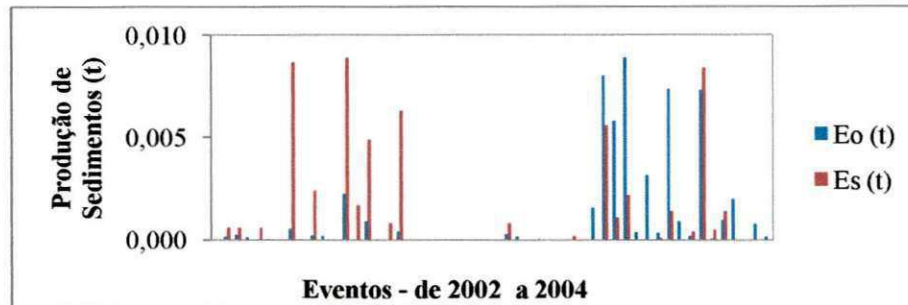


Figura A.187 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M2 (BESJC)

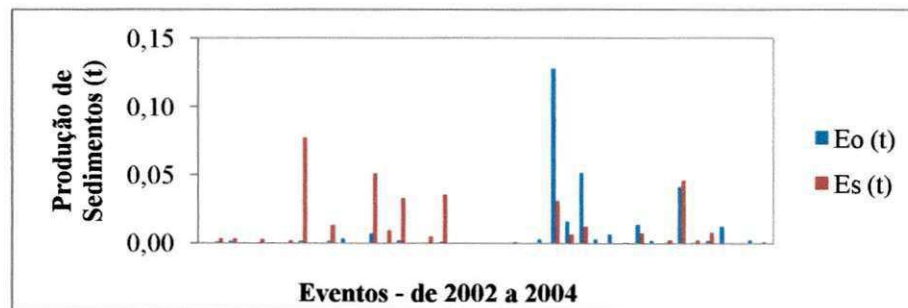


Figura A.188 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{méd})}$ baseado na produção anual de sedimentos – M3 (BESJC).

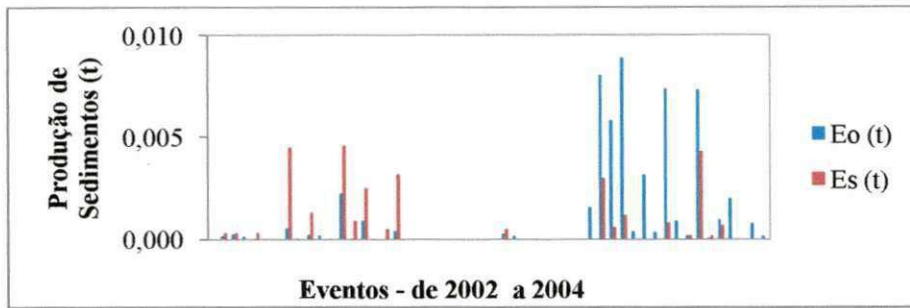


Figura A.189 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M2 (BESJC).

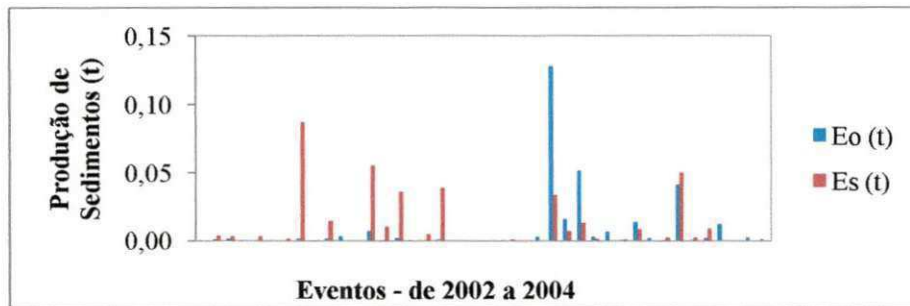


Figura A.190 – Erosão Observada (E_o) e Simulada (E_s) com $K_{r(\text{médio})}$ baseado na erosão máxima – M3 (BESJC)

ANEXO B

Tabela B.1 – Lâminas e Erosões Anuais nas unidades da BES e BESJC

Ano	Unidade Experimental	P _{anual} ¹ (mm)	L _s (mm)	E _s (t)	L _o (mm)	E _o (t)
1977	Umburana	661,6	98	26742	97	x
	Jatobá	661,6	23	63421	20	x
	Gangorra	661,6	70	291220	69	x
1984	M1(BES)	546,8	5,08	0,0039	5,14	0,0038
	M2(BES)	546,8	18,28	0,0007	18,25	0,0007
	M3(BES)	546,8	92,37	2,3854	123,19	2,3818
	M4(BES)	546,8	61,36	0,3083	63,79	0,3069
1985	M1(BES)	1247,2	56,43	0,0465	65,23	0,0464
	M2(BES)	1247,2	62,95	0,1250	60,64	0,1244
	M3(BES)	1247,2	313,17	22,9026	466,13	22,9026
	M4(BES)	1247,2	341,83	22,2816	417,84	22,2731
1986	M1(BES)	782,2	27,98	0,5604	28,41	0,5635
	M2(BES)	782,2	57,62	0,9892	58,21	0,9896
	M3(BES)	782,2	258,00	17,4912	263,16	17,6139
	M4(BES)	782,2	267,02	10,9396	269,72	10,8557
2002	M1(BESJC)	467,1	78,84	0,0922	78,94	0,0921
	M2(BESJC)	467,1	5,22	0,0052	5,11	0,0051
	M3(BESJC)	467,1	1,51	0,0186	1,50	0,0185
2003	M1(BESJC)	157,8	1,12	0,0007	3,75	0,0007
	M2(BESJC)	157,8	0,77	0,0005	2,94	0,0005
	M3(BESJC)	157,8	0,86	0,0024	1,48	0,0024
2004	M1(BESJC)	717,0	86,84	0,1024	87,99	0,1014
	M2(BESJC)	717,0	56,24	0,0469	64,86	0,0480
	M3(BESJC)	717,0	49,72	0,2808	48,94	0,2828
	SB1(BESJC) ²	717,0	23,52	x	23,34	2,1665
	SB2(BESJC) ²	717,0	23,67	x	23,52	1,9949
2005	SB1(BESJC) ²	616,9	38,15	x	38,85	9,8457
	SB2(BESJC) ²	616,9	41,69	x	41,42	6,4534
2006	SB1(BESJC) ²	322,1	38,87	x	38,22	x
	SB2(BESJC) ²	322,1	50,29	x	50,28	x

(1) Total precipitado no ano com base nos dados utilizados na modelagem; (2) Valores para alguns eventos com dados disponíveis; L_{s,o} = lâminas simulada e observada; E_{s,o} = erosões simulada e observada.