



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO EM BACIA EXPERIMENTAL
NO NORDESTE BRASILEIRO**

Por

Geraldo Moura Ramos Filho

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2017



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO EM BACIA EXPERIMENTAL
NO NORDESTE BRASILEIRO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Geraldo Moura Ramos Filho

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R175d Ramos Filho, Geraldo Moura.

Dinâmica da umidade do solo em bacia experimental no
Nordeste brasileiro / Geraldo Moura Ramos Filho. - João
Pessoa, 2017.

103 f. : il.

Orientação: Cristiano das Neves Almeida.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Dinâmica da umidade do solo. 2. Resolução temporal.
3. Bacia experimental. 4. Precipitação subdiária. I.
Almeida, Cristiano das Neves. II. Título.

UFPB/BC

**"DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO EM BACIA EXPERIMENTAL NO NORDESTE
BRASILEIRO".**

GERALDO MOURA RAMOS FILHO
Dissertação aprovada em 24 de março de 2017.

Período Letivo: 2017.1



Prof. Dr. CRISTIANO DAS NEVES ALMEIDA - UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS - UFPB
(Membro Interno)



Profa. Dra. SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO - UFPE
(Membro Externo)

João Pessoa/PB
2017.1

À minha querida mãe, Elizabete de Amorim
Correia, e ao meu querido pai, Geraldo
Moura Ramos, que sempre me apoiaram e
acreditaram no meu potencial. E àquelas
pessoas que fazem parte da minha vida.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para agradecer a todos que auxiliaram direta ou indiretamente na conclusão desta dissertação, pois a realização deste trabalho demandou muito esforço, coragem e determinação, e eu não teria conseguido atingir tal objetivo se estivesse sozinho nessa empreitada da vida.

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades concedidas e experiências que certamente contribuíram para o meu aprendizado, principalmente a realização deste sonho, este mestrado.

Agradeço aos meus pais, Geraldo Moura Ramos e Elizabete de Amorim Correia, pelo carinho e devoção com o qual sempre me trataram e me apoiaram; pelos princípios morais que fizeram de mim o que sou hoje, e acima de tudo, pela certeza de que tenho ao meu lado pessoas que me amam de verdade.

Aos meus irmãos, Larissa Correia Moura Ramos e Thiago Correia Moura Ramos, agradeço-lhes por todo o carinho, incentivo, atenção e momentos de distração, sempre me apoiando em todas as minhas decisões.

A minha namorada, Mariângela Cardoso Bezerra, por todo amor, compreensão e apoio recebido, mesmo em momentos de minha ausência, que foram necessários para buscar o conhecimento necessário para concluir este trabalho.

A todos os professores do PPPGECAM que transmitiram seus conhecimentos com muita competência, para nós, alunos.

Ao Professor Dr. Cristiano das Neves Almeida, por todos os ensinamentos, apoio e incentivo recebido durante estes dois anos, que foram tanto fundamentais para a conclusão desta dissertação, como também fundamentais para a minha formação profissional.

Agradeço a Edilson Edimar de Souza, todo esforço, dedicação e experiência em todas as atividades de campo e laboratório.

Aos meus colegas de mestrado, em especial Luís Romero Barbosa, Lucila Fernandes Araújo, Emerson da Silva Freitas, Carolina Wanderley, André Gadelha, Fagner Costa, Samir, Paloma Ferreira, Marie Malzac, Taioirene Albuquerque e Ícaro Albuquerque.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo identificar e caracterizar os diferentes processos de umedecimento do solo através de eventos chuvosos na bacia experimental do riacho Guaraíra, localizada na região litorânea sul do Estado da Paraíba, bem como investigar os fatores que regem estes processos e determinar o mínimo intervalo de tempo entre eventos chuvosos mais relevantes. Para isto, utilizaram-se dados das sondas de umidade do solo do tipo TDR (*Time Domain Reflectometer*), com uma alta resolução temporal (1 hora) e pluviógrafos instalados em quatro locais distintos da bacia experimental. O período de estudo foi de 2004 a 2015, variando de acordo com a disponibilidade de dados das sondas TDR de cada estação de monitoramento. Um primeiro estudo realizado revelou que a variação do mínimo intervalo de tempo entre eventos pode reduzir em até aproximadamente 45% o número de eventos chuvosos. Em seguida, aplicando um método utilizado por Lozano-Parra et al. (2015a), baseado na derivação temporal da variação da umidade do solo conhecida como *maximum wetting slope*, foram classificados e quantificados os tipos de processos de umedecimento do solo. Os resultados indicam um comportamento geral ou padrão da dinâmica da umidade do solo na bacia experimental com uma ocorrência dominante dos processos de umedecimento lento, causado pelo fluxo matricial, e uma pequena ocorrência dos processos rápidos, fluxo preferencial. A análise estatística multivariada baseado em técnicas *data mining* provaram que os escoamentos lentos estão relacionados com os seguintes fatores: umidade inicial do solo, precipitação acumulada, precipitação máxima em 30 minutos e a duração dos eventos. Enquanto que os escoamentos rápidos estão relacionados principalmente com a vegetação de cada estação estudada. Quanto à validação do modelo, observou-se que para os escoamentos lentos os coeficientes de determinação foram bastante significativos (38% - 73%), assim como ocorreu uma superestimação dos valores previstos. Por outro lado, os escoamentos rápidos obtiveram um coeficiente de determinação igual a 38%, porém para este processo, torna-se necessário uma quantidade maior de informações para uma melhor calibração do modelo. Uma alternativa para este estudo se dá através do estudo da relação entre o *maximum wetting slope* e a variação da umidade do solo, onde constatou-se que os processos de umedecimento do solo podem ser explicados através da variação total da umidade do solo no evento estudado.

PALAVRAS-CHAVE: dinâmica da umidade do solo, resolução temporal, bacia experimental, precipitação subdiária.

ABSTRACT

This study aimed at identifying and characterize the different soil wetting processes through rain events in the Guaraira river experimental basin, located in the southern coast of Paraíba, as well as to investigate the factors that influence these processes and determine the most important Minimum Inter-event Time (MIT). For this, it was used data collected from soil moisture probes (TDR) with a high temporal resolution (1 hour) and from rain gauges installed in four distinct sites of the experimental basin. The study period was from 2004 to 2015, varying according to the availability of TDR probes data from each monitoring station. First, it was found that the variation of the MIT reduces the number of events up to 45%. Then, it was applied a methodology proposed by Lozano-Parra et al. (2015a) that it is based on temporal derivation of the soil moisture variation known as maximum wetting slope, and the types of soil wetting processes were classified and quantified. The results indicate a general or standard behavior of the soil moisture dynamics in the experimental basin with a dominant occurrence of the slow wetting processes caused by the matrix flow and a small occurrence of the fast flow, preferential flow processes. The multivariate statistical analysis based on data mining techniques proved that the slow flows are mostly related to the factors: initial soil moisture, precipitation accumulated, maximum precipitation in 30 minutes and the duration of the events. On the other hand, the fast flows are mainly related to the vegetation of each station studied. Regarding the validation of the model, it was observed that for the slow flows the coefficient of determination were very significant (38% - 73%), as well as an overestimation of the predicted values. For the fast flow, it was obtained a coefficient of determination equal to 38%, as well as an overestimation of the data, however for this process it become necessary a greater amount of information for a better calibration of the model. An alternative is the study of the relationship between maximum slope and soil moisture variation, where it was found that soil wetting processes can be explained by total soil moisture variation in the studied event.

KEYWORDS: dynamics of soil moisture, temporal resolution, experimental basin, subdaily rainfall.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS GERAIS	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	BACIA EXPERIMENTAL	19
2.2	EVENTOS CHUVOSOS	22
2.3	UMIDADE DO SOLO	23
2.3.1	<i>Fatores que influenciam a umidade do solo.....</i>	<i>25</i>
2.4	PROCESSOS DE UMEDECIMENTO DO SOLO	26
3	ÁREA DE ESTUDO.....	28
4	MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	31
4.1.1	<i>Monitoramento da precipitação</i>	<i>32</i>
4.1.2	<i>Monitoramento da umidade do solo.....</i>	<i>32</i>
4.2	DEFINIÇÃO DOS EVENTOS CHUVOSOS	33
4.3	DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS PARA O MODELO	34
4.4	MULTIVARIATE ADAPTIVE REGRESSION SPLINES – MARS	35
4.4.1	<i>Determinação dos valores para escoamento rápido e lento</i>	<i>37</i>
4.4.2	<i>Calibração e validação dos modelos para escoamento lento e rápido através dos diferentes MIT.....</i>	<i>38</i>
4.5	ADEQUAÇÃO DO MÉTODO PARA IDENTIFICAR OS TIPOS DE PROCESSOS DE UMEDECIMENTO DO SOLO	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	40
5.1.1	<i>Monitoramento da precipitação</i>	<i>40</i>
5.1.2	<i>Monitoramento da umidade do solo.....</i>	<i>40</i>
5.2	DEFINIÇÃO DOS EVENTOS CHUVOSOS	45
5.3	DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS PARA O MODELO	47
5.4	DETERMINAÇÃO DOS VALORES PARA ESCOAMENTO LENTO E RÁPIDO.....	58

5.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA ESCOAMENTO LENTO ATRAVÉS DOS DIFERENTES	
MIT		60
5.5.1	<i>Estação Pluviográfica 01</i>	61
5.5.2	<i>Estação Pluviográfica 02</i>	63
5.5.3	<i>Estação Pluviográfica 03</i>	66
5.5.4	<i>Estação Pluviográfica 04</i>	68
5.5.5	<i>Bacia experimental</i>	71
5.6	CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA ESCOAMENTO RÁPIDO ATRAVÉS DOS DIFERENTES	
MIT		75
5.7	VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	77
5.8	ADEQUAÇÃO DO MÉTODO PARA IDENTIFICAR OS TIPOS DE PROCESSOS DE	
	UMEDECIMENTO DO SOLO	80
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICE A – PRECIPITAÇÃO E DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO NAS	
	ESTAÇÕES PLUVIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE B – EVENTOS CHUVOSOS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escoamento do tipo preferencial.....	26
Figura 2 – Escoamento do tipo matricial.....	27
Figura 3 - Localização da Bacia Experimental do riacho Guaraíra e da Bacia Representativa do rio Gramame.	28
Figura 4 – Detalhamento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.....	29
Figura 5 – Vegetação nas estações pluviográficas 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d).	30
Figura 6 – Metodologia utilizada para detectar a inclinação máxima de umedecimento do solo, Sm_{\max} , que está destacado pela linha verde. O tempo e precipitação necessário para a reação do sensor, TR e PR, respectivamente.	34
Figura 7 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2015 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	41
Figura 8 – <i>Scattergram</i> da umidade do solo das estações pluviográfica 01 a 04 no ano de 2015.....	42
Figura 9 – Gráfico de continuidade dos dados coletados de umidade do solo para cada estação pluviográfica.....	43
Figura 10 – Gráfico do tipo BoxPlot com os dados de umidade do solo utilizados para o estudo de cada estação pluviográfica.....	45
Figura 11 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso da estação pluviográfica 01 entre 19/06/2004 e 20/06/2004, com e sem presença de erros de medição.	46
Figura 12 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso da estação pluviográfica 01 entre 10/07/2006 e 11/07/2006, com e sem presença de erros de medição.	46
Figura 13 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável Sm_{\max} para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	47
Figura 14 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável θ_{init} para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	48
Figura 15 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável Duração para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02;(c) estação 03;(d) estação 04.....	49
Figura 16 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável Precipitação Acumulada para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	50
Figura 17 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Máxima em 30 minutos, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	51
Figura 18 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Antecedente em 48 horas, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	52
Figura 19 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Antecedente em 5 dias, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	53
Figura 20 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TLE, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04.....	54

Figura 21 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TPE, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04	55
Figura 22 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TR (Tempo de Resposta), para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04	56
Figura 23 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, PR (Precipitação para Resposta), para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04	57
Figura 24 – Histograma dos valores da inclinação máxima de umedecimentos das estações pluviográficas obtidas através dos eventos chuvosos para o MIT de 6 horas	58
Figura 25 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso registrado na estação pluviográfica 04 no dia 18/04/2013, com valor de S_{max} igual a 2,14.	59
Figura 26 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso registrado na estação pluviográfica 01 no dia 22/02/2006, com valor de S_{max} igual a 9	60
Figura 27 - Variáveis independentes utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos	74
Figura 28 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 01 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada.....	77
Figura 29 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 02 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada.....	78
Figura 30 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 03 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada.....	78
Figura 31 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 04 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada.....	79
Figura 32 – Gráfico de dispersão da bacia experimental mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada.....	79
Figura 33 – Gráfico de dispersão da bacia experimental mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento rápido desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS.....	80
Figura 34 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 01, com MIT de 1 hora.....	81
Figura 35 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 02, com MIT de 3 horas	81
Figura 36 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 03, com MIT de 6 horas	82
Figura 37 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 04, com MIT de 6 horas	82

Figura 38 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{m\acute{a}x}$ e $(\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na bacia experimental, com MIT de 1 hora.....	82
Figura 39 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2004 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	90
Figura 40 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2005 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	91
Figura 41 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2006 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	92
Figura 42 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2007 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	93
Figura 43 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2008 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	94
Figura 44 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2009 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	95
Figura 45 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2010 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	96
Figura 46 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2011 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	97
Figura 47 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2012 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	98
Figura 48 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2013 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	99
Figura 49 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2014 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.	100
Figura 50 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 6 horas, da estação pluviográfica 04 no dia 30/01/2008 com valor de S_{max} igual a $2,4 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	102
Figura 51 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 3 horas, da estação pluviográfica 03 no dia 14/01/2004 com valor de S_{max} igual a $3,48 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	102
Figura 52 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 3 horas, da estação pluviográfica 03 no dia 01/06/2004 com valor de S_{max} igual a $3,73 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	102
Figura 53 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 8 horas, da estação pluviográfica 02 entre o dia 30/06/2008 e 01/07/2008 com valor de S_{max} igual a $18,98 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	103
Figura 54 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 1 hora, da estação pluviográfica 02 entre o dia 17/06/2004 e 18/06/2004 com valor de S_{max} igual a $37,22 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	103
Figura 55 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 6 horas, da estação pluviográfica 01 entre o dia 29/05/2015 e 30/05/2015 com valor de S_{max} igual a $13,52 \text{ m}^3\text{m} - 3 * 10460 \text{ min}$	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bacias experimentais implantadas no projeto IBESA	20
Tabela 2 – Localização das estações de monitoramento utilizada neste estudo e equipamentos instalados	31
Tabela 3 - Equações de calibrações das sondas TDR's obtidas através dos estudos realizados por Lira (2015)	33
Tabela 4 – Variáveis independentes utilizadas na análise estatística com o <i>Multivariate Adaptive Regression Splines</i> – MARS.	34
Tabela 5 – Escolha da estação representativa por ano.....	40
Tabela 6 – Precipitação Anual.....	40
Tabela 7 – Porcentagem dos dados de umidade do solo no decorrer dos anos.	43
Tabela 8 – Tabela resumo dos anos analisados para a aplicação da metodologia proposta	44
Tabela 9 – Número de eventos chuvosos calculados para cada MIT estudado e seguindo a restrição da variação da umidade do solo maior do que $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$	45
Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos através da aplicação da técnica MARS para a determinação dos valores para escoamento lento e rápido.....	58
Tabela 11 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 01	61
Tabela 12 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 12 horas na estação pluviográfica 01	62
Tabela 13 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 01	63
Tabela 14 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 02	64
Tabela 15 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 12 horas na estação pluviográfica 01	65
Tabela 16 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 02	65
Tabela 17 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 03	66
Tabela 18 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 1 hora na estação pluviográfica 03	67
Tabela 19 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 03	68
Tabela 20 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 04	69
Tabela 21 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 8 horas na estação pluviográfica 04.....	70
Tabela 22 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 04	70

Tabela 23 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na bacia experimental	71
Tabela 24 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 6 horas na estação pluviográfica 04.....	72
Tabela 25 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na bacia experimental	73
Tabela 26 – Resumo estatístico da variável depende, S_{max} , utilizados para calibração e validação do modelo do escoamento lento	74
Tabela 27 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos rápidos na bacia experimental.....	75
Tabela 28 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 8 horas na estação pluviográfica 04.....	76
Tabela 29 - Resumo estatístico do eventos chuvosos utilizados para calibração e validação do modelo do escoamento rápido	77
Tabela 30 – Coeficiente de determinação (R^2) entre valores de $S_{máx}$ e incremento máximo da umidade do solo ($\theta_{máx} - \theta_{init}$) produzido pelos eventos chuvosos para da estação pluviográfica e cada MIT estudado	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IBESA – Instalação de Bacias Experimentais no Semiárido

LARHENA - Laboratório de Recursos Hídricos e Eng.^a Ambiental

ERB - *Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins*

REHISA - Rede de Hidrologia do Semiárido

TDR - *Time Domain Reflectometer*

MIT - *Minimum Interevent Time*

MARS – *Multiple Adaptive Regression Spline*

$S_{m\acute{a}x}$ – Declividade máxima da umidade do solo num tempo mínimo de 1 hora

D – Duração do evento chuvoso

Max – 30 – Precipitação máxima em 30 minutos durante o evento chuvoso

TLE – Tempo decorrido desde o último evento de chuva

TPE – Tempo decorrido desde o penúltimo evento chuvoso

AP48 – Precipitação acumulada nas últimas 48 horas

AP5 – Precipitação acumulada nos últimos 5 dias

TR – Tempo necessário para iniciar a reação da sonda TDR

PR – Precipitação necessária para iniciar a reação da sonda TDR

θ_{init} – Umidade do solo inicial antes do início do evento

$\theta_{m\acute{a}x}$ – Umidade do solo máximo atingido no evento chvoso

Veg – Vegetação

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de suprimento de água durante todo o ano é uma realidade em todas as partes do mundo tanto para a sobrevivência dos seres humanos e ecossistemas como para as atividades econômicas – agricultura, indústria, dentre outros. Portanto, a realização de monitoramento, gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos é de extrema importância para racionalização do consumo e para evitar o seu desperdício, propiciando assim a manutenção da vida e o progresso econômico da região (COELHO, 2011; EGLER, 2012; SANTOS, 2009).

No dia 8 de janeiro de 1997, foi criado no Brasil a lei federal de número 9.433, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o sistema nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que visa propiciar avanços na área de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, através de estabelecimento de objetivos e instrumentos regulatórios e econômicos. No entanto, os avanços alcançados nos últimos anos por meio da legislação não foram seguidos por avanços na área da hidrologia experimental, visto que séries longas de dados hidroclimatológicos são necessárias para as tomadas de decisão sobre os recursos hídricos, e que por vezes ainda permanecem incompletos ou mesmo inexistentes em certas áreas de estudo (IBESA, 2002 apud BARBOSA, 2015).

Uma alternativa para os estudos hidrológicos de uma região, que apresenta insuficiência de dados, é através da regionalização de parâmetros hidrológicos a partir das bacias experimentais, onde são instrumentadas uma rede de estações de monitoramento hidrológico para a criação de bancos de dados, que serão utilizados para a futura regionalização hidrológica (TRONCOSO, 2012).

Dentre os processos do ciclo hidrológico, a precipitação é um componente fundamental para o ciclo global da água capaz de moldar nosso meio ambiente, possuindo efeito sobre a salinidade dos rios, sobre a sobrevivência dos seres vivos, e, ainda, contribui para manutenção da umidade do solo e reservatórios de águas subterrâneas (MICHAELIDES et al., 2009). A umidade do solo é outra variável chave, pois é um fator preponderante da bacia hidrográfica e influi direta e indiretamente na resistência do solo, geração de escoamento, infiltração, formação de redes de drenagem e até mesmo modificações morfológicas e topográficas da região (MITTELBAACH; SENEVIRATNE, 2012).

A coleta dessas informações é de grande importância, pois os métodos de análises estatísticas têm tido êxito na previsão e acompanhamento de processos hidrológicos. Para isto, é fundamental a existência de uma grande quantidade de dados hidrológicos com

ausência de erros, e ainda realizar a escolha do método estatístico mais adequado para o objetivo do estudo (GOUVÊA, 2009).

Na literatura, é possível encontrar estudos que buscam analisar os processos de umedecimento do solo, utilizando dados coletados em campo, principalmente a precipitação e a umidade do solo. Lozano-Parra et al. (2015a) afirmam que os processos de umedecimento do solo ocorrem basicamente de duas maneiras: o escoamento preferencial e matricial. O escoamento preferencial é um movimento rápido e desigual, que traz como consequência o transporte rápido dos contaminantes para a água subterrânea, por outro lado o escoamento matricial é um movimento relativamente lento e uniforme, que pode afetar grande parte da disponibilidade de água para as plantas.

Portanto, com o propósito de contribuir para o avanço dos estudos que vêm sendo realizados pelo grupo de pesquisadores de recursos hídricos do LARHENA/UFPB (Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Paraíba), foram realizados monitoramentos pluviográficos e de umidade do solo na bacia experimental do riacho Guaraíra, que se localiza dentro da bacia representativa do rio Gramame, na Paraíba. Diante do exposto, apresentam-se os objetivos deste trabalho:

1.1 Objetivos gerais

- Identificar e caracterizar os diferentes tipos de processo de umedecimento do solo através dos eventos chuvosos na bacia experimental do riacho Guaraíra.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar a dinâmica da umidade do solo e sua relação com a precipitação;
- Identificar o Mínimo Intervalo de Tempo entre eventos chuvosos (MIT) mais significativo;
- Identificar os fatores que determinam a ocorrência dos diferentes processos de umedecimento do solo, fluxo preferencial e matricial, assim como analisar a influência do MIT nestes fatores;
- Observar quais processos de umedecimento (preferencial ou matricial) do solo são dominantes no tempo e espaço;
- Adequação do método para identificar os tipos de processos de umedecimento do solo.

1.3 Estruturação da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma: neste primeiro capítulo (*Introdução*), relata-se uma contextualização abrangendo o tema em estudo, como também são estabelecidos os objetivos que se pretende alcançar com este trabalho. No capítulo 2 (*Referencial Teórico*), é apresentada a revisão dos estudos que fundamentaram as atividades desta pesquisa diante atual panorama científico. As características fisiográficas da área de estudo são enfocadas no capítulo 3 (*Área de Estudo*). No quarto capítulo (*Materiais & Métodos*) estão descritas as etapas metodológicas utilizadas para atingir os objetivos propostos no capítulo 1. O capítulo 5 (*Resultados & Discussões*) constitui-se dos resultados e discussões a respeito da dinâmica da umidade do solo, definição dos eventos chuvosos, calibração e validação do modelo para os diferentes processos de umedecimento do solo, bem como alternativa para estudos destes processos. No último capítulo (*Conclusões & Recomendações*) são apresentadas as considerações finais acerca dos resultados obtidos durante a pesquisa, evidenciando a importância do trabalho experimental e sugerindo algumas recomendações em favor de estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em quatro partes, de acordo com os elementos que serão empregados na metodologia da pesquisa para alcançar os resultados desejados. Na primeira parte será realizada uma atualização bibliográfica dos estudos realizados em bacia experimental, dando ênfase a sua importância, objetivos e dificuldades. Na segunda parte, serão abordados alguns estudos recentes sobre eventos chuvosos. Na terceira parte do referencial teórico, será abordado a umidade do solo, a sua importância, funções, métodos de medição e fatores que o influenciam. Por fim, será realizada uma descrição de tipos de processos de umedecimento do solo, sua importância e a abordagem de um estudo de caso.

2.1 Bacia Experimental

As Bacias experimentais são bacias relativamente homogêneas em solo e vegetação, e que possuem características físicas uniformes. Algumas das características da bacia hidrográfica podem ser modificadas com o objetivo de estudar os efeitos destas modificações nas características hidrológicas (TOEBES; OURYVAEV, 1973). Ainda segundo os autores, a pesquisa hidrológica em bacias experimentais tem sofrido com a falta de dados e com a falta de padronização das técnicas de observação e processamento, mas sofre, também, com métodos de pesquisa que dão apenas uma compreensão limitada dos processos físicos ocorridos em bacias hidrográficas, não podendo as pesquisas serem meramente experimentos estatísticos sem uma metodologia definida em que são obtidos apenas resultados limitados, mas sim objetivando a previsão e estimativa qualitativa e quantitativa das variadas características. Portanto, o objetivo das pesquisas hidrológicas não é apenas a coleta de dados, mas uma interpretação destes dados para utilização na resolução de problemas de gestão e planejamento de recursos hídricos.

As bacias experimentais configuram laboratórios em campo, em geral são densamente equipadas, para estudos detalhados dos processos físicos do ciclo hidrológico. Dessa forma, podem-se extrair dos estudos realizados com a implantação de bacias experimentais, diretrizes de gestão para aplicação em locais desprovidos de informações e que não possui recursos financeiros para reverter esse quadro (FONTES; ALVARES; MEDEIROS, 2004).

Na Europa, a rede ERB (*Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins*) é uma associação de 22 países europeus, que desenvolve estudos em

bacias experimentais, tanto na Europa como fora dela. A ERB possui como objetivo principal o aumento da relação entre os membros através da troca de informações, métodos de pesquisa, modelos, etc. A rede ERB realiza encontro bianuais para troca de experiência sobre a temática, o que é muito produtivo para manutenção de redes de bacias experimentais.

Um dos integrantes da rede ERB, chamado Luca Brocca, realizou diversos estudos em bacias experimentais, principalmente, utilizando dados de precipitação e umidade do solo. Em um de seus estudos, Brocca et al. (2015) utilizaram um método inovador chamado SM2RAIN, que busca inferir a precipitação através das observações de umidade do solo. O algoritmo SM2RAIN baseia-se na inversão da equação do balanço hídrico do solo para obter a precipitação através dos dados de umidade do solo. Foram utilizadas as informações de 10 estações de monitoramento, cujos dados foram coletados por diversos estudiosos ao longo dos anos e em diversos países – Itália, Luxemburgo, Espanha e França. Utilizando estes dados observados, foram encontrados coeficientes de determinação iguais a 87% e 85% para o período de calibração e validação, respectivamente. Também se observou que o desempenho é melhor em climas temperados úmidos e quando o sensor de umidade do solo é instalado verticalmente.

Em 2001, na região Nordeste do Brasil, foi idealizada e implantada uma Rede de Hidrologia do Semiárido, REHISA, com o objetivo de avaliar o balanço hídrico em diferentes escalas de tempo e espaço, empregando para tanto, modelos hidrológicos distribuídos, e técnicas experimentais de avaliação de incerteza, além da formação de um banco de dados e criação de uma rede de compartilhamento de experiências e informações sobre bacias experimentais. Esta rede foi formada pelos grupos de pesquisa da área de recursos hídricos das seguintes instituições, Tabela 1, UFPB, UFCG, UFC, UFBA, UFAL, UFRN, UFPE, UFRPE (REHISA, 2004).

Tabela 1 – Bacias experimentais implantadas no projeto IBESA

Denominação da bacia	Universidade Responsável
Bacia Experimental de Serra Negra do Norte, RN	UFRN
Bacia Experimental do Rio Guaraíra, PB	UFPB
Bacia Experimental de São João do Cariri, PB	UFCG
Bacia Experimental de Aiuaba, CE	UFC
Bacia Experimental do Rio do Cedro, BA	UFBA
Bacia Experimental do Riacho Gameleira, PE	UFPE

Denominação da bacia	Universidade Responsável
Bacia Experimental do Riacho Jatobá, PE	UFRPE
Bacia Experimental de Santana do Ipanema, AL	UFAL

Diversos estudos foram desenvolvidos a partir desta rede, como por exemplo, o desenvolvido por Rocha (2008), que realizou a simulação do escoamento superficial para diferentes cenários de uso e ocupação do solo na bacia experimental de Santana do Ipanema, em Alagoas (BESI) e da Bacia Hidrográfica do Riacho Gravatá (BHRG), através do modelo Kinos2, onde foi observado que para o BHRG na situação de caatinga a geração de volume escoado iria representar 31% da situação atual, enquanto que a condição de solo desmatado faria o total escoado aumentar 121%. Já para BESI, a condição de caatinga iria representar 54%, enquanto que a situação de desmatamento seria equivalente a 250% da situação atual. Concluindo, assim, que o efeito de desmatamento do solo conduz a um acréscimo considerável no volume escoado, conseqüentemente, contribuindo ainda mais para a escassez hídrica da região.

Cordeiro, Albuquerque e Montenegro (2015) realizaram o estudo na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, em que se buscou calcular o valor de evapotranspiração de referência através do método Penman-Monteith da FAO em intervalos diários. Obtiveram os valores de ETo entre 0,89 mm/dia em julho/2013 e 5,23 mm/dia em fevereiro, com uma média de 3,42 mm/dia para todo o período estudado.

Figueiredo et al. (2016) realizaram o estudo na bacia experimental Aiuaba com o objetivo de avaliar quais as variáveis que melhor explicam o início do escoamento superficial, bem como, quais processos prevalecem sobre a formação do escoamento. O período de análise foi de 2005 até 2014, onde obteve-se 119 eventos com precipitação superior a 10 mm, proporcionando 45 eventos com escoamento, 25 com escoamento desprezível e 49 sem escoamento. Chegando à conclusão que o escoamento ocorreu sempre que a precipitação ultrapassou 31 mm, mas nunca ocorreu para precipitação abaixo de 14 mm ou para intensidade máxima de precipitação em 60 minutos abaixo de 12 mm/h. Acrescentou ainda que nenhuma variável analisada (precipitação total ou antecedente; umidade do solo; intensidade das chuvas; e duração das chuvas) foi capaz de explicar o início do escoamento em todos os eventos chuvosos analisados.

Lira (2015) realizou na Paraíba, mais especificamente na bacia experimental do riacho Guaraíra, a calibração das sondas de umidade do solo do tipo TDR (*Time Domain*

Reflectometer) e também realizou a análise da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo nesta bacia, onde constatou a importância da cobertura vegetal como controlador natural da umidade do solo e também observou que a variabilidade temporal é mais sujeita aos efeitos climáticos, como por exemplo, a precipitação, enquanto que a variabilidade espacial está mais atrelada aos termos invariáveis no tempo.

2.2 Eventos Chuvosos

Como a precipitação é intermitente, com a maior parte do tempo sem chuvas, muitos estudos hidrológicos e geomórficos utilizam o conceito de evento chuvosos, que é uma forma conveniente de resumir séries temporais de valores de precipitação em entidades individuais, de modo que elas sejam significativas para aplicações específicas, como por exemplo para estudos de geração de escoamento, erosão do solo, perdas por interceptação e modelagem da precipitação (BROWN; KATZ; MURPHY, 1985; DUNKERLEY, 2008).

Existem diversos métodos para delimitar os eventos chuvosos, dentre eles: o método do Mínimo Intervalo de Tempo entre eventos chuvosos (MIT), arbitrariamente, através de uma análise de auto correlação, utilizando um coeficiente de correlação de classificação ou utilizando o método exponencial. Porém, o critério do MIT é o critério mais utilizado para definição dos eventos chuvosos (BONTA; RAO, 1988; MOLINA-SANCHIS et al., 2016).

O critério do mínimo intervalo entre eventos (MIT) é aplicado através da determinação de um intervalo mínimo sem ocorrências de chuvas, pois, assim, períodos maiores ou iguais a este intervalo irão determinar o início e término dos eventos chuvosos. Alguns estudos acrescentam um critério na qual qualquer evento chuvoso deva ter uma acumulação total mínima de precipitação especificada (LARSEN; TEVES, 2015).

Segundo Dunkerley (2008), as características dos eventos são definidas com relação ao tamanho do evento chuvoso. Estas características dependem assim do valor do MIT adotado para definir o evento, e atualmente a literatura revela uma ampla gama de valores para o MIT, variando de 3 minutos até 24 horas. Como exemplo, o autor menciona o estudo de Bracken et al. (2008), que utilizaram a MIT de 12 horas para que o solo pudesse secar entre os eventos de escoamento superficial, reduzindo o impacto da umidade do solo antecedente nos eventos de escoamento. Outro exemplo foi o estudo realizado por Cattán et al. (2006) que adotaram o MIT de 15 minutos para realizar um estudo de correlação com os eventos de escoamento superficial. No estudo desenvolvido por este autor foram utilizados cinco anos de dados de precipitação para estudo das características dos eventos chuvosos. Ele variou o MIT de 15 minutos até 24 horas e observou que o número de eventos variou

entre 500 até 118 e a intensidade média de 2,04 até 0,94 mm/h. Portanto, a mudança do valor do MIT altera substancialmente o número e as características dos eventos chuvosos, tornando necessário um aprofundamento dos estudos na procura dos valores mais apropriados para as diferentes áreas de aplicação.

Todisco (2014) apresentou um estudo onde analisou eventos chuvosos para um MIT igual a 6 horas. O objetivo do estudo foi desenvolver formas de representar a distribuição temporal de chuvas que possam ter poder explicativo para perdas de solo e que possam ser úteis para selecionar critérios para identificação de eventos erosivos a partir de registros pluviográficos.

Garcia (2011) realizou seu estudo na Bacia Experimental de Serra Negra do Norte, localizado na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, onde analisou o efeito do MIT, variando entre 10 minutos e 12 horas, nas características dos eventos de precipitação através de uma série histórica de precipitação de nove anos de registro (2002 – 2011). O autor observou que variando o MIT de 10 minutos até 12 horas, ocorre uma diminuição no número de eventos chuvosos em 44%. A duração média e a precipitação acumulada aumentaram proporcionalmente ao aumento do MIT adotado e de acordo com Tokay e Short (1996), os valores médios das intensidades dos eventos podem ser classificados como muito fortes com MIT de 10 minutos com uma intensidade média de 10,71 mm/h, e moderados com MIT de 12 horas com intensidade média de 4,72 mm/h.

Coutinho et al. (2014) analisaram as diferentes características dos eventos chuvosos (picos, duração, precipitação total e intensidade) para MIT maior do que 30 minutos entre os anos de 2005 e 2008 em três bacias experimentais: a bacia experimental Aiuaba, a bacia experimental do riacho Guaraíra e a bacia experimental do São João do Cariri. Observou-se que para as duas bacias experimentais do semiárido (Aiuaba e São João do Cariri) apresentaram uma distribuição similar de eventos chuvosos. Os eventos chuvosos não caracterizados destacaram-se entre os demais tipos por ter maiores valores de pico, duração e intensidade em todas as estações pluviográficas.

2.3 Umidade do solo

Em geral, a umidade do solo se refere a água presente na parte mais alta de um solo e é uma variável chave no sistema terrestre, pois controla a troca de água e energia entre a superfície e a atmosfera, ou seja, é uma variável responsável pelo controle de uma grande

variedade de processos ecológicos, hidrológicos, geotécnicos e meteorológicos (ROMANO, 2014; VEREECKEN et al., 2014).

Inúmeras são as maneiras de realizar as medições da umidade do solo, podendo se dar através de medições pontuais com sensores eletromagnéticos de umidade do solo (*Time domain reflectometer*, *Capacitance* e *Time Domain transmission sensors*); métodos hidrogeofísicos (*ground penetrating radar*, indução eletromagnética); sensoriamento remoto; sondas de raios cósmicos. (VEREECKEN et al., 2014)

É muito importante para uma ampla gama de estudos agrônômicos, hidrológicos, pedológicos e ambientais o conhecimento da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo. Do ponto de vista físico, a umidade do solo influencia nas propriedades hidráulicas do solo, que produzem efeitos cruciais na infiltração, escoamento superficial e processos de erosão do solo que são críticos em vários campos de interesse prático (ZUCCO et al., 2014).

Brocca et al. (2012) estudaram a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo em duas bacias hidrográficas, 178 e 242 km², na região central da Itália, durante um ano, com o objetivo de expandir os resultados obtidos em bacias de pequeno e médio porte com foco no aumento da variabilidade espacial da umidade do solo com o aumento da área de estudo. Por fim, foram destacados dois resultados: a variabilidade espacial da umidade do solo aumenta com a área de até aproximadamente 10 km² e então permanece bastante constante com um coeficiente de variação médio igual a 0,20; e independentemente da extensão da superfície, a umidade do solo apresenta características de estabilidade temporal e, portanto, poucas medições podem ser utilizadas para inferir valores médios com boa precisão.

Poucos são os estudos que examinam a resposta da umidade do solo aos eventos chuvosos. Destacando a pesquisa de He et al. (2012) que estudaram a resposta da umidade do solo, em dois postos de monitoramento com cobertura vegetal distintas, ocorridos durante os eventos chuvosos no noroeste da China, utilizando os dados de umidade do solo e precipitação entre 2003 e 2008. Os autores observaram que a umidade do solo nas profundidades de 20 e 40 cm aumentaram significativamente após o evento chuvoso, mas a magnitude destas mudanças varia a depender da duração do período seco que precede a precipitação. Por outro lado, a umidade do solo nas profundidades de 120 até 160 cm não sofreu variação significativa nos dois postos de monitoramento. Como conclusão, os resultados sugeriram que os grandes eventos de precipitação (> 20 mm) desempenham um papel fundamental no aumento do armazenamento de água no solo em ambos os postos.

2.3.1 Fatores que influenciam a umidade do solo

Há um grande número de artigos que indicam que o uso do solo, topografia, propriedades do solo, umidade média do solo, elevação relativa, precipitação, radiação solar influenciam na distribuição da umidade do solo (QIU et al., 2001).

Solos com pequena profundidade influenciam menos na umidade volumétrica do solo devido a sua pequena capacidade de armazenamento. Ainda, terrenos com maiores declividades tornam o escoamento mais propenso a infiltração, fazendo com que a umidade do solo diminua, prejudicando a regulação dos volumes de evapotranspiração da vegetação. A tendência é que em terrenos com solos menos profundos e altas declividades, a influência do tipo de vegetação na infiltração da água seja menor (TUCCI, 2005 apud LIRA, 2015)

Cho e Choi (2014) realizaram um estudo na península coreana no período de maio a outubro de 2011, com o objetivo de mostrar as relações existentes entre a umidade do solo e diversos fatores. A relação com a precipitação é evidente, pois há o crescimento da umidade do solo após os eventos chuvosos, bem como, decréscimo antes do evento chuvoso seguinte. Os autores acrescentaram ainda que a variabilidade espacial da umidade do solo é controlada predominantemente por padrões de precipitação em condições úmidas. A insolação e temperatura do ar e solo apresentam relações inversas com a umidade do solo, pois estes fatores estão conectados de alguma maneira ao processo de evaporação.

Lozano-Parra; Schnabel; Ceballos-Barbancho (2015b) realizaram um estudo sobre o papel da cobertura vegetal no processo de umedecimento do solo em três bacias experimentais na Espanha, em que a precipitação era registrada em intervalos de 5 minutos, e umidade do solo, em diferentes alturas, a cada 30 minutos, durante 2 anos e 6 meses. Quanto aos eventos chuvosos, foram definidos através da utilização do MIT de 6 horas e com lâmina mínima precipitada de 0,2 mm. Os autores observaram que, o aumento do valor da umidade do solo abaixo das copas das árvores é mais lento e menor do que nas pastagens. A interceptação das chuvas pelas árvores provocou uma maior redução, bem como um atraso da água da chuva atingir a superfície do solo em comparação com a pastagem. O limiar de precipitação para produzir uma resposta hidrológica positiva do solo abaixo da cobertura arbórea e em condições ambientais mais secas foi de 6 mm, enquanto que em pastagem foi de apenas 2 mm.

2.4 Processos de umedecimento do solo

A água pode se infiltrar no solo basicamente de duas maneiras: através do escoamento matricial ou uma combinação entre escoamento matricial e preferencial, no entanto ambas provocam consequências ambientais diferentes (LOZANO-PARRA et al., 2015a).

O fluxo preferencial, Figura 1, refere-se ao movimento desigual e muitas vezes rápido da água e/ou soluções através do meio poroso, seja através de tocas de minhoca ou formiga, furos de raiz ou de fendas, permitindo, assim, um transporte muito rápido de uma série de contaminantes, incluindo pesticidas, nutrientes, dentre outros, podendo trazer consequências significativas para a qualidade da água subterrânea e para a saúde humana (SHRESTHA; KANSAKAR, 2016).

Podem ser utilizadas algumas abordagens diferentes para identificar a ocorrência e extensão do fluxo preferencial: (1) observação das estruturas do solo ou porosidade, por exemplo, através de raio X e ressonância magnética; (2) medição da distribuição ou movimento da água, isto é, monitoramento da umidade do solo e condutividade hidráulica; (3) movimento de gás, ou seja, permeabilidade do ar e difusividade do gás; (4) análise de imagem de vias de fluxos, por exemplo, através de corantes traçadores (ALLAIRE; ROULIER; CESSNA, 2009).



Figura 1 – Escoamento do tipo preferencial

Fonte: Módulo de educação e extensão da Cornell University Soil and Water Laboratory

O fluxo matricial, Figura 2, é um movimento relativamente lento e uniforme de águas através do solo, que pode afetar em grande parte a disponibilidade de água para as plantas, enquanto faz a amostragem de todos os espaços de poros, obedecendo à teoria de convecção-

dispersão que pressupõe, que a água segue um caminho de fluxo médio através do solo (SHRESTHA; KANSAKAR, 2016).

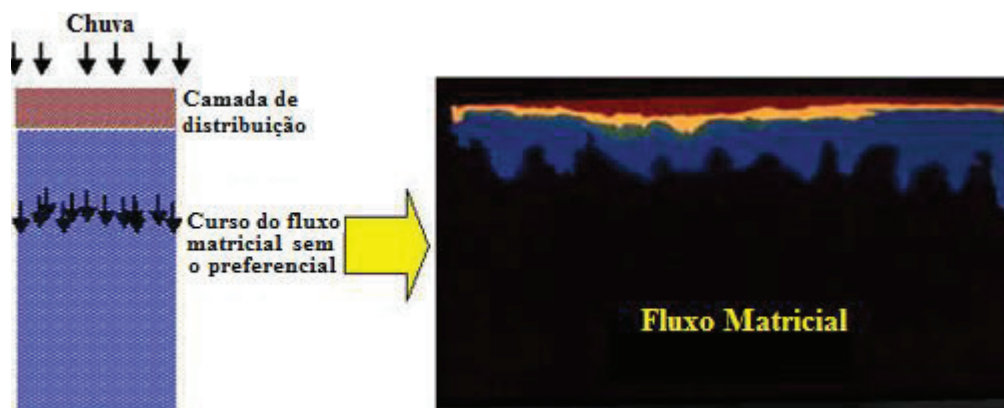


Figura 2 – Escoamento do tipo matricial

Fonte: Módulo de educação e extensão da Cornell University Soil and Water Laboratory

Lozano-Parra et al. (2015a) aplicaram a metodologia chamada inclinação máxima de umedecimento (*maximum wetting slope*), usando as inclinações máximas determinadas como indicadores para os fluxos preferencial e matricial, onde os menores valores são interpretados como o fluxo matricial ou infiltração homogênea. Por outro lado, os valores maiores são interpretados como a predominância do fluxo preferencial, e por fim os valores intermediários são considerados uma combinação entre fluxo matricial e preferencial. Em seguida é realizada a análise da importância de diversas variáveis (precipitação antecedente, umidade antecedente, vegetação, topografia, etc) em cada um destes processos. É esperado que os fatores que influenciam os valores menores do declive sejam diferentes dos fatores que influenciam os valores maiores. Por fim, o estudo concluiu que os fatores que mais influenciam os processos de umedecimento rápido do solo são a intensidade da chuva e a topografia, por outro lado, os processos lentos são influenciados pela velocidade do escoamento, tipo do solo e cobertura vegetal.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa, denominada bacia hidrográfica experimental do riacho Guaraíra, está localizada na bacia representativa do rio Gramame, conforme a Figura 3. A bacia hidrográfica do rio Gramame possui uma área de drenagem de aproximadamente 590 km² banhando os municípios paraibanos de Pedras de Fogo, Santa Rita, Alhandra, Conde, São Miguel de Taipu, Cruz do Espírito Santo e João Pessoa. Nela encontra-se a barragem Gramame-Mamuaba com capacidade de armazenamento de aproximadamente 56 milhões de m³ e responsável pelo abastecimento de água de cerca de um quarto da população do estado da Paraíba (PDRH, 2000).

Do ponto de vista climatológico, observa-se que o período chuvoso se concentra em cinco meses, compreendidos entre março e julho, com uma precipitação média anual de aproximadamente 1.700 mm e temperatura média anual de 26,0°C. Além disso, a bacia hidrográfica do rio Gramame apresenta características de clima tropical chuvoso, segundo a classificação de Köppen.

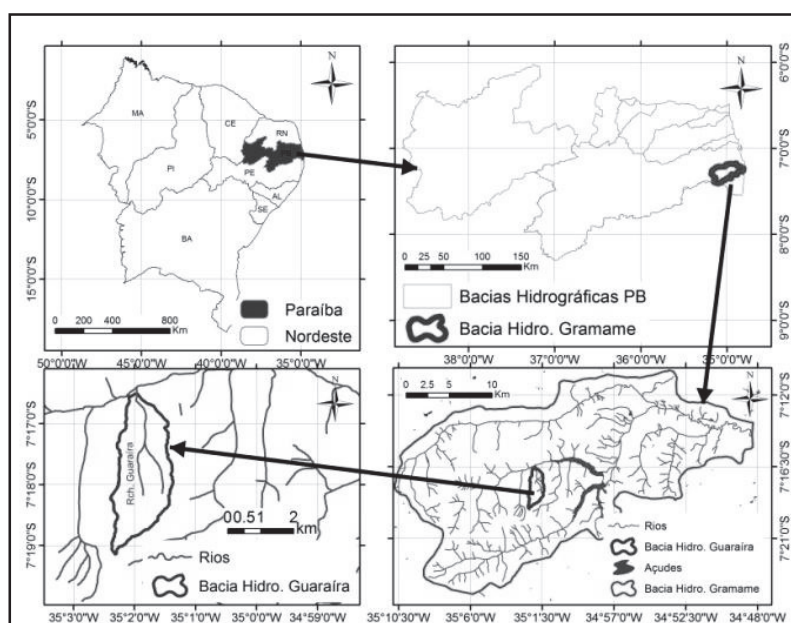


Figura 3 - Localização da Bacia Experimental do riacho Guaraíra e da Bacia Representativa do rio Gramame.

A bacia experimental do riacho Guaraíra possui uma área aproximada de 5,84 km². Situa-se parte no município de Pedras de Fogo entre as coordenadas UTM Norte 9.190,80

km e 9.125,25 km, e Leste 274,50 km e 277,00 km (Datum SAD 69), distante 40 km de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, conforme a Figura 4.

Detalhando a bacia experimental do riacho Guaraíra, a Figura 4 mostra o mapa com a hidrografia, relevo e localização das estações de monitoramento. Sua rede de monitoramento atual apresenta quatro estações pluviográficas, uma estação climatológica e três estações linimétricas.

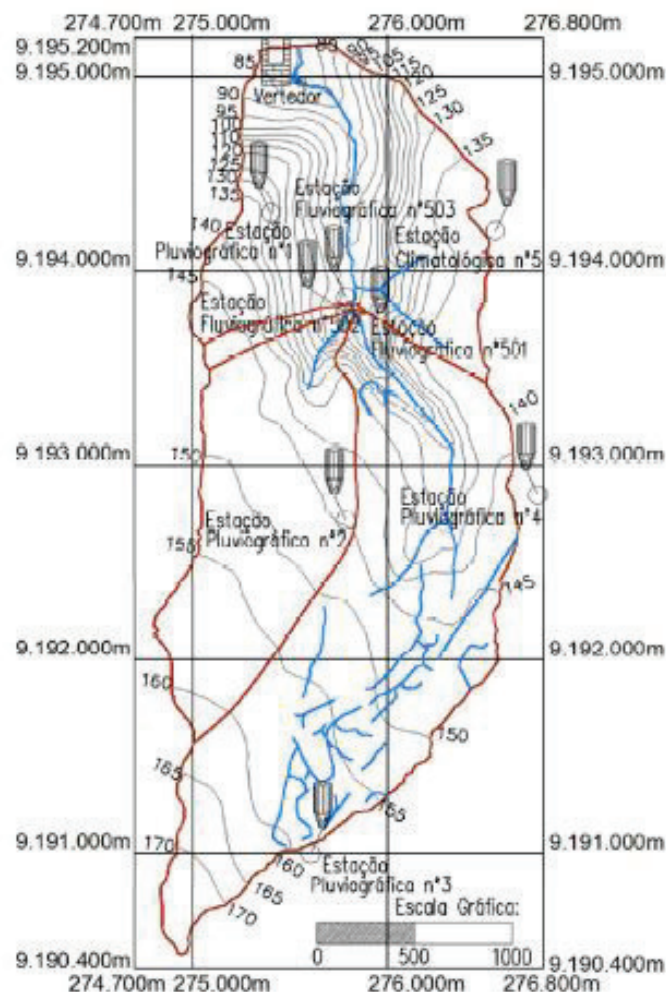


Figura 4 – Detalhamento da bacia experimental do Riacho Guaraíra

Em relação ao uso do solo, a bacia experimental é composta principalmente pela mata atlântica, enquanto que o uso antrópico do solo é majoritariamente cana-de-açúcar, com algumas áreas de plantações de abacaxi e, ainda, algumas pequenas estradas de terra. Quanto ao relevo, observa-se pelas curvas de nível, que a altitude da bacia experimental do riacho Guaraíra varia de 170 metros em seus pontos mais altos até 80 metros em seu exutório.

Quanto a vegetação próxima as estações pluviográficas, Figura 5, Lira (2015) caracterizou cada uma delas em seu estudo, a saber: 01, predominância da mata atlântica; 02 e 03, existência de poucas árvores; e 04, quase sem vegetação.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5 – Vegetação nas estações pluviográficas 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d).

4 MATERIAL E MÉTODOS

São descritas nesta seção do trabalho, as metodologias utilizadas para a realização do monitoramento hidrológico, cujos dados coletados serão utilizados nas posteriores avaliações das relações entre precipitação e umidade do solo. Em seguida, será apresentado os materiais e procedimentos empregados na coleta dos dados e a abordagem de algumas referências que embasarão essa parte do estudo.

4.1 Monitoramento hidrológico

A bacia experimental do riacho Guaraíra, que vem sendo monitorada desde 2003, possui atualmente sete estações de monitoramento em operação, apresentados na Figura 4. Dentre as quais, para o desenvolvimento deste estudo, quatro delas serão destacadas na Tabela 2: três estão equipadas com pluviógrafos digitais e sondas de reflectometria no domínio do tempo, TDR, e uma está equipada com estes equipamentos acrescido de um sensor de nível estático instalado no final do ano de 2015 em um piezômetro nas proximidades da estação pluviográfica 04. Além desses equipamentos, todos possuem um abrigo, *datalogger*, painel solar, bateria e regulador de voltagem.

A estação climatológica foi descartada desse estudo devido ao grande número de falhas da sonda TDR₁ apresentados durante os anos de 2004 a 2015 e, também, pela interrupção da coleta dos dados no ano de 2016 devido ao seu furto. A bacia experimental ainda conta com três linígrafos instalados em seções dos três principais riachos da bacia.

Tabela 2 – Localização das estações de monitoramento utilizada neste estudo e equipamentos instalados

Identificação	Tipologia	Longitude (m)	Latitude (m)	Equipamentos
Est. Pluv. 01	Estação Pluviográfica	275.401,85 L	9.194.297,56 S	Pluv. Digital e TDR
Est. Pluv. 02	Estação Pluviográfica	275.788,91 L	9.192.719,43 S	Pluv. Digital e TDR
Est. Pluv. 03	Estação Pluviográfica	275.608,07 L	9.190.997,32 S	Pluv. Digital e TDR
Est. Pluv. 04	Estação Pluviográfica	276.824,75 L	9.191.848,39 S	Pluv. Digital, TDR e Sonda de nível

As informações são coletadas e armazenadas em *dataloggers*, em que são registradas as informações das precipitações instantâneas e acumuladas a cada 6 horas, registros horários da constante dielétrica, além do dia juliano, hora, minuto e voltagem da bateria.

Os arquivos no formato .dat são coletados mensalmente por meio do *software* PC200W da *Campbell Scientific, Inc.* e, em seguida, analisados por meio de uma planilha desenvolvida no Microsoft Excel, programada com sub-rotinas na linguagem *Visual Basic for Applications*, a fim de facilitar a supervisão visual das informações que estão sujeitas a falhas nas sondas e dispositivos da estação.

4.1.1 Monitoramento da precipitação

Os registros de precipitação são captados com o mecanismo do tipo *tipping bucket* do pluviógrafo digital, modelo TB4-L da *Campbell Scientific, Inc.*, cuja báscula possui uma precisão de 0,254 mm de chuva precipitada, valor relativo a uma 0,01 polegada no sistema de medidas americano.

De posse dos dados de pluviometria das quatro estações, foram realizadas verificações em cada posto, em que procurasse identificar possíveis falhas nas medições. Nas visitas de campo sempre é adotado uma rotina prévia para detecção de possíveis problemas na medição: verificação se o funil do pluviógrafo está desobstruído; e se durante a madrugada a voltagem da bateria de 12V estava em perfeitas condições, uma vez que voltagem próximo a 11V pode provocar a interrupção da coleta dos dados, dentre outros. Quanto ao *datalogger*, deve-se observar a necessidade de troca da bateria interna para evitar a interrupção da coleta dos dados. Também deve-se realizar análise comparativa entre as estações pluviográficas.

Segundo Barbosa (2015), o comportamento da precipitação em todos os postos da bacia experimental do Guaraíra é bastante semelhante, ou seja, a precipitação ocorre de forma regular em toda a bacia hidrográfica, com qualquer dos postos sendo representativo da pluviometria local. Portanto, será realizada uma análise dos dados de precipitação, para assim proceder com a escolha da estação mais representativa para a precipitação ano a ano.

4.1.2 Monitoramento da umidade do solo

As sondas TDR modelo CS-615, dotadas de uma base em epóxi de 5 cm e duas hastes metálicas de comprimento de 30 centímetros, estão instaladas verticalmente de modo a representar a umidade na camada superficial do solo de 30 cm.

O monitoramento da umidade volumétrica é realizado indiretamente, pois as sondas TDR, através das hastes metálicas, emitem pulsos eletromagnéticos de hora em hora, que

realizam medições da constante dielétrica do solo. É necessário realizar a calibração das sondas para que se obtenha a umidade volumétrica do solo.

A calibração das sondas TDR foram realizadas por Lira (2015), de modo que foram coletadas amostras indeformadas do solo em cada estação de monitoramento e em diferentes épocas e, em seguida, foram realizados ensaios para determinação da umidade pelo método gravimétrico. Por fim, para cada estação de monitoramento foi determinado um conjunto de pontos (constante dielétrica do solo e umidade volumétrica do solo), que foram plotados em gráficos, a fim de determinar a melhor equação de ajuste destes pontos. Na Tabela 3 são apresentadas as equações encontradas para cada estação.

Tabela 3 - Equações de calibrações das sondas TDR's obtidas através dos estudos realizados por Lira (2015)

	Equação	R ²
Est. Pluv. 01	$u = 0,0017d^2 - 0,0279d$	0,84
Est. Pluv. 02	$u = 0,0009d^2 - 0,0136d$	0,60
Est. Pluv. 03	$u = 0,0007d^2 - 0,0121d + 0,0466$	0,97
Est. Pluv. 04	$u = 0,002d^2 - 0,0675d + 0,5898$	0,96

Onde, u é a umidade volumétrica do solo e d é a constante dielétrica do solo.

De posse dos dados de umidade do solo das quatro estações, foi realizada uma verificação em cada posto, de 2004 até 2015, para determinar os períodos de estudo de cada estação de monitoramento.

4.2 Definição dos eventos chuvosos

Após a coleta dos dados de precipitação e com o auxílio de uma planilha desenvolvida na plataforma Microsoft Excel, programada com sub-rotinas na linguagem *Visual Basic for Applications*, os eventos de precipitação foram definidos para qualquer valor do critério de *Minimum Interevent Time*, MIT.

Lozano-Parra et al. (2015a) usaram o MIT de 6 horas e excluiu os eventos com variações de umidade do solo inferiores a 0,002 m³/m³, pois, segundo os autores, o aumento da umidade do solo pode ser provocado tanto pela precipitação como pelo ruído do instrumento, e por tal incerteza estes eventos devem ser desconsiderados.

Portanto, foi chamado de evento chuvoso, o evento definido em função do tempo através dos diversos MIT's – 1 hora, 2 horas, 3 horas, 6 horas, 8 horas, 12 horas e 24 horas – e, ainda, que apresente variação de umidade do solo superior a $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Logo, para cada estação pluviográfica, será criado um conjunto de eventos chuvosos distintos a partir de cada MIT utilizado.

4.3 Determinação e cálculo das variáveis para o modelo

Após a separação dos eventos chuvosos, são determinadas e calculadas as variáveis descritas na Tabela 4 para cada evento chuvoso, como é observado na Figura 6.

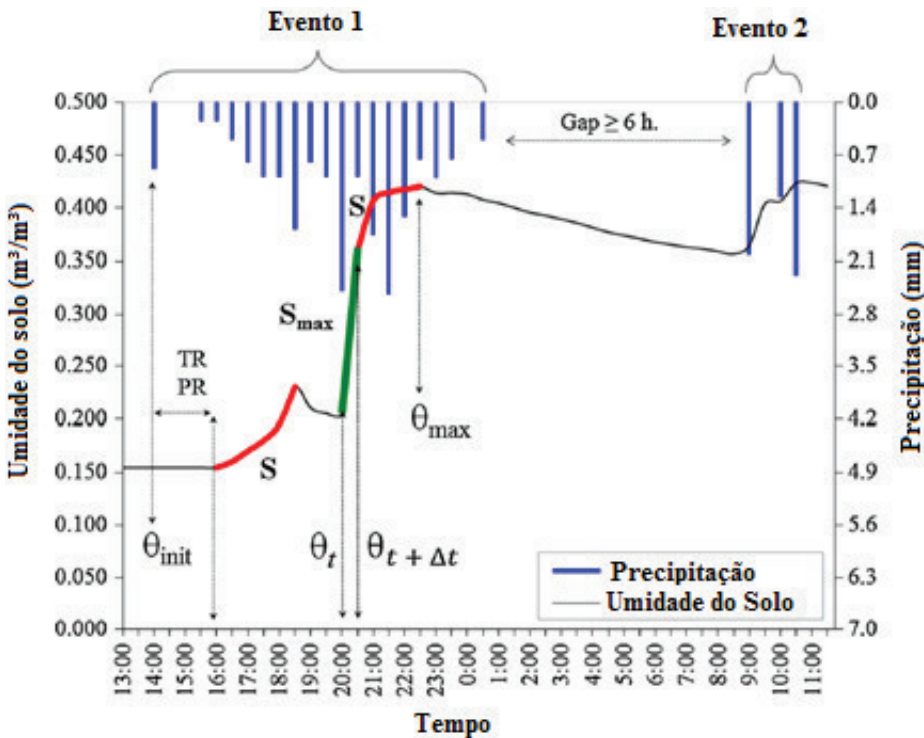


Figura 6 – Metodologia utilizada para detectar a inclinação máxima de umedecimento do solo, $S_{m\acute{a}x}$, que está destacada pela linha verde. O tempo e precipitação necessário para a reação do sensor, TR e PR, respectivamente.

Fonte: Lozano-Parra et. al (2015a).

Tabela 4 – Variáveis independentes utilizadas na análise estatística com o *Multivariate Adaptive Regression Splines* – MARS.

Variáveis	Descrição	Unidade
$S_{m\acute{a}x}$	Declividade máxima da umidade do solo num tempo mínimo de 1 hora	$\text{m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$
D	Duração Total do evento chuvoso	Hora
Prec.	Precipitação Total do evento chuvoso	mm
Max30	Precipitação acumulada máxima em 30 min durante o evento chuvoso	mm
TLE, TPE	Tempo decorrido desde o último e penúltimo evento de chuva, respectivamente	Hora

Variáveis	Descrição	Unidade
AP48 AP5	Precipitação antecedente ao início do evento chuvoso nas últimas 48 horas e 5 dias, respectivamente	mm
TR	Tempo necessário para iniciar a reação da sonda TDR	Hora
PR	Precipitação necessária para iniciar a reação da sonda TDR	mm
θ_{init}	Umidade do solo inicial antes do início do evento	m ³ /m ³
θ_{max}	Umidade do solo máximo atingido no evento	m ³ /m ³
Veg	Vegetação	-

Fonte: Lozano-Parra et al. (2015a)

Foi utilizado para detectar o tipo de variação da umidade do solo ocorrido devido ao evento chuvoso, o método da inclinação máxima de umedecimento, $S_{m\acute{a}x}$. Esta variável é calculada como o aumento máximo da umidade do solo observado pelo sensor a partir de um dado intervalo de tempo mínimo durante o evento chuvoso. Portanto, para este estudo foi determinado o tempo mínimo de 1 hora, pois a constante dielétrica do solo é observada neste espaço de tempo. A inclinação da curva é calculada pela Equação 1:

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{\max(\theta_{t+\Delta t} - \theta_t)}{\Delta t} 10^4 \quad \text{Equação 1}$$

onde, $S_{m\acute{a}x}$ é a inclinação máxima da umidade do solo em um determinado passo de tempo, θ_t é o valor da umidade do solo no tempo t ; e Δt é o intervalo de medição, que será sempre 60 min.

A variável TLE, observando a Figura 6, é o tempo decorrido entre o término do evento 1 até o início do evento 2. Já TPE seria o tempo decorrido entre o início do evento 2 até o término do evento anterior ao evento 1.

Quanto à vegetação, como já citado anteriormente, Lira (2015) caracterizou cada estação pluviográfica em seu estudo, a saber: 01, predominância da Mata Atlântica; 02 e 03, existência de poucas árvores; 04 quase sem vegetação. Estas características serão utilizadas como variáveis categóricas neste estudo.

4.4 *Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS*

A técnica *Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)*, aplicada por Lozano-Parra et al. (2015a), foi utilizada para produzir dois modelos, um para escoamentos lentos e outro para escoamentos rápidos.

Esta técnica é, normalmente, utilizada para resolver problemas multivariados complexos a partir de uma abordagem não paramétrica. Neste método, um conjunto de

funções básicas, que são definidas por partes e determinadas a partir da regressão, é utilizada para prever a resposta da variável alvo. Estas funções básicas começam e terminam em pontos de inflexão conhecidos como nós e representam regiões de regressão onde a relação entre a variável-alvo e uma ou mais variáveis independentes são montados. A equação geral do modelo MARS pode ser expressa como se segue:

$$y = f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m h_m(x) \quad \text{Equação 2}$$

onde, y é o valor previsto pela função $f(x)$, que é composta por uma constante inicial β_0 e a soma de M termos, cada uma delas incluindo uma função básica $h_m(x)$ ponderados com um coeficiente β_m .

O processamento do algoritmo pode ser resumido como se segue:

- (1) MARS aproxima a resposta com o parâmetro constante ($y = \beta_0$).
- (2) Inicia-se a exploração de algumas variáveis-nós que produzem o melhor ajuste do modelo, em seguida, ele é adicionado.
- (3) MARS repete o passo 2 até todas as funções básicas sejam incluídas no modelo obtendo um modelo ajustado.
- (4) Em seguida, o MARS identifica e remove as funções básicas menos importantes.
- (5) O passo anterior é repetido até todas as funções básicas sejam suprimidas.

Um exemplo de equação obtida pela técnica MARS é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} & \text{Smáx} \\ & = 1,98 - 0,49 \times \text{BF1} - 5,22 \times \text{BF2} \times \text{BF3} \\ & + 0,84 \times \text{BF4} \times \text{BF5} - 0,01 \times \text{BF6} - 0,005 \times \text{BF7} \times \text{BF8} \\ & + 0,01 \times \text{BF9} \times \text{BF10} \end{aligned} \quad \text{Equação 3}$$

onde, $\beta_0 = 1,98$; $\text{BF1} = \max(0; 6,86 - \text{Max30})$; $\text{BF2} = \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,24)$; $\text{BF3} = \max(0; \text{Max30} - 6,86)$; $\text{BF4} = \max(0; 0,24 - \theta_{\text{init}})$; $\text{BF5} = \max(0; \text{Max30} - 6,86)$; $\text{BF6} = \max(0; 50,29 - \text{AP5})$; $\text{BF7} = \max(0; 50,29 - \text{AP5})$; $\text{BF8} = \max(0; \text{PR} - 6,60)$; $\text{BF9} = \max(0; 5,08 - \text{Max30})$; $\text{BF10} = \max(0; 50,29 - \text{AP5})$.

Nesta equação, há sete termos e 10 funções básicas, cuja função básica 3 (BF3) apresenta valor igual a 0 quando a precipitação máxima acumulada em 30 minutos for menor

do que 6,86 e será igual a precipitação máxima em 30 minutos menos 6,86 quando a precipitação máxima em 30 minutos for maior do que 6,86. Neste caso, o valor de precipitação representa um nó. Também pode-se observar os graus de interação, por exemplo a função básica 1 possui grau de interação 1, por outro lado a função básica 2 e 3 se relacionam, criando um grau de interação igual a 2. No *software* pode-se escolher o número máximo de interações que será aceitável para o estudo.

Para cada interação feita, é calculado um parâmetro chamado *generalized cross validation* (GCV) para todos os modelos obtidos no passo 4. O modelo ótimo será aquele que possuir o menor valor de GCV. A equação GCV é escrita como se segue:

$$GCV(M) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f_M(x_i))^2}{\left(1 - \frac{C(M)}{N}\right)^2} \quad \text{Equação 4}$$

onde, y é a variável dependente, $f_M(x_i)$ é o valor obtido pelo modelo, M é o número de termos, N é o número de casos ou pontos usados no MARS e $C(M)$ é uma função custo para um modelo com M termos.

O GCV é uma medida de melhor ajuste da função que não considera só o erro residual, mas também a complexidade do modelo.

A computação do modelo, incluindo os procedimentos de calibração e validação, foi realizada com o MARS implementado no *software* STATISTICA 8, que utiliza o algoritmo clássico popularizado por Friedman (1991).

4.4.1 Determinação dos valores para escoamento rápido e lento

A inclinação máxima da umidade do solo ($S_{m\acute{a}x}$) é utilizada como variável dependente, e a técnica MARS foi executada no estudo de Lozano-Parra et al. (2015a), separadamente para inclinações menores que $6 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{30 \text{ min}}$, que representam os escoamentos lentos, e maiores que $12 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{30 \text{ min}}$, que representam os escoamentos rápidos, para o MIT de 6h.

A seleção desses valores é baseada em observações da distribuição de frequência das inclinações e após examinar o aumento da umidade do solo. No entanto, realizar a escolha desses valores, dessa maneira, envolve certo grau de subjetividade, e deve ser verificada a influência deste valores de $S_{m\acute{a}x}$ variando os valores pré-determinados e comparando os resultados.

Portanto, foram agrupado todos os eventos chuvosos a partir da utilização do MIT de 6 horas para todas as estações pluviográficas, e adotados os valores de inclinação iguais a $2 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$, $4 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$ e $6 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$ para os escoamentos lentos e $4 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$, $8 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$ e $12 \frac{m^3 m^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$ para os escoamentos rápidos. Em seguida, observando a distribuição de frequência, e, também, analisando os resultados obtidos pela técnica MARS (número de termos, número de funções básicas, coeficiente de determinação e GCV), foi possível selecionar os valores ideais para cada tipo de escoamento.

4.4.2 Calibração e validação dos modelos para escoamento lento e rápido através dos diferentes MIT

A calibração e a validação dos modelos foram realizadas para cada estação pluviográfica a partir dos conjuntos de eventos chuvosos obtidos para cada MIT adotado, observando a restrição da variação da umidade do solo e os valores de $S_{m\acute{a}x}$. E, também, foi realizada para a bacia experimental, no qual os eventos chuvosos serão representados pela agregação dos diversos eventos obtidos para cada estação.

Em seguida, 75% dos eventos chuvosos foram selecionados aleatoriamente e utilizados para realizar a calibração do modelo e os 25% restantes dos eventos foram utilizados para validação dos melhores resultados encontrados.

Inicialmente, será realizada a calibração do modelo aplicando MARS para todos os eventos chuvosos obtidos para cada MIT adotado de cada estação pluviográfica e para a bacia experimental. Para assim obter o MIT mais significativo para a calibração do modelo através da análise dos resultados encontrados: coeficientes de determinação, GCV, número de termos e funções básicas. A importância relativa de cada variável foi calculada a partir da divisão do número de vezes que determinada variável foi utilizada na equação resultante da técnica MARS pelo número total de funções básicas.

Para a realização da análise da qualidade dos resultados encontrados após a validação do modelo, foram traçados gráficos de dispersão logarítmicos e, em seguida, determinado os coeficientes de determinação, os erros sistemático (Bias), Equação 5, e as raízes quadrada do erro quadrático médio (RMSE), Equação 6.

$$Bias = \frac{V_{prev} - V_{obs}}{V_{prev}} \quad \text{Equação 5}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{obs} - V_{prev})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 6}$$

onde, V_{obs} é igual ao valor observado, V_{prev} é igual ao valor previsto e N é igual ao número de termos analisados.

4.5 Adequação do método para identificar os tipos de processos de umedecimento do solo

Esta análise foi realizada com o objetivo de provar que os sensores de umidade do solo podem, também, ser utilizados para classificar os processos de umedecimento do solo, seja ele lento (fluxo matricial dominante), seja ele rápido (fluxo preferencial dominante), causado na bacia hidrográfica por eventos chuvosos independentes. Para tanto, são plotados gráficos de dispersão realizando o comparativo entre o valor de $S_{m\acute{a}x}$ e a variação da umidade do solo ($\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init}$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados obtidos durante toda pesquisa. Inicialmente, foi delimitado o período do estudo para cada estação de monitoramento. Em seguida, foi realizada toda a preparação para a calibração do modelo – correção dos dados, cálculo de variáveis, definição dos eventos chuvosos, etc. Por fim, foi realizada a validação do modelo, e a apresentação de uma alternativa para análise dos processos de umedecimento do solo.

5.1 Monitoramento hidrológico

5.1.1 Monitoramento da precipitação

De posse dos dados de pluviometria das quatro estações, foi realizada uma verificação em cada posto para o período de 2004 até 2015, em que se procurou identificar possíveis falhas nas medições.

Após a realização destas análises, procedeu-se com a escolha da estação mais representativa para a precipitação ano a ano, que está apresentada na Tabela 5, e a precipitação anual ocorrida (Tabela 6).

Tabela 5 – Escolha da estação representativa por ano

Estação de monitoramento	Ano	Observação
1	2006 e 2007	
2	2011 e 2012*	* Dados parciais: dias julianos 158 a 210
3	2004, 2005 e 2012*	* Dados parciais: dias julianos 8 a 152; 245 a 366
4	2008 – 2010; 2013 - 2015	
5	2012*	* Dados parciais: dias julianos 220 a 241

Tabela 6 – Precipitação Anual

Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Prec.(mm)	2304	1383	1426	1661	1722	1903	1126	2514	1330	1859	1527	1310

5.1.2 Monitoramento da umidade do solo

A área de estudo é de pequenas dimensões, 5,84 km², e com uma distribuição espacial de chuvas bastante homogêneas. Porém, a dinâmica da umidade do solo, que foi registrada por sondas TDR modelo CS-615 e que estão instaladas verticalmente nos primeiros 30 cm de profundidade do solo natural, difere entre os pontos de monitoramento da bacia experimental. A Figura 7 apresenta a variação da umidade do solo ao longo do ano de 2015 para cada estação pluviográfica e a precipitação deste ano.

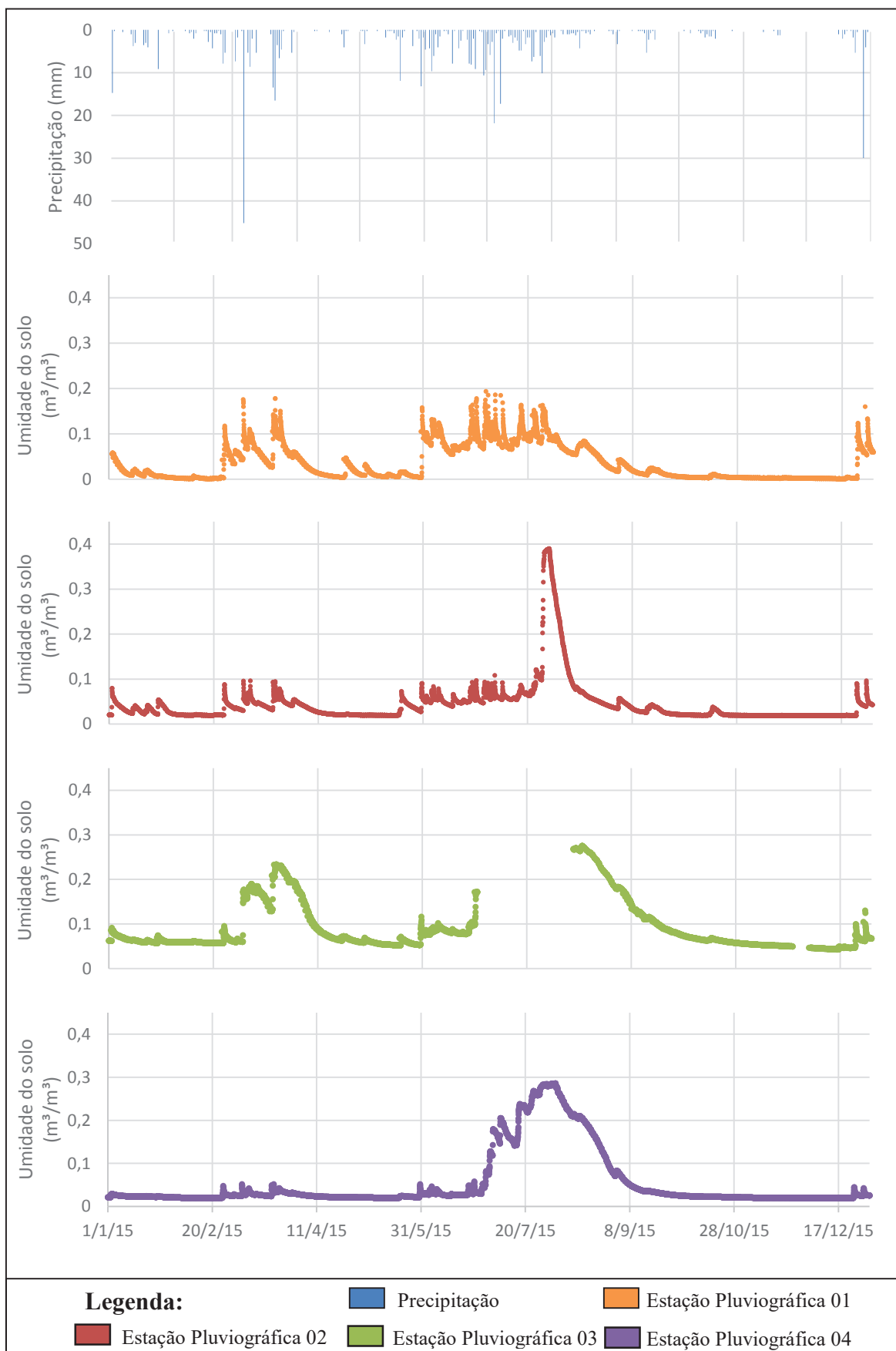


Figura 7 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2015 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

Observando a Figura 7, atesta-se um comportamento distinto da umidade do solo para cada estação monitorada, sendo a cobertura vegetal, a textura e a granulometria do solo, dentre outros, possíveis fatores que influenciam nesta dinâmica da umidade do solo.

Para o ano de 2015, o valor mínimo de umidade do solo observado foi para a estação 01 ($0,005 \text{ m}^3/\text{m}^3$), seguido das estações 02 ($0,018 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 04 ($0,020 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e 03 ($0,043 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Já o valor máximo encontrado foi observado na estação 02 ($0,39 \text{ m}^3/\text{m}^3$), seguido da estação 04 ($0,286 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 03 ($0,276 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e 01 ($0,194 \text{ m}^3/\text{m}^3$). As estações 01 e 02 apresentam respostas rápidas, pois atingem valores de picos rapidamente como também retornam para seu estado inicial rapidamente, diferentemente do que acontece nas estações 03 e 04, onde o processo de umedecimento e secagem do solo são mais demorados.

Observa-se através do *scattergram*, traçado na Figura 8, um grande conjunto de informações na parte inferior do gráfico representando todo o período seco de cada estação. Para a estação 2, o aumento de umidade do solo ocorre rapidamente durante o período chuvoso, assim, como seu retorno para a condição seca, observado tanto pela Figura 7, pelos picos de umidade, como pela Figura 8, pela segregação da informação para valores de umidade maiores do que $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Essa mesma segregação ocorre de forma mais discreta na estação 01. Já para as estações 03 e 04, a variação da umidade do solo é mais lenta tanto para o umedecimento, como para a secagem do solo. Isso é observado pela maior compactação das informações, principalmente para a estação 03.

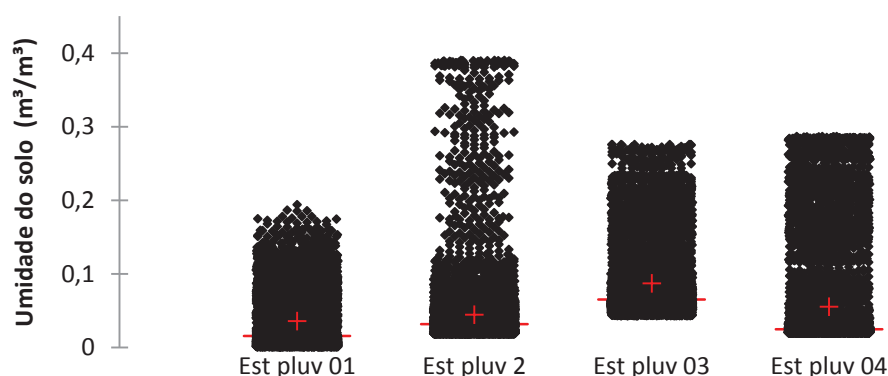


Figura 8 – *Scattergram* da umidade do solo das estações pluviográfica 01 a 04 no ano de 2015

Para o desenvolvimento deste estudo é necessário a existência de dados ininterruptos para a obtenção das variáveis hidrológicas; para isto, observou-se a continuidade da informação através da Figura 9 e também a quantidade de dados existentes para cada ano observado através da Tabela 7.

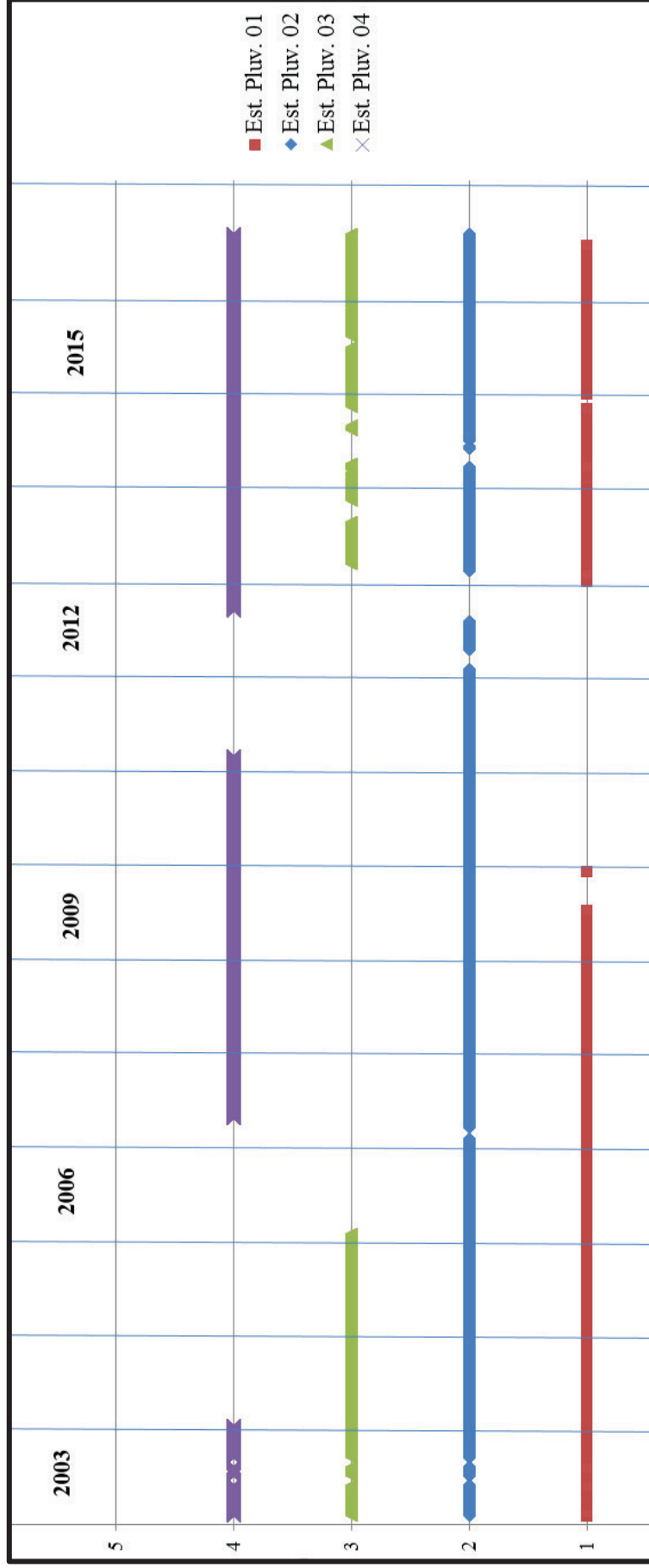


Figura 9 – Gráfico de continuidade dos dados coletados de umidade do solo para cada estação pluviográfica

Tabela 7 – Percentagem dos dados de umidade do solo no decorrer dos anos.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Est. Pluv. 01	58,60%	100,00%	100,00%	99,99%	100,00%	100,00%	51,48%	0,00%	0,00%	0,00%	80,88%	70,33%	99,60%
Est. Pluv. 02	68,05%	100,00%	100,00%	100,00%	86,85%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	33,48%	87,52%	72,43%	99,95%
Est. Pluv. 03	68,07%	100,00%	100,00%	7,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	57,13%	31,46%	81,00%
Est. Pluv. 04	68,07%	3,65%	0,00%	0,00%	68,96%	100,00%	100,00%	100,00%	14,94%	29,86%	96,19%	100,00%	99,94%

Adotou-se para a estação pluviográfica 01, os anos entre 2004 e 2008, e ainda, o ano de 2015. Observou-se que o ano de 2006 estava apenas com uma informação perdida, e esta informação foi preenchida através de uma média aritmética entre o dado seguinte e anterior. Já para o ano de 2015, as falhas iniciaram no primeiro dia do ano e acabaram no segundo dia ao meio dia, portanto, foi utilizado todo o restante deste ano para o estudo.

Para a estação pluviográfica 02, foram utilizados todos os anos completos entre 2004 e 2011, com exceção do ano de 2007 e ainda o ano de 2015. O ano de 2007 apresentou falhas no decorrer do ano, e isto prejudicaria o estudo, por outro lado, o ano de 2015 apresentou falhas, mas foram falhas pontuais, e estas foram corrigidas da mesma maneira que foi realizado para o ano 2006 na estação pluviográfica 01.

Para a estação pluviográfica 03, foram utilizados apenas os anos de 2004 e 2005, pois, pela Tabela 7, pode-se observar o grande número de falhas existentes.

Para a estação pluviográfica 04, foram utilizados os anos entre 2008 e 2015, com exceção dos anos de 2011 e 2012. Nos anos de 2010 e 2015, observaram-se falhas pontuais e foram corrigidas da mesma maneira do ano de 2006 da estação pluviográfica 01. Para o ano de 2013, as falhas foram maiores, mas foram concentradas todas no início do ano; portanto, foram utilizados os dados após as falhas.

A Figura 10 mostra a variação da umidade do solo para cada estação pluviográfica para os anos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, Tabela 8. A estação pluviográfica 01 apresentou os menores valores de umidade do solo, $0,0005 \text{ m}^3/\text{m}^3$, seguido da estação 02 ($0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 04 ($0,020 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e 03 ($0,032 \text{ m}^3/\text{m}^3$), e os maiores valores foram observados para a estação 02 ($0,393 \text{ m}^3/\text{m}^3$) seguidos das estações 04 ($0,332 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 03 ($0,302 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e 01 ($0,194 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Como já observando na Figura 8, a estação 03 possui uma melhor distribuição de valores ao longo dos anos estudados; por outro lado a estação 02 possui uma grande agregação de valores entre $0,022$ e $0,058 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ou seja, próximo ao seu estado seco, apresentando poucos dados para uma condição úmida do solo, e a grande amplitude observada é causada pela rápida variação da umidade tanto para secagem como umedecimento do solo.

Tabela 8 – Tabela resumo dos anos analisados para a aplicação da metodologia proposta

Estações	Est Pluv. 01	Est Pluv. 02	Est Pluv. 03	Est Pluv. 04
Anos	2004 – 2008 2015	2004 – 2006 2008 – 2011 2015	2004 – 2005	2008 – 2010 2013 – 2015

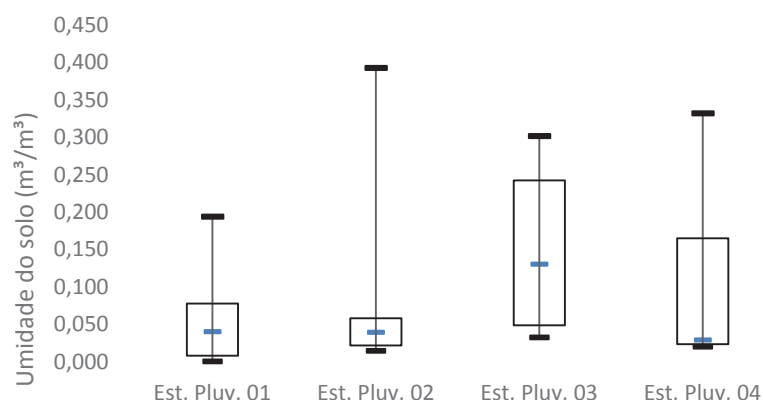


Figura 10 – Gráfico do tipo BoxPlot com os dados de umidade do solo utilizados para o estudo de cada estação pluviográfica

5.2 Definição dos eventos chuvosos

Foram contabilizados os eventos utilizados neste trabalho (Tabela 9) a partir das delimitações dos anos surgidos dos dados de precipitação e umidade do solo e, também, a partir das restrições adotadas para a delimitação dos eventos: o tempo, através do critério MIT; e a variação da umidade do solo maior do que $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Tabela 9 – Número de eventos chuvosos calculados para cada MIT estudado e seguindo a restrição da variação da umidade do solo maior do que $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$

MIT	Est Pluv. 01	Est Pluv. 02	Est Pluv. 03	Est Pluv. 04
1h	540	630	143	455
2h	485	587	126	404
3h	422	535	112	373
6h	359	453	97	323
8h	331	421	89	310
12h	286	379	83	273
24h	200	282	68	202

O aumento do MIT provoca uma clara diminuição no número de eventos chuvosos, e isto ocorre devido à junção de diversos eventos chuvosos em um único evento chuvoso. Aumentando o MIT de 1 hora para 24 horas, ocorreu uma diminuição em 39% dos eventos chuvosos registrados para a estação pluviográfica 01, 45% para a estação 02, 47% para a estação 03 e 46% para a estação 04.

Ao analisar os eventos chuvosos, foram observados em alguns desses eventos, erros de informação referente aos dados de umidade do solo à meia noite. Esses erros consistiam em picos de alta ou baixa de valores de umidade do solo, como podem ser vistos nas Figura 11 e Figura 12. Para corrigir estes erros, optou-se por adotar, como valor de umidade do solo à meia noite, a média aritmética entre o valor antecedente e o valor posterior a este valor.

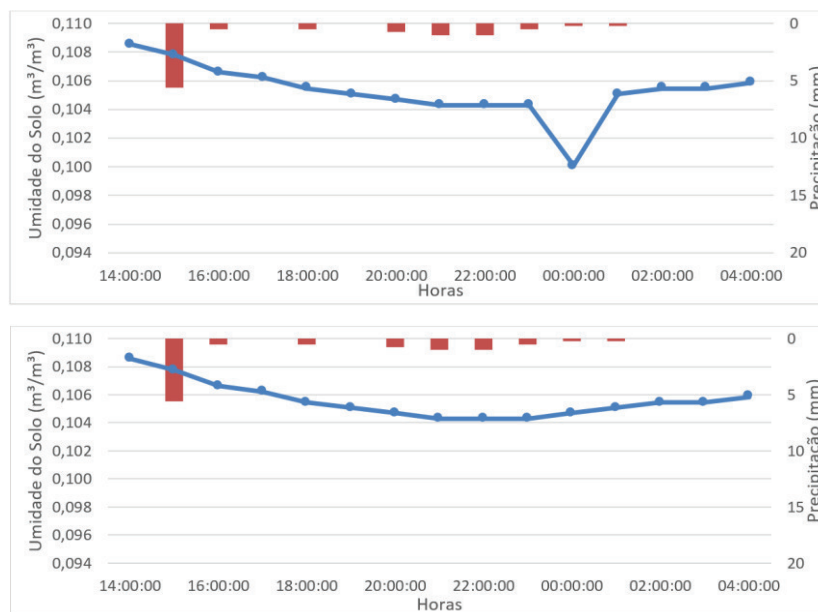


Figura 11 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso da estação pluviográfica 01 entre 19/06/2004 e 20/06/2004, com e sem presença de erros de medição.

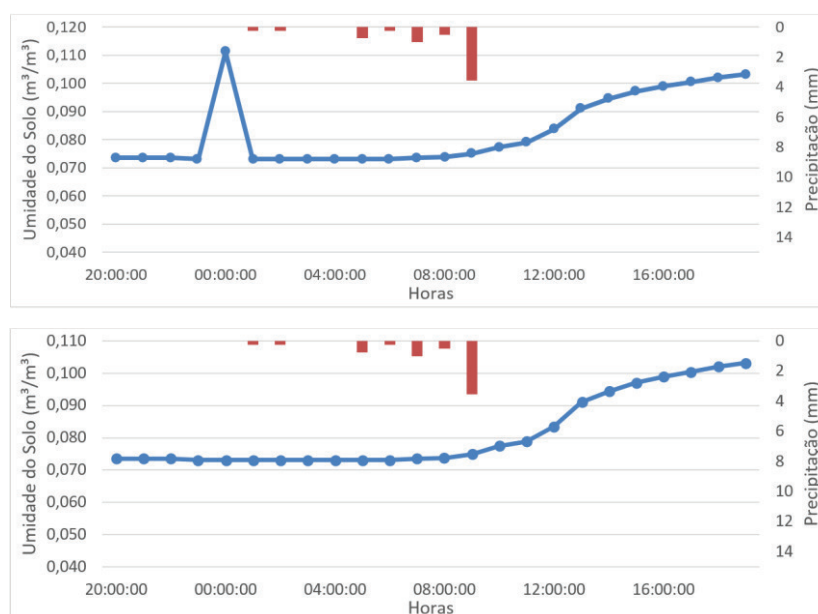


Figura 12 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso da estação pluviográfica 01 entre 10/07/2006 e 11/07/2006, com e sem presença de erros de medição.

Observando a Figura 11, constatou-se que o mesmo foi considerado como um evento chuvoso para este estudo, mas, após correção, não foi mais considerado, pois a variação da umidade do solo se tornou menor do que $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Já a Figura 12, continuou sendo considerado evento chuvoso, pois, após sua correção, a umidade do solo ainda possuía variação maior do que o limite previsto. Portanto, estas correções tornam-se necessárias para evitar o cálculo do valor de $S_{m\acute{a}x}$ erroneamente.

5.3 Determinação e cálculo das variáveis para o modelo

Os cálculos das variáveis foram realizados como expostos pela metodologia, em seguida, prosseguiu com a análise dos resultados obtidos.

O aumento do critério do MIT, como visto anteriormente na Tabela 9, reduz consideravelmente a número de eventos chuvosos. Estes novos eventos provocam alterações nos valores das variáveis calculadas, por isso a aplicação do modelo trouxe resultados diferentes para cada MIT analisado. Inicialmente, a variável dependente, $S_{m\acute{a}x}$, foi analisada para todos os eventos chuvosos considerados na bacia experimental através da Figura 13.

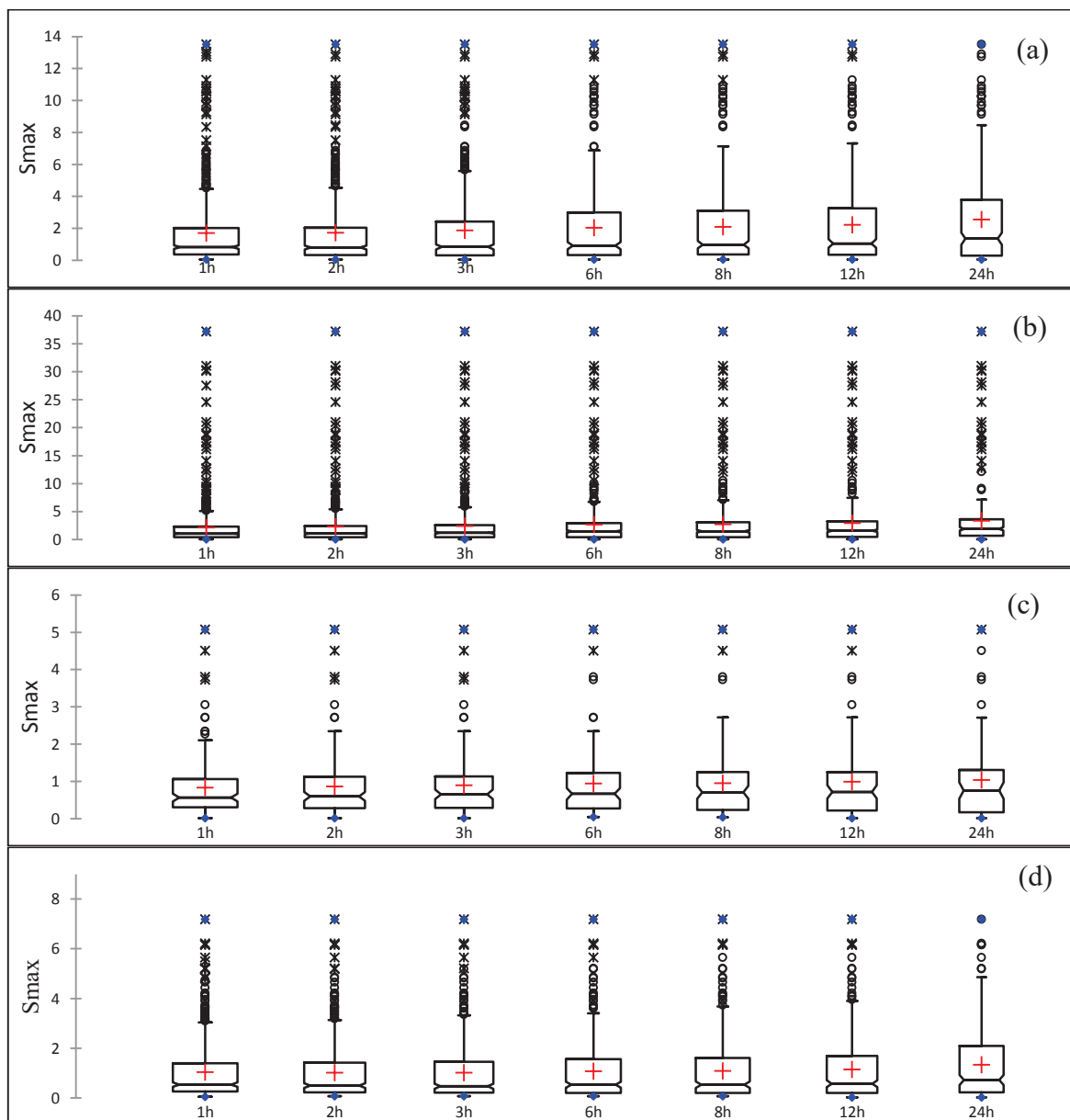


Figura 13 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável $S_{m\acute{a}x}$ para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

A estação pluviográfica 02 apresentou os maiores valores para a variável em destaque, seguido das estações 01, 04 e 03. Percebe-se que o valor máximo observado para cada estação não se altera, pois, apesar do aumento do MIT ocasionar a agregação de eventos, o valor abordado por este novo evento sempre será a maior inclinação observada em 60 minutos. Consequentemente, foi provocado o aumento dos valores da média e mediana com a variação do MIT.

A Figura 14 apresenta a variação da variável independente, θ_{init} , ao decorrer dos diversos MIT's analisados para cada estação pluviográfica monitorada.

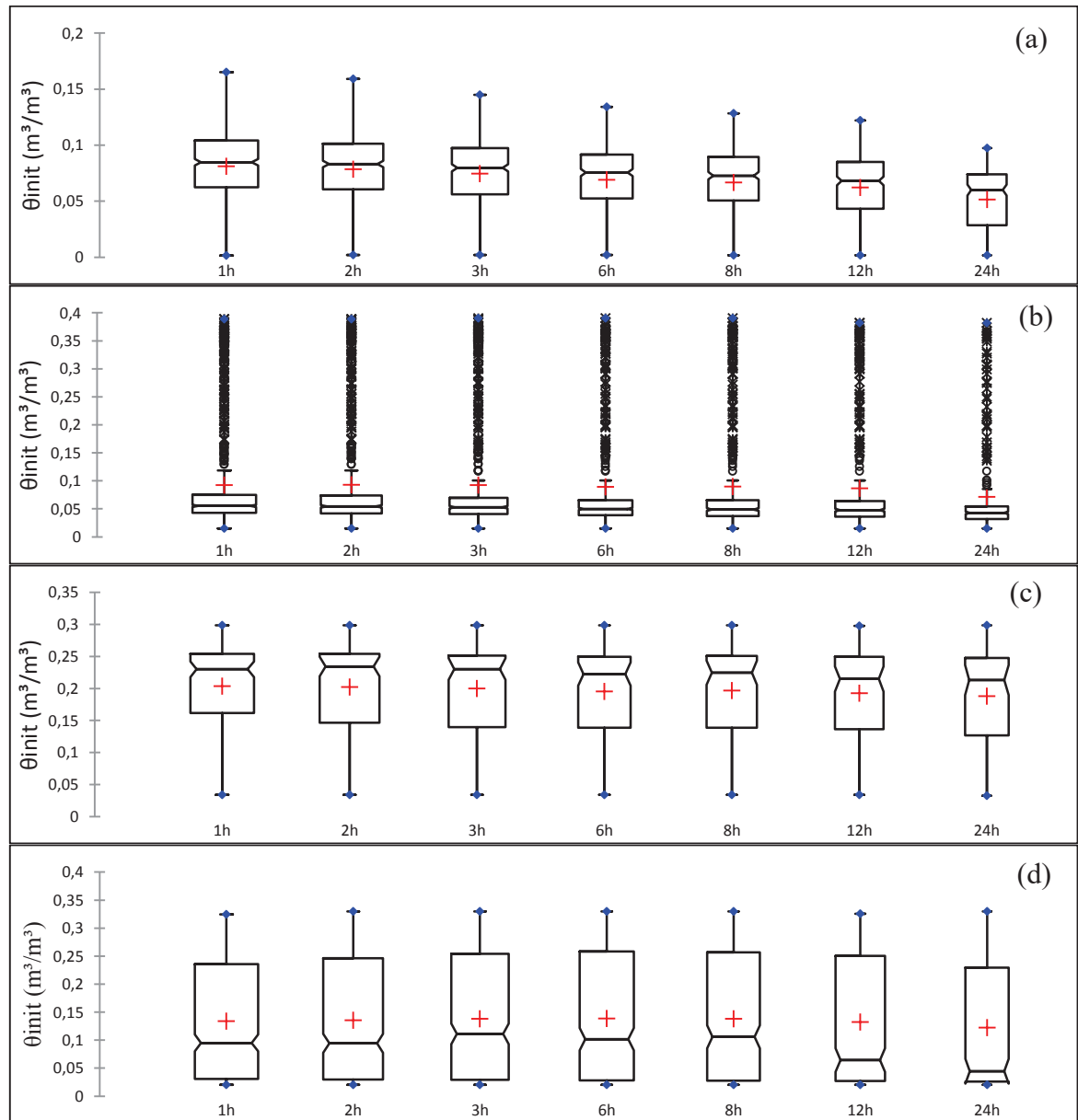


Figura 14 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável θ_{init} para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

Diferentemente do que ocorre para a variável dependente, a umidade inicial do solo tende a diminuir com o aumento do MIT adotado para o estudo, pois o aumento do valor do MIT provoca maiores períodos para secagem do solo. É mais perceptível esta diminuição para a estação pluviográfica 01, já para a estação pluviográfica 02 observa-se maior estreitamento do 1º e 3º quartil juntamente com a mediana, e para as estações 03 e 04 os valores de máximo e mínimo quase não se alteram, mas há um decréscimo do valor da mediana. Em seguida, observa-se a Figura 15 que apresenta a variação da variável independente, Duração do evento, de cada estação pluviográfica monitorada.

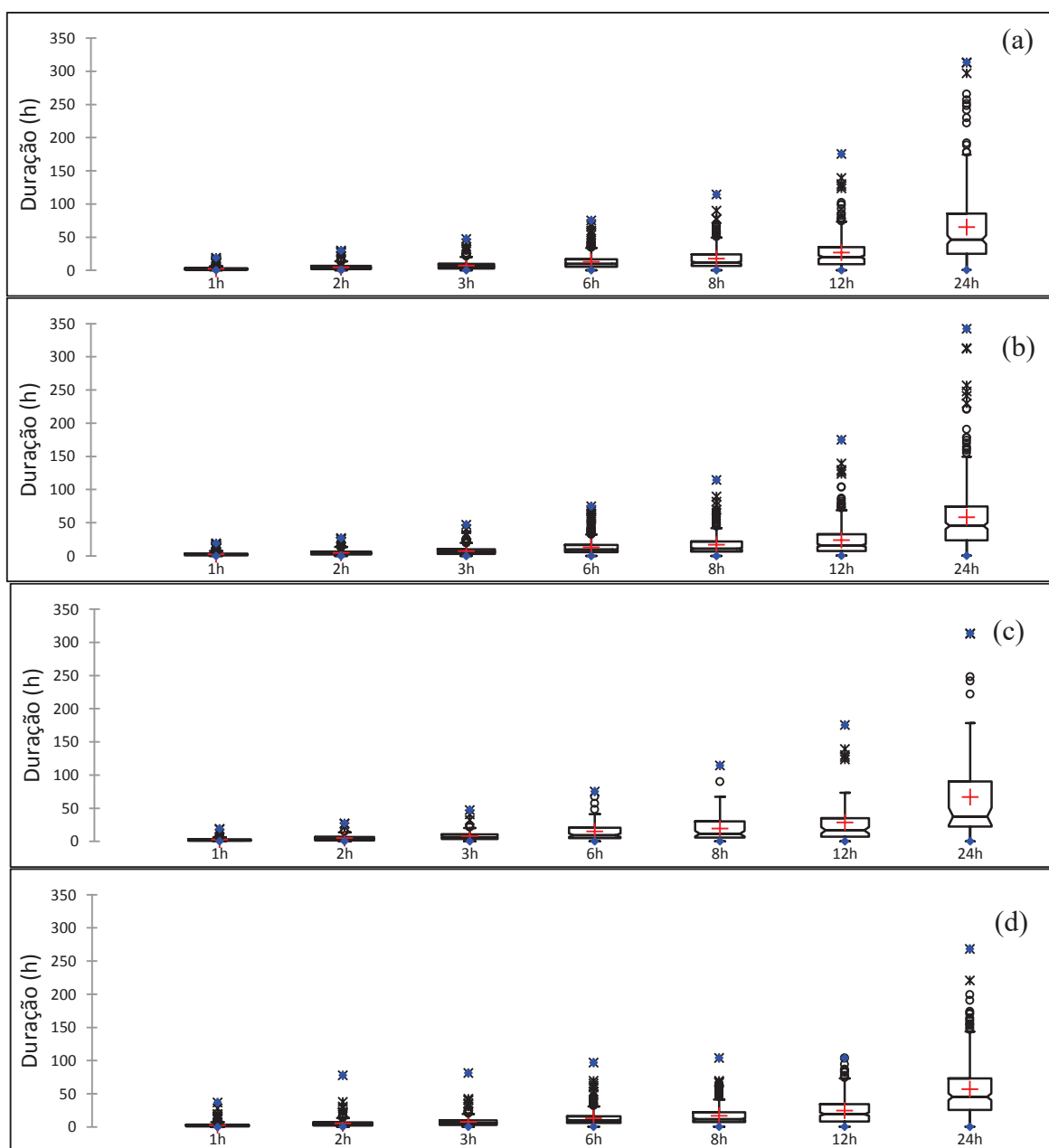


Figura 15 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável Duração para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

O aumento do valor do MIT provoca um aumento dos valores de duração, pois a agregação dos eventos irá provocar tal aumento, e isto é comprovado no gráfico pelo o aumento contínuo do valor máximo observado para cada estação. O valor máximo atingido foi aproximadamente 350 horas de duração de um evento chuvoso para a estação pluviográfica 02, seguido das estações 01, 03 e 04.

A variação da variável independente, precipitação acumulada, para cada estação pluviográfica monitorada pode ser observada através da Figura 16. Esta variável possui grande relação com a duração dos eventos chuvosos.

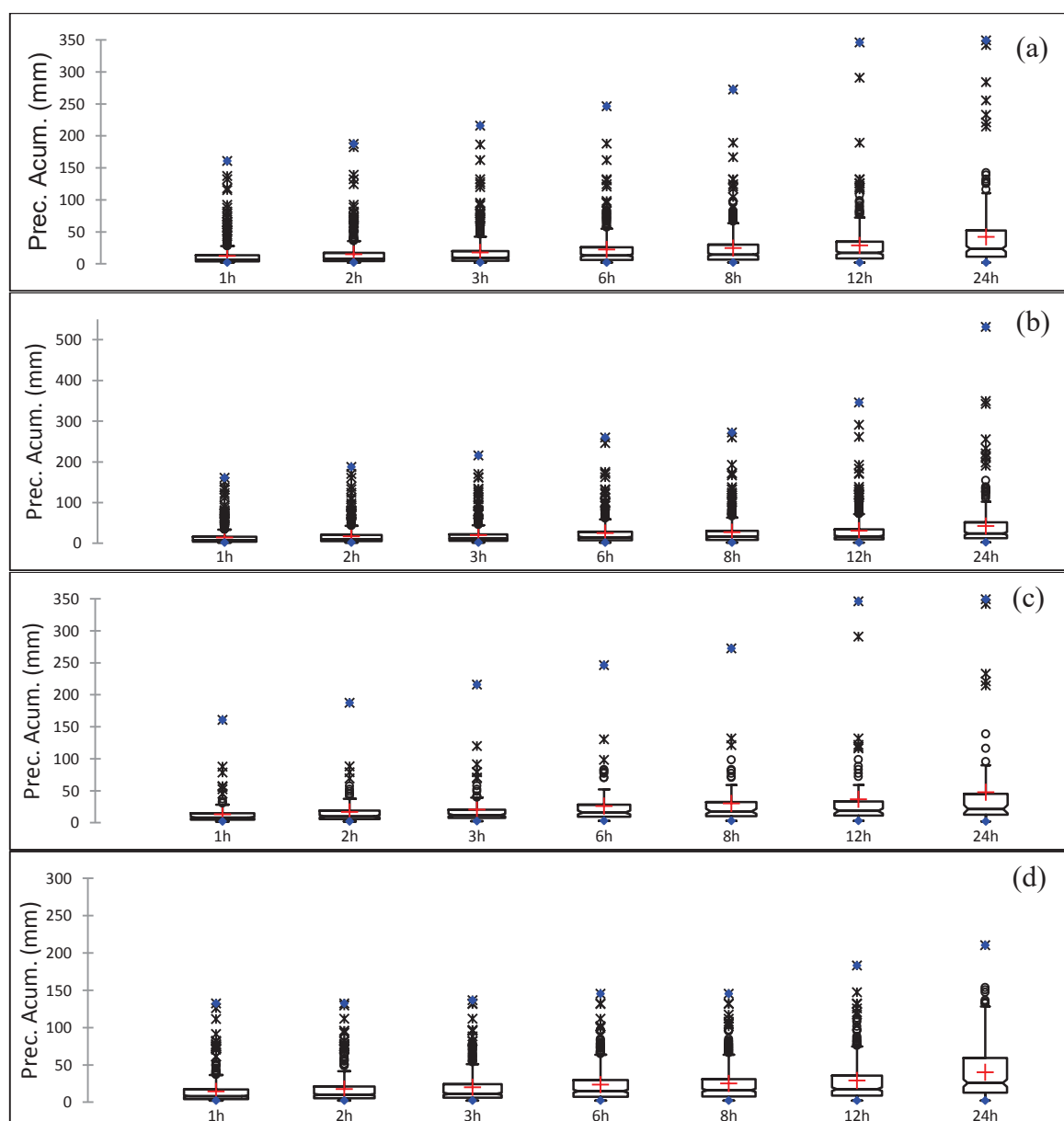


Figura 16 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável Precipitação Acumulada para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

A agregação de eventos chuvosos provocados pelo o aumento do MIT provoca o aumento da duração dos eventos, e, assim, traz como consequência, o aumento da precipitação acumulada devido à soma das precipitações ocorridas em cada evento agregado. A maior precipitação agregada ocorreu no período observado para a estação pluviográfica 02 com um valor próximo aos 530 mm, seguido das estações 1 (349 mm), 3 (349 mm) e 4 (210 mm).

A dinâmica da variável independente, precipitação máxima em 30 minutos, de cada estação pluviográfica monitorada é exposta na Figura 17.

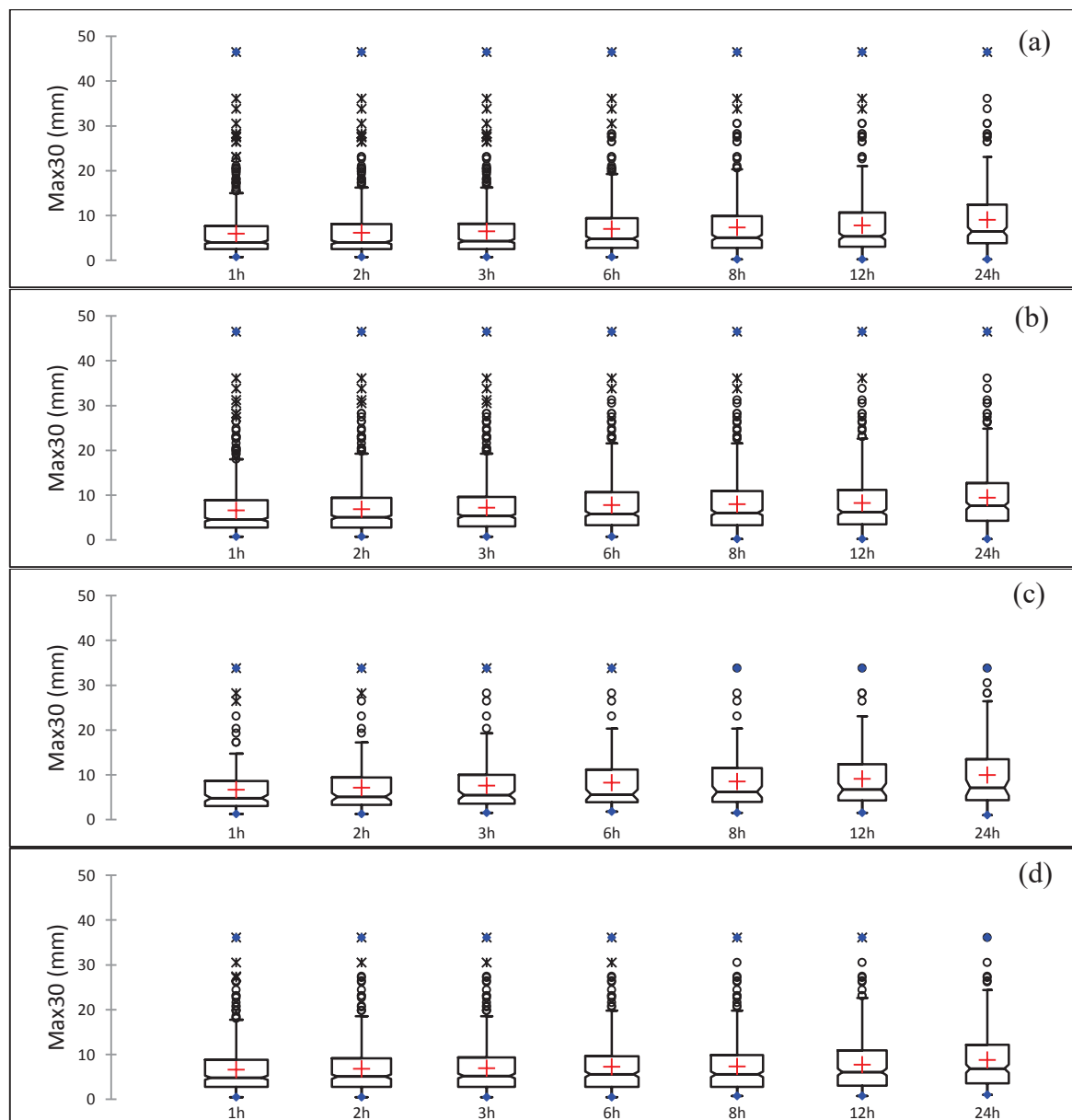


Figura 17 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Máxima em 30 minutos, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

Observa-se que o aumento do MIT não provoca alterações nos valores máximos, porém, a agregação dos eventos irá ocasionar a eliminação dos valores menores, trazendo como consequência o aumento da média e da mediana. Portanto, esta variável tem um comportamento semelhante à variável dependente deste estudo. Os valores máximos encontrados foram para as estações 01 e 02 com um valor próximo a 46 mm, seguido das estações 04 (36 mm) e 03 (34 mm).

As variações das variáveis independente, Precipitação antecedente em 48 horas e 5 dias, de cada estação pluviográfica monitorada são expostas nas Figura 18 e Figura 19.

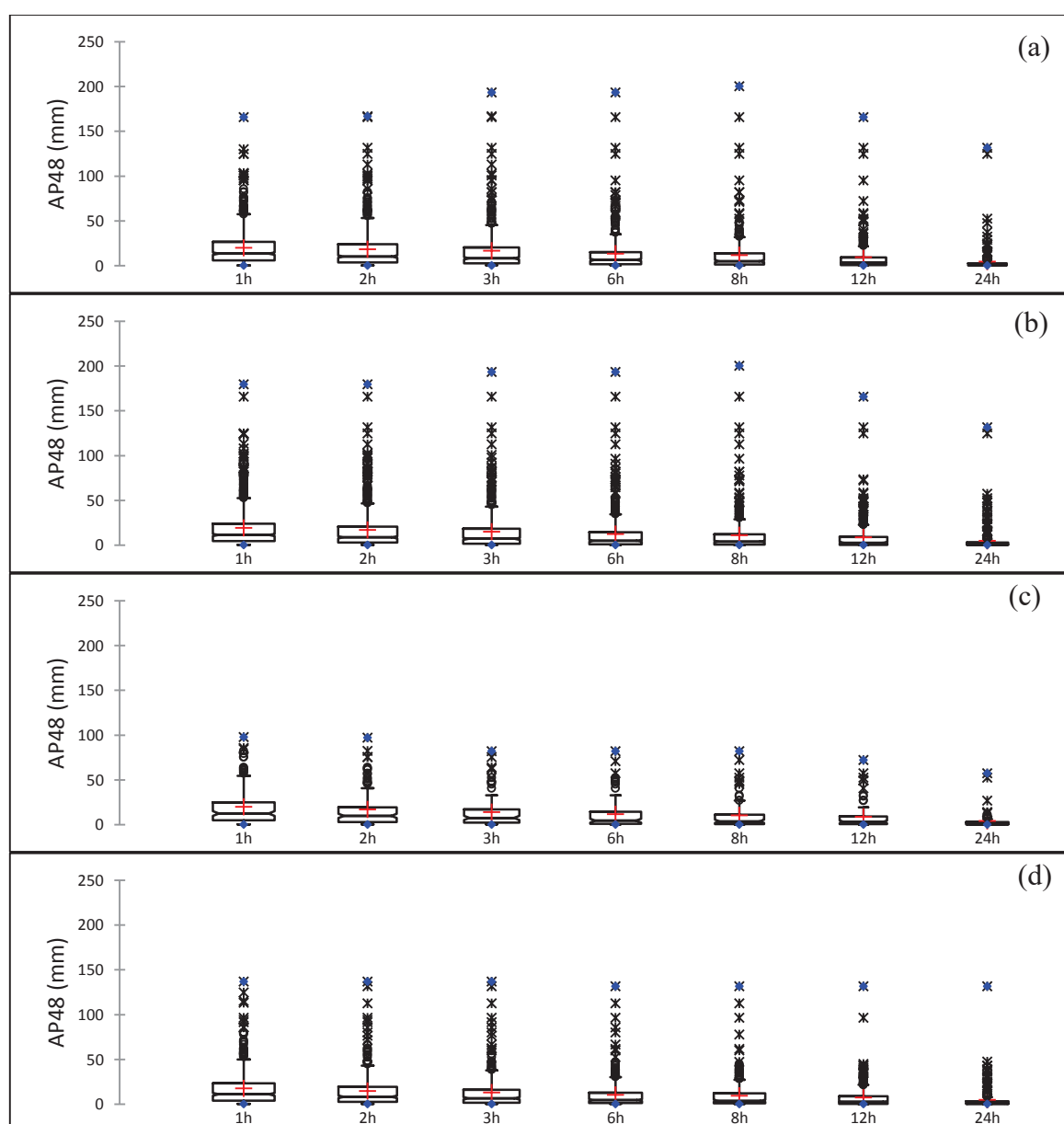


Figura 18 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Antecedente em 48 horas, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

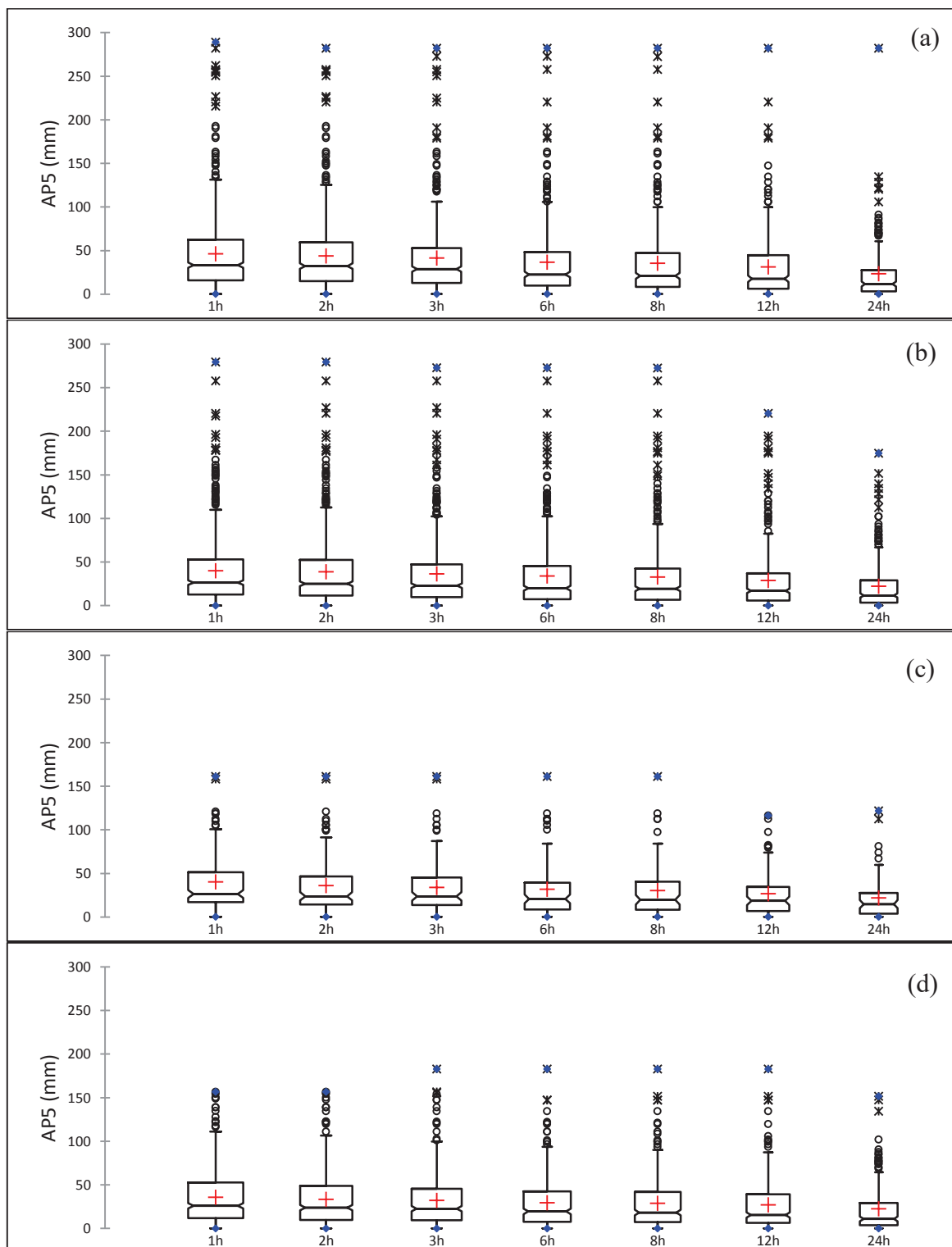


Figura 19 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, Precipitação Antecedente em 5 dias, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

Observou-se que para a precipitação antecedente em 48 horas e 5 dias tendem a decrescer com o aumento do MIT, pois, para um maior intervalo de tempo entre eventos, como por exemplo para o MIT de 24 horas, tem-se a certeza que as primeiras 24 horas

analisadas não há precipitação. Diferentemente do que ocorre para os menores valores, onde existe a possibilidade maior de ocorrências de chuvas e, assim um maior acúmulo. Este decréscimo pode ser observado pela diminuição da mediana e da média, assim como o valor máximo observado.

A dinâmica das variáveis independente, Tempo decorrido desde o último (TLE) e penúltimo (TPE) evento de chuva, de cada estação pluviográfica monitorada pode ser observada através da Figura 20 e Figura 21.

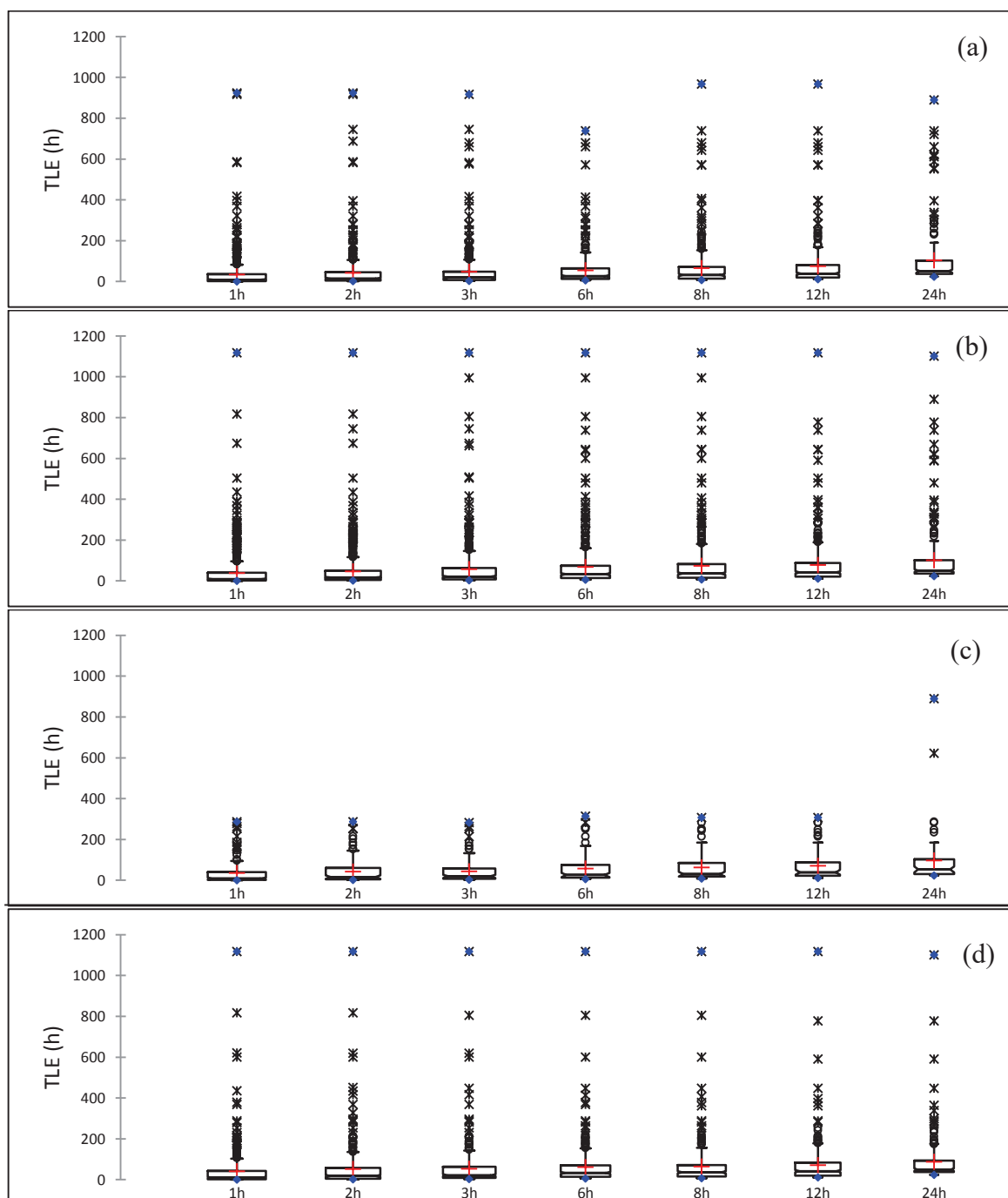


Figura 20 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TLE, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

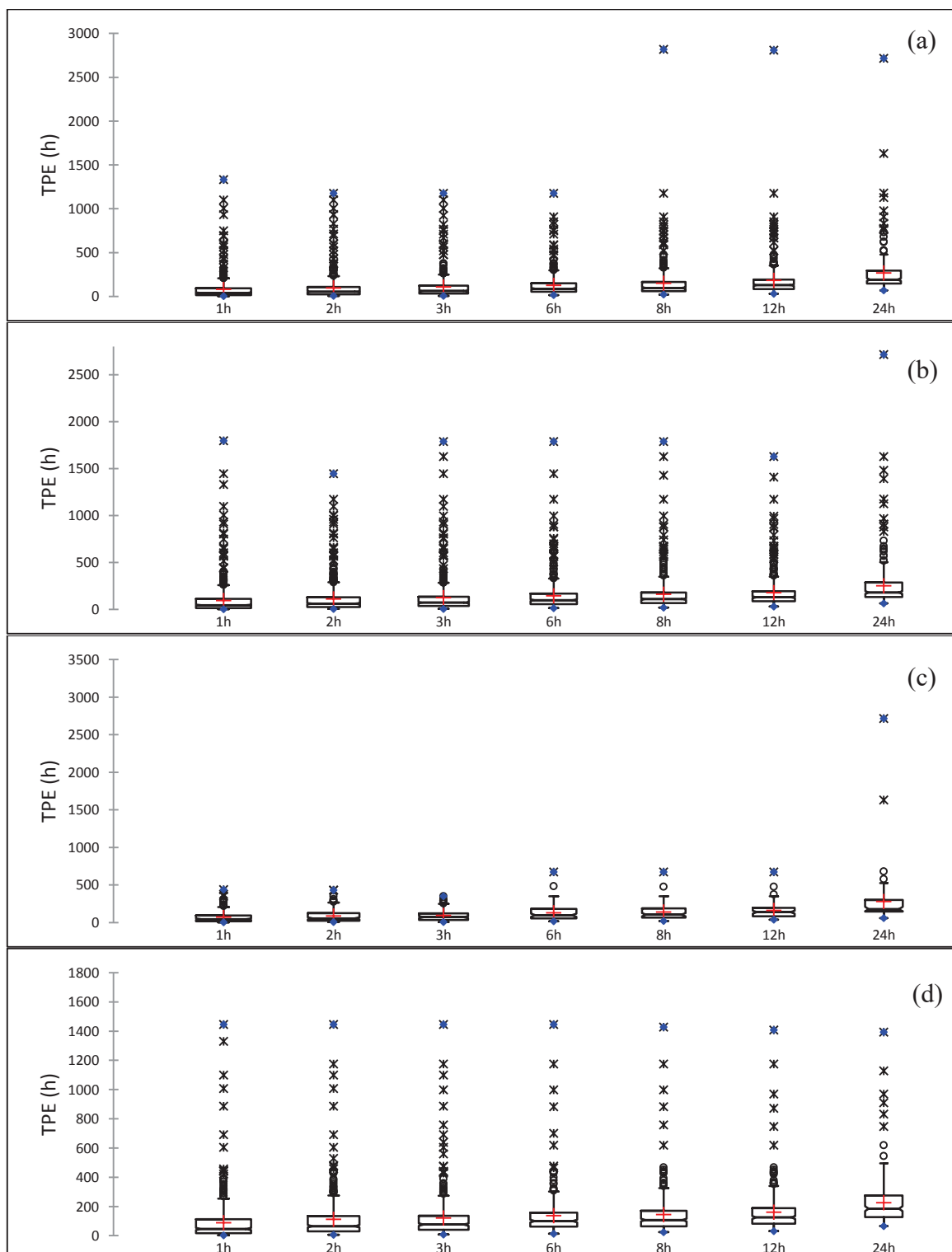


Figura 21 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TPE, para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

Para TLE e TPE ocorre um efeito contrário ao observado para as precipitações acumuladas de 48 horas e 5 dias, pois, para estas variáveis, o aumento do MIT provoca crescimentos destes valores devido à grande redução de número de eventos provocados pela

agregação dos mesmos. Os valores máximos encontrados para TLE chegam a ser superiores que 1100 horas para as estações pluviográficas 02 e 04, já para TPE chegam a ser superiores a 2500 horas para as estações 01, 02 e 03.

As variações das variáveis independente, TR (Tempo de Resposta) e PR (Precipitação de resposta), de cada estação pluviográfica monitorada para os diversos MIT são observadas através da Figura 22 e Figura 23.

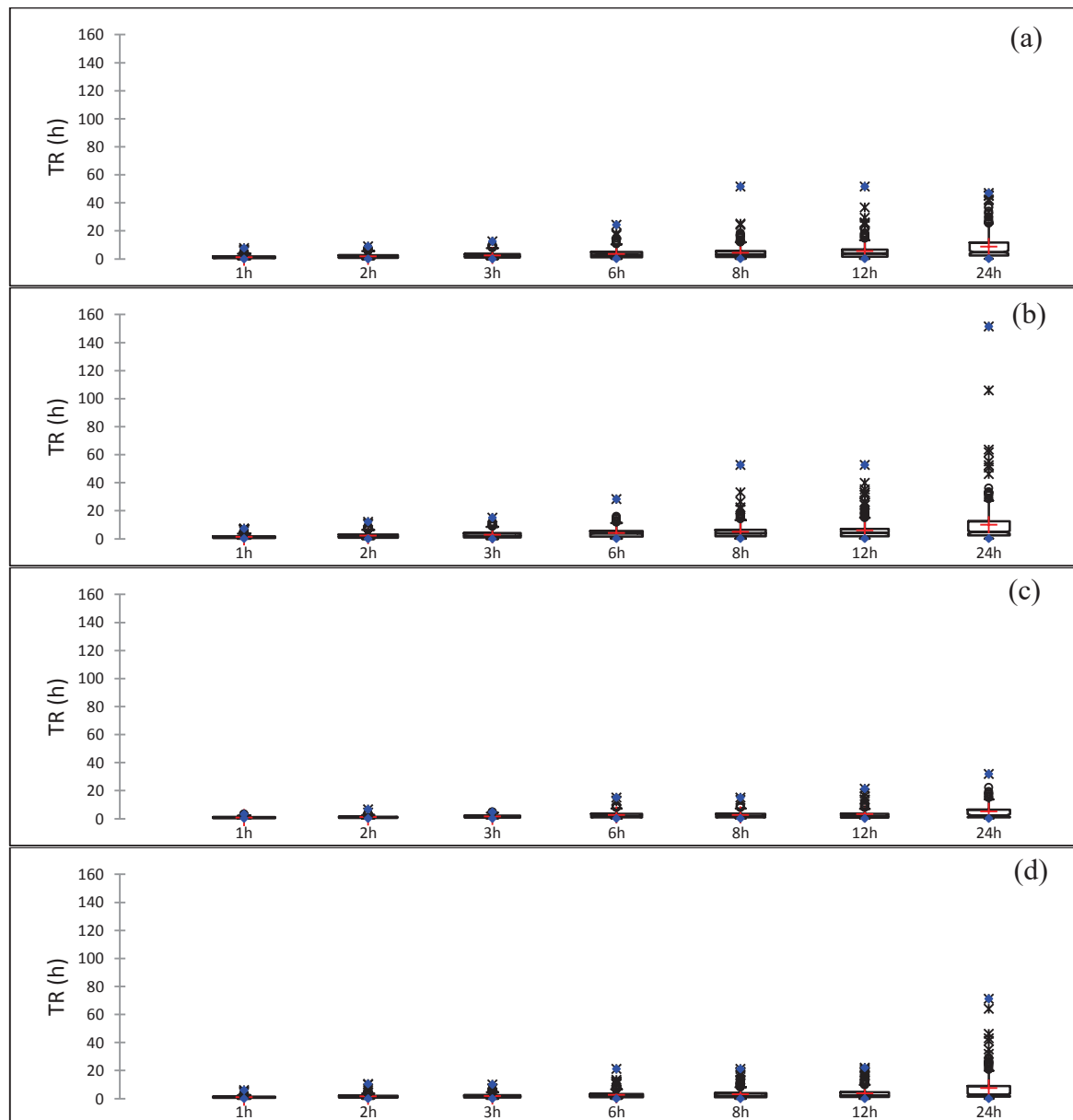


Figura 22 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, TR (Tempo de Resposta), para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

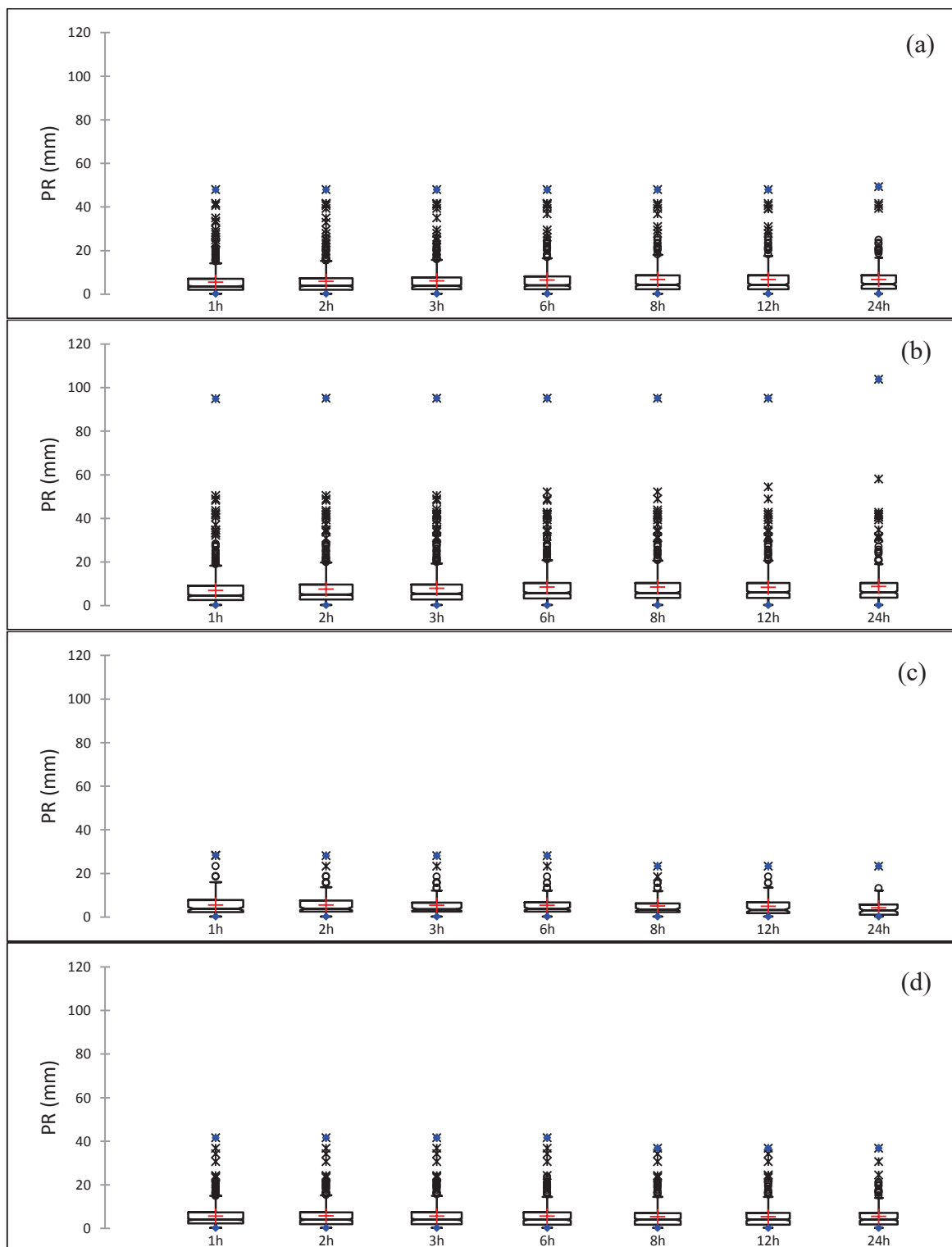


Figura 23 – Gráficos BoxPlot dos dados da variável, PR (Precipitação para Resposta), para cada MIT estudado e para cada estação pluviográfica: (a) estação 01; (b) estação 02; (c) estação 03; (d) estação 04

A estação pluviográfica 02 apresentou os maiores tempos para reação do sensor, seguido das estações 04, 01 e 03. Percebe-se, observando a variação do MIT, que há um crescimento dos valores de uma forma geral. Uma das possíveis causas deste aumento é

devido a agregação de eventos que não provocam uma reação no sensor superior a $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Já a precipitação necessária para a reação do sensor sofrerá aumento para as estações pluviográficas 01 e 02, porém irá diminuir para as estações 3 e 4.

5.4 Determinação dos valores para escoamento lento e rápido

Como forma de observar a frequência dos eventos chuvosos para cada um dos valores observados, foi traçado o histograma para o valor de $S_{\text{máx}}$, Figura 24. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 10.

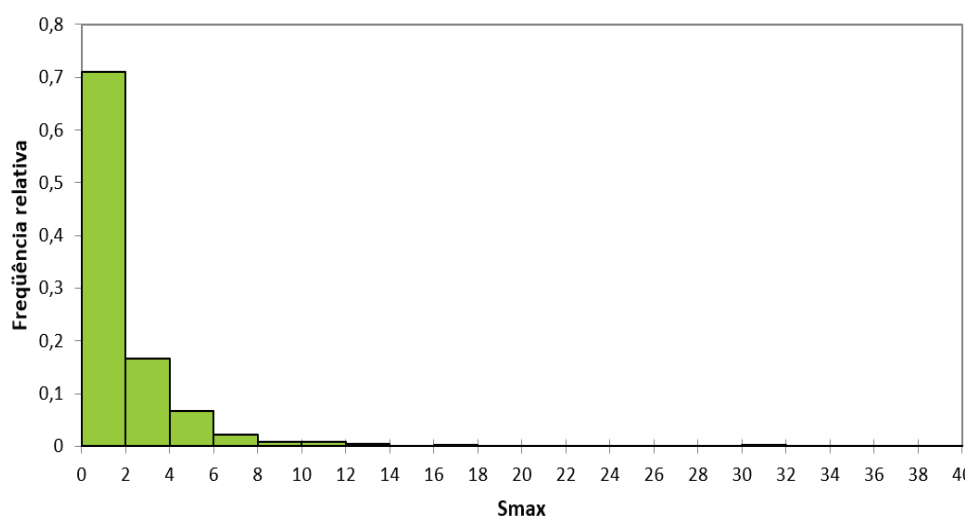


Figura 24 – Histograma dos valores da inclinação máxima de umedecimentos das estações pluviográficas obtidas através dos eventos chuvosos para o MIT de 6 horas

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos através da aplicação da técnica MARS para a determinação dos valores para escoamento lento e rápido

	$S_{\text{máx}}$ $\frac{\text{m}^3 \text{m}^{-3} 10^4}{60 \text{ min}}$	Interações	Nº de eventos	R ²	GCV	Nº de termos	Funções Básicas
Escoamento lento	< 2	1º	840	42%	0,18	10	9
		2º		53%	0,15	26	42
	< 4	1º	1029	53%	0,49	11	10
		2º		63%	0,42	32	53
	< 6	1º	1122	53%	0,99	8	7
		2º		62%	0,85	32	52
Escoamento rápido	> 4	1º	187	32%	28,92	7	6
		2º		69%	16,87	18	32
	> 8	1º	53	72%	29,73	8	7
		2º		78%	18,17	6	9
	> 12	1º	26	52%	39,71	3	2
		2º		68%	26,72	3	4

Observando os resultados da Tabela 10, optou-se por adotar os valores menores do que $4 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$ para representar o escoamento lento e os valores maiores do que $8 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$ para representar o escoamento rápido. Observou-se, que para o escoamento lento, há um maior coeficiente de determinação para os valores menores do que 4, por outro lado, o GCV para este foi o segundo melhor observado. Já para o escoamento rápido, observou-se que não seria possível aplicar o MARS se fosse adotado os valores maiores do que $12 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$ devido ao pequeno número de eventos, então, descartou-se esta opção. Entre os valores maiores do que $4 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$ e $8 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$, este último apresentou melhores coeficientes de determinação, um valor de GCV comparável e uma equação mais simples, e, também, evitou-se utilizar valores pequenos para o escoamento rápido com o objetivo de evitar considerações erradas sobre cada tipo de escoamento.

Observou-se, que para os escoamentos lentos, há a ocorrência tanto para condições de umidade de solo seco, como úmido. A Figura 25 mostra um evento chuvoso com duração de aproximadamente 4,5 horas, apresentando condição inicial de umidade seca e com uma precipitação acumulada de 24,64 mm. Houve um incremento de $0,017 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ no valor da umidade do solo e obteve-se um valor de S_{max} igual a $2,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$ configurando assim, segundo o modelo, um processo de escoamento predominantemente matricial.

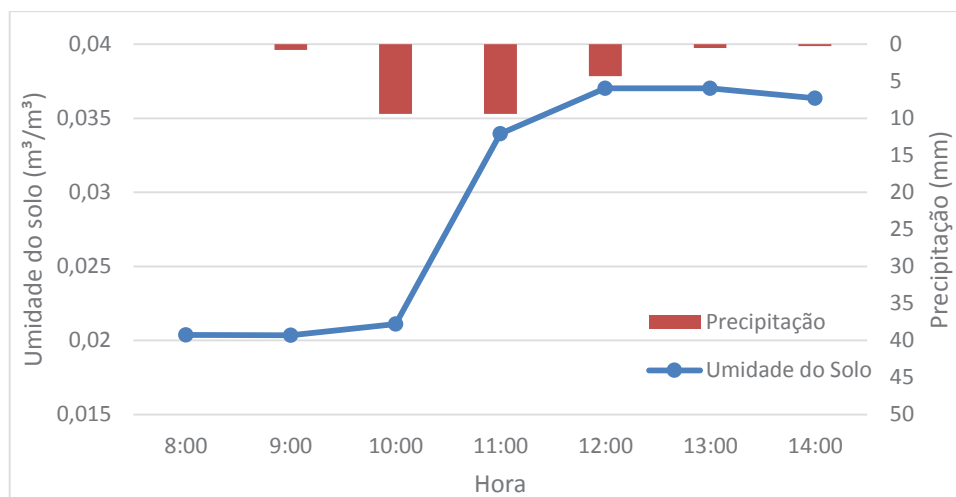


Figura 25 – Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso registrado na estação pluviográfica 04 no dia 18/04/2013, com valor de S_{max} igual a $2,14 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

Observa-se que para os escoamentos rápidos ($S_{max} > 8 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$), parte destes eventos possui uma condição inicial do solo seca seguido de um grande valor para precipitação acumulada e precipitação máxima em 30 minutos. Conforme pode se observar

na Figura 26, em que a umidade inicial do solo é igual a $0,006 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para o evento analisado, a precipitação acumulada é igual a 124,46 mm e a precipitação máxima em 30 minutos é igual a 46,48 mm.

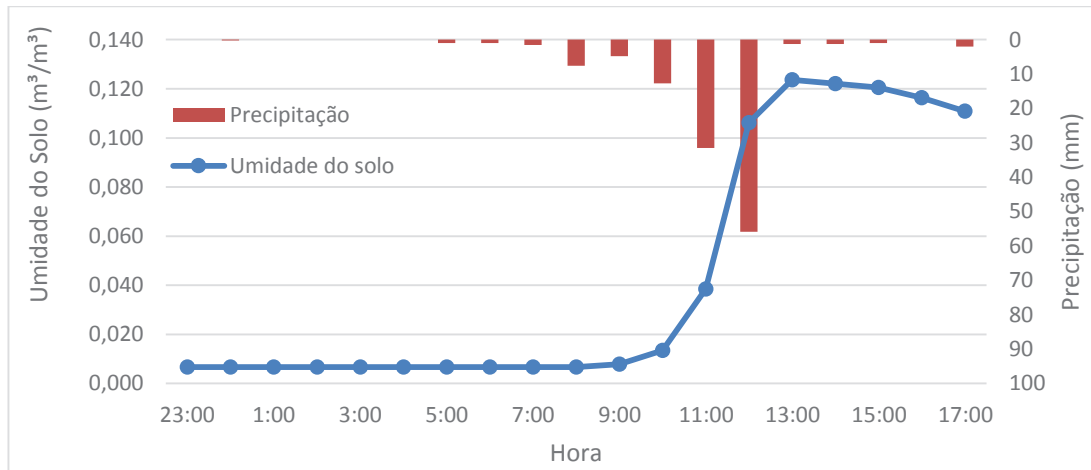


Figura 26 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para o evento chuvoso registrado na estação pluviográfica 01 no dia 22/02/2006, com valor de S_{max} igual a $9 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$

Em seguida, dois conjuntos de dados foram criados, um para os escoamentos lentos ($S_{\text{máx}} < 4 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$) e o outro para escoamentos rápidos ($S_{\text{máx}} > 8 \text{ m}^3\text{m}^{-3} \frac{10^4}{60 \text{ min}}$), e foram novamente divididos em 2 conjuntos aleatoriamente, um para realizar a calibração do modelo, com 75% dos casos, e a outra para realizar a validação do modelo, com 25% dos casos.

5.5 Calibração do modelo para escoamento lento através dos diferentes MIT

A seleção do MIT que apresentou os melhores resultados para cada estação foi realizada observando o coeficiente de determinação, GCV, número de termos e número de funções básicas. Ao realizar as análises, observou-se que os melhores resultados obtidos foram aqueles com grau de interação igual a 2, por isso, serão apresentados os resultados apenas para estes nesta seção.

Inicialmente, será apresentado para uma melhor distribuição, os resultados para os escoamentos lentos de cada estação pluviográfica e para a bacia experimental. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos para o escoamento rápido. Para este último, não foi possível realizar o estudo para cada estação separadamente devido ao pequeno número de eventos observados.

5.5.1 Estação Pluviográfica 01

Para a estação pluviográfica 01, foram utilizados os eventos chuvosos observados nos anos de 2004 a 2008 e ainda o ano de 2015. Esta estação difere das demais estações analisadas por estar situada em uma área coberta predominantemente pela mata atlântica. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos após a aplicação do MARS para o escoamento lento na estação pluviográfica 01.

Tabela 11 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 01

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	11%	6%	21%	5%	5%	16%	7%
D (h)	11%	3%	9%	19%	19%	19%	24%
Prec. (mm)	21%	25%	15%	16%	17%	6%	24%
Max30 (mm)	8%	6%	0%	14%	10%	13%	17%
AP48 (mm)	3%	6%	9%	2%	0%	0%	3%
AP5 (mm)	5%	19%	15%	9%	0%	3%	3%
TLE (h)	5%	22%	0%	12%	5%	16%	0%
TPE (h)	18%	3%	15%	5%	21%	16%	3%
TR (h)	16%	3%	9%	9%	5%	0%	7%
PR (mm)	3%	6%	9%	9%	19%	10%	10%
R ²	60%	65%	68%	76%	83%	79%	74%
GCV	0,43	0,38	0,38	0,35	0,3	0,33	0,53
Nº de termos	23	19	20	25	23	18	18
Funções Básicas	38	32	34	43	42	31	29

A duração do evento chuvoso e a precipitação acumulada são as duas variáveis independentes que possuem, de uma forma geral, maior importância relativa para os MIT's observados. Por outro lado, a precipitação antecedente e o tempo de reação da sonda não apresentaram grande importância relativa.

Como a estação pluviográfica 01 está localizada em uma área coberta pela mata atlântica, uma alternativa para o melhoramento da equação obtida seria através da consideração de variáveis que são influenciadas pela vegetação, e, consequentemente, possam ter grande influência na dinâmica da umidade do solo.

Quanto aos resultados obtidos, o MIT de 8 horas apresentou os melhores resultados com coeficiente de determinação igual a 83% e GCV igual a 0,3. A equação obtida apresentou 23 termos, 42 funções básicas e a participação de oito das 10 variáveis

independentes, ou seja, uma equação bastante complexa e de difícil aplicação. Abaixo está apresentada a Equação 7 para o MIT de 8 horas.

$$S_{max} = 2,02 + 0,001 * \max(0; TPE-214,80) - 0,0004 * \max(0; Max30-7,62) * \max(0; TPE-214,80) - 0,0004 * \max(0; 7,62-Max30) * \max(0; TPE-214,80) - 2,47 * \max(0; \theta_{init}-0,09) * \max(0; D-5,90) - 0,25 * \max(0; 0,09-\theta_{init}) * \max(0; D-5,90) - 0,0007 * \max(0; TPE-214,80) * \max(0; 2,30-TR) + 0,00006 * \max(0; D-5,90) * \max(0; TPE-150,73) - 0,0003 * \max(0; Prec.-28,95) * \max(0; 214,80-TPE) + 0,03 * \max(0; 30,99-Prec.) * \max(0; PR-13,21) - 0,007 * \max(0; 30,99-Prec.) * \max(0; 13,21-PR) + 0,08 * \max(0; 5,84-PR) + 0,01 * \max(0; 7,85-TR) * \max(0; PR-5,84) + 0,0004 * \max(0; Prec.-14,48) * \max(0; 214,80-TPE) + 0,03 * \max(0; 5,90-D) * \max(0; Prec.-9,40) + 0,04 * \max(0; 5,90-D) * \max(0; 9,40-Prec.) - 0,10 * \max(0; 5,90-D) * \max(0; PR-0,15) - 0,02 * \max(0; 5,90-D) * \max(0; 14,99-PR) + 0,0001 * \max(0; TLE-81,50) * \max(0; 214,80-TPE) + 0,000035 * \max(0; 81,50-TLE) * \max(0; 214,80-TPE) - 0,04 * \max(0; D-5,90) * \max(0; 6,10-Max30) - 0,01 * \max(0; 30,99-Prec.) * \max(0; PR-5,84) - 0,002 * \max(0; Max30-12,70) * \max(0; PR-0,25)$$

Equação 7

A Tabela 12 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 8 horas. Há correlações positivas, negativas e nulas entre as diversas variáveis. Entre as correlações positivas, destacam-se, principalmente, a correlação entre a variável dependente, $S_{máx}$, e precipitação acumulada (Prec.) com um valor de 70%; $S_{máx}$ e precipitação máxima em 30 minutos (Max30) com um valor de 51%. Entre as correlações negativas destaca-se a TPE e θ_{init} com um valor de -47% e, por fim, há correlação nula entre a precipitação acumulada (Prec.) e a precipitação antecedente de 48 horas (AP48).

Tabela 12 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 12 horas na estação pluviográfica 01

	S_{max}	θ_{init}	D	Prec.	Max - 30	AP48	AP5	TLE	TPE	TR	PR
S_{max}	100%										
θ_{init}	17%	100%									
D	33%	16%	100%								
Prec.	70%	12%	61%	100%							
Max30	51%	0%	-3%	52%	100%						
AP48	0%	41%	5%	0%	1%	100%					
AP5	12%	56%	8%	12%	7%	58%	100%				
TLE	-15%	-46%	-7%	-5%	8%	-15%	-21%	100%			
TPE	-12%	-47%	-7%	-5%	7%	10%	-12%	76%	100%		
TR	2%	6%	39%	8%	-14%	-1%	-1%	-2%	-4%	100%	
PR	38%	2%	-9%	37%	66%	-4%	5%	-7%	-9%	12%	100%

Como mencionado anteriormente, a equação obtida é bastante complexa, por isso, foi realizado a simplificação das equações, em que foram modeladas as novas equações observando apenas as variáveis que apresentaram maior importância relativa, Tabela 13.

Tabela 13 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 01

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m³/m³)	19%	0%	27%	0%	0%	0%	0%
D (h)	37%	0%	0%	21%	27%	13%	33%
Prec. (mm)	30%	33%	38%	37%	27%	13%	53%
Max – 30 (mm)	0%	0%	0%	21%	0%	0%	13%
AP48 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	0%	28%	19%	0%	0%	0%	0%
TLE (h)	0%	39%	0%	21%	0%	25%	0%
TPE (h)	0%	0%	15%	0%	36%	50%	0%
TR (h)	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PR (mm)	0%	0%	0%	0%	9%	0%	0%
R²	55%	56%	60%	63%	75%	20%	63%
GCV	0,45	0,43	0,44	0,39	0,35	0,89	0,61
Nº de termos	16	12	16	11	14	5	10
Funções Básicas	27	18	26	19	22	8	15

A simplificação da equação do MIT de 8 horas resultou em uma redução significativa dos números de termos e funções básicas, as três variáveis independentes passaram a possuir importância relativa semelhantes, o coeficiente de determinação decresceu e o GCV aumentou. Abaixo está apresentada a Equação 8 para o MIT de 8 horas simplificado.

$$\begin{aligned}
 S_{max} = & 2,21 - 0,06 \cdot \max(0; 30,99 - \text{Prec.}) + 0,0006 \cdot \max(0; \text{TPE} - 214,80) - \\
 & 0,00009 \cdot \max(0; \text{TPE} - 214,80) \cdot \max(0; 8,63 - \text{PR}) - 0,02 \cdot \max(0; D - 6,45) - \\
 & 0,27 \cdot \max(0; 6,45 - D) + 0,0005 \cdot \max(0; \text{Prec.} - 12,70) \cdot \max(0; 214,80 - \text{TPE}) - \\
 & 0,06 \cdot \max(0; 6,45 - D) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 20,57) + 0,04 \cdot \max(0; 6,45 - D) \cdot \max(0; \text{Prec.} - \\
 & 12,70) + 0,0003 \cdot \max(0; 6,45 - D) \cdot \max(0; 813,92 - \text{TPE}) - 0,0004 \cdot \max(0; \text{Prec.} - \\
 & 28,95) \cdot \max(0; 214,80 - \text{TPE}) - 0,0003 \cdot \max(0; D - 36,20) \cdot \max(0; \text{TPE} - 214,80) - \\
 & 0,0004 \cdot \max(0; \text{TPE} - 587,88) \cdot \max(0; \text{PR} - 8,63) + 0,0003 \cdot \max(0; \text{Prec.} - \\
 & 30,99) \cdot \max(0; \text{TPE} - 110,08)
 \end{aligned}
 \tag{Equação 8}$$

5.5.2 Estação Pluviográfica 02

Para a estação pluviográfica 02, foram utilizados os eventos chuvosos observados nos anos de 2004 a 2006, 2008 a 2011 e ainda o ano de 2015. Esta estação está situada em uma área com poucas árvores. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para a estação pluviográfica 02 para o escoamento lento.

Tabela 14 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 02

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	26%	18%	25%	29%	21%	30%	5%
D (h)	15%	26%	22%	9%	11%	10%	5%
Prec. (mm)	21%	24%	22%	14%	26%	27%	31,82%
Max30 (mm)	0%	9%	16%	14%	6%	20%	18,18%
AP48 (mm)	9%	9%	6%	6%	0%	3%	5%
AP5 (mm)	3%	0%	0%	3%	11%	0%	5%
TLE (h)	6%	0%	6%	0%	9%	0%	18%
TPE (h)	0%	9%	0%	9%	4%	7%	9%
TR (h)	6%	0%	0%	6%	2%	0%	0%
PR (mm)	15%	6%	3%	11%	11%	3%	5%
R ²	64%	69%	68%	73%	73%	70%	72%
GCV	0,44	0,4	0,42	0,43	0,52	0,43	0,46
Nº de termos	21	22	19	21	27	19	14
Funções Básicas	34	34	32	35	47	30	22

A umidade do solo inicial e a precipitação acumulada são as duas variáveis independentes que possuem maior importância relativa para a modelagem da equação para os MIT's observados. Por outro lado, a precipitação antecedente, TLE, TPE e TR apresentaram importância insignificantes ou nulas para a modelagem.

Quanto aos resultados obtidos, o MIT de 6 e 8 horas apresentaram os melhores coeficientes de determinação com valor igual a 73%, porém o valor do GCV para o MIT de 6 horas foi menor, com valor igual a 0,3. Portanto, a equação obtida para o MIT de 6 horas apresentou 21 termos, 35 funções básicas, com a participação de nove das 10 variáveis independentes. Abaixo está apresentada a Equação 9 para o MIT de 8 horas.

$$\begin{aligned}
 S_{max} = & 0,75 + 0,05 * \max(0; \text{Prec.} - 24,38) - 0,38 * \max(0; 0,29 - \theta_{init}) * \max(0; \text{Prec.} - \\
 & 24,38) + 15,48 * \max(0; \theta_{init} - 0,16) - 48,16 * \max(0; \theta_{init} - 0,31) - 0,0005 * \max(0; \\
 & \text{Prec.} - 24,38) * \max(0; 224,50 - \text{TPE}) - 0,95 * \max(0; 0,18 - \theta_{init}) * \max(0; 12,45 - \text{Max30}) \\
 & - 0,19 * \max(0; \text{Max30} - 10,92) + 0,0009 * \max(0; \text{Max30} - 10,92) * \max(0; 432,65 - \text{TPE}) \\
 & - 0,003 * \max(0; 33,50 - D) * \max(0; 9,48 - \text{TR}) - 0,34 * \max(0; 0,17 - \theta_{init}) * \max(0; \text{PR} - \\
 & 11,17) + 0,99 * \max(0; 0,17 - \theta_{init}) * \max(0; 11,17 - \text{PR}) + 0,015 * \max(0; 10,92 - \\
 & \text{Max30}) * \max(0; \text{PR} - 7,36) - 0,09 * \max(0; 7,36 - \text{PR}) + 0,86 * \max(0; 0,17 - \\
 & \theta_{init}) * \max(0; \text{Prec.} - 4,83) + 0,0002 * \max(0; \text{Prec.} - 24,38) * \max(0; \text{AP5} - 80,26) + \\
 & 0,02 * \max(0; 10,92 - \text{Max30}) * \max(0; 2,70 - \text{TR}) - 0,001 * \max(0; D - 33,50) * \max(0; \\
 & \text{TPE} - 177,73) + 0,40 * \max(0; 0,17 - \theta_{init}) * \max(0; 28,46 - D) - 0,11 * \max(0; 0,168 - \\
 & \theta_{init}) * \max(0; \text{AP48} - 39,11) - 0,140 * \max(0; 0,17 - \theta_{init}) * \max(0; 39,12 - \text{AP48})
 \end{aligned}$$

Equação 9

A Tabela 15 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 6 horas. Há correlações positivas, negativas e nulas entre as diversas variáveis. Entre as correlações positivas, destacam-se, principalmente, a correlação entre

precipitação acumulada e duração do evento chuvoso com um valor de 64%; Prec. e Max30 com um valor de 63%; e $S_{m\acute{a}x}$ e Max30 com um valor de 62%. Estas correlações já foram observadas anteriormente na modelagem do modelo do escoamento lento. Entre as correlações negativas destaca-se a TPE e AP5 com um valor de -29% e, por fim, há correlação nula entre a AP48 e D.

Tabela 15 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 12 horas na estação pluviográfica 01

	S_{max}	θ_{init}	D	Prec.	Max - 30	AP48	AP5	TLE	TPE	TR	PR
S_{max}	100%										
θ_{init}	-6%	100%									
D	19%	24%	100%								
Prec.	48%	29%	64%	100%							
Max30	62%	6%	12%	63%	100%						
AP48	-5%	27%	0%	1%	2%	100%					
AP5	-6%	49%	8%	11%	2%	66%	100%				
TLE	6%	-16%	-9%	-3%	3%	-18%	-23%	100%			
TPE	8%	-19%	-14%	-6%	7%	-21%	-29%	89%	100%		
TR	8%	7%	36%	15%	2%	-7%	-3%	5%	3%	100%	
PR	38%	0%	-11%	27%	57%	0%	-4%	13%	14%	20%	100%

As equações obtidas são bastante complexas, por isso, foi realizado a simplificação das equações, nas quais foram modeladas as novas equações observando apenas as variáveis que apresentaram maior importância relativa (Tabela 16).

Tabela 16 – Variáveis independentes obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para os escoamentos lentos na estação pluviográfica 02

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	26%	35%	22%	55%	23%	47%	0%
D (h)	32%	25%	11%	0%	15%	0%	0%
Prec. (mm)	23%	40%	56%	18%	38%	24%	25%
Max30 (mm)	0%	0%	11%	27%	0%	29%	42%
AP48 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%
TLE (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%
TPE (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TR (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PR (mm)	19%	0%	0%	0%	15%	0%	0%
R ²	61%	62%	57%	63%	59%	65%	66%
GCV	0,48	0,44	0,48	0,47	0,57	0,47	0,48
Nº de termos	21	14	7	8	10	12	9
Funções Básicas	31	20	9	11	13	17	12

A simplificação da equação do MIT de 6 horas resultou em uma redução significativa dos números de termos e funções básicas, a variável da umidade do solo inicial permaneceu

com a maior importância relativa, o coeficiente de determinação decresceu e o GCV aumentou. Abaixo está apresentada a Equação 10 para o MIT de 6 horas simplificado.

$$\begin{aligned} S_{\max} = & 1,56 - 0,10 \cdot \max(0; 12,45 - \text{Max30}) - 0,37 \cdot \max(0; 0,29 - \theta_{\text{init}}) \cdot \max(0; \\ & \text{Prec.} - 24,38) + 14,52 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,17) + 0,77 \cdot \max(0; 0,17 - \theta_{\text{init}}) \cdot \max(0; \\ & \text{Prec.} - 9,40) - 53,18 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,31) - 130,03 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,36) \cdot \max(0; \\ & \text{Max30} - 12,45) + 1,36 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,17) \cdot \max(0; \text{Max30} - 10,41) \end{aligned} \quad \text{Equação 10}$$

5.5.3 Estação Pluviográfica 03

Para a estação pluviográfica 03, foram utilizados os eventos chuvosos observados nos anos de 2004 e 2005. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para a estação pluviográfica 03 para o escoamento lento.

Tabela 17 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 03

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	27%	42%	11%	8%	48%	19%	7%
D (h)	12%	16%	0%	0%	10%	5%	7%
Prec. (mm)	0%	11%	21%	16%	24%	19%	6,67%
Max30 (mm)	18%	21%	29%	16%	5%	29%	20,00%
AP48 (mm)	12%	5%	7%	36%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	3%	0%	7%	0%	0%	0%	33%
TLE (h)	3%	5%	0%	0%	5%	0%	13%
TPE (h)	0%	0%	7%	8%	0%	5%	0%
TR (h)	9%	0%	7%	4%	0%	0%	7%
PR (mm)	15%	0%	11%	12%	10%	24%	7%
R ²	93%	83%	92%	84%	85%	85%	82%
GCV	0,08	0,21	0,15	0,36	0,36	0,35	0,28
Nº de termos	20	13	18	15	14	13	10
Funções Básicas	33	19	28	25	21	21	15

A umidade do solo inicial e precipitação ocorrida durante o evento chuvoso são de grande importância para a calibração do modelo nesta estação, pois apresentaram grande importância relativa na maioria dos MIT's analisados. Por outro lado, o tempo de reação (TR), TLE, TPE e precipitação antecedente não apresentaram grande influência na modelagem de modo geral.

Quanto aos resultados obtidos, o MIT de 1 hora apresentou o melhor resultado dentre os demais, pois o coeficiente de determinação obtido foi igual a 93% e o valor de GCV igual

a 0,08. A equação obtida apresentou 20 termos, 33 funções básicas e a participação de oito variáveis independentes. Abaixo está apresentada a Equação 11 para o MIT de 1 hora.

$$\begin{aligned} S_{max} = & 0,86 - 0,11 \cdot \max(0; 7,87) + 0,005 \cdot \max(0; \text{Max30}-7,87) \cdot \max(0; \text{PR}-10,92) \\ & + 0,04 \cdot \max(0; \text{Max30}-7,87) \cdot \max(0; 10,92-\text{PR}) + 2,28 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,12) \cdot \max(0; \\ & \text{TR}-1,83) + 1,20 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,12) \cdot \max(0; 1,83-\text{TR}) + 0,12 \cdot \max(0; \text{D}-2,43) - \\ & 1,83 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,12) \cdot \max(0; \text{D}-2,23) - 1,81 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,12) \cdot \max(0; 2,23-\text{D}) + \\ & 0,022 \cdot \max(0; \text{D}-2,43) \cdot \max(0; 8,63-\text{Max30}) + 4,22 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,20) - \\ & 0,19 \cdot \max(0; \text{TR}-0,80) + 2,39 \cdot \max(0; 0,12-\theta_{init}) \cdot \max(0; \text{PR}-9,40) - 0,74 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,12) \cdot \max(0; 9,40-\text{PR}) - \\ & 0,66 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,254) \cdot \max(0; \text{AP5}-40,89) - 2,62 \cdot \max(0; 0,12-\theta_{init}) \cdot \max(0; \text{Max30}-6,86) + 0,009 \cdot \max(0; \text{AP48}-14,48) - \\ & 0,004 \cdot \max(0; \text{AP48}-14,48) \cdot \max(0; 4,57-\text{PR}) - 0,005 \cdot \max(0; 6,86-\text{Max30}) \cdot \max(0; \\ & 14,48-\text{AP48}) + 0,0004 \cdot \max(0; 14,48-\text{AP48}) \cdot \max(0; 103,6002-\text{TLE}) \end{aligned} \quad \text{Equação 11}$$

Uma forma de melhorar os resultados obtidos é através da consideração do nível estático do lençol freático nesta estação, pois o nível estático deve influenciar diretamente sobre as respostas da sonda TDR, uma vez que está próximo da mesma.

A Tabela 18 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 3 horas. Há correlações positivas, negativas e nulas entre as diversas variáveis. Entre as correlações positivas, destacam-se, principalmente, a correlação entre Prec. e D com um valor de 76%; AP5 e AP48 com um valor de 73%; TLE e TPE com um valor de 71%. Entre as correlações negativas destaca-se a TPE e θ_{init} com um valor de -34% e, por fim, há correlação nula entre θ_{init} e Smax.

Tabela 18 – Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 1 hora na estação pluviográfica 03

	Smax	θ_{init}	D	Prec.	Max - 30	AP48	AP5	TLE	TPE	TR	PR
Smax	100%										
θ_{init}	0%	100%									
D	30%	1%	100%								
Prec.	50%	-5%	76%	100%							
Max30	67%	-24%	19%	61%	100%						
AP48	5%	5%	12%	12%	6%	100%					
AP5	6%	4%	11%	10%	-1%	73%	100%				
TLE	-8%	-24%	-4%	0%	12%	-11%	-17%	100%			
TPE	-15%	-34%	-10%	-6%	2%	-11%	-19%	71%	100%		
TR	7%	6%	21%	11%	1%	8%	6%	7%	2%	100%	
PR	38%	-15%	-7%	26%	75%	-2%	-7%	18%	7%	29%	100%

Em seguida, foi realizado a simplificação das equações nas quais foram obtidas as novas equações observando apenas as variáveis que apresentaram maior importância relativa (Tabela 19).

Tabela 19 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 03

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m³/m³)	48%	40%	17%	0%	33%	22%	30%
D (h)	0%	20%	0%	0%	0%	0%	30%
Prec. (mm)	0%	0%	42%	33%	67%	22%	0%
Max30 (mm)	29%	40%	42%	44%	0%	28%	40%
AP48 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TLE (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TPE (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TR (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PR (mm)	24%	0%	0%	22%	0%	28%	0%
R²	86%	78%	68%	61%	51%	84%	71%
GCV	0,12	0,23	0,33	0,41	0,53	0,34	0,43
Nº de termos	14	11	9	6	5	12	7
Funções Básicas	21	15	12	9	6	18	10

A simplificação da equação do MIT de 1 horas foi bastante satisfatória, pois ocorreu a redução significativa do número de termos, funções básicas utilizando apenas três variáveis independentes (umidade do solo inicial, precipitação máxima em 30 minutos e precipitação de reação). Por outro lado, houve um decréscimo no coeficiente de determinação e houve o aumento do GCV. Abaixo está apresentada a Equação 12 para o MIT de 1 hora simplificado.

$$\begin{aligned}
 S_{max} = & 1,47 - 0,18 \cdot \max(0; 7,87 - \text{Max30}) - 8,41 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,12) - \\
 & 21,64 \cdot \max(0; 0,12 - \theta_{init}) + 0,005 \cdot \max(0; \text{Max30} - 7,87) \cdot \max(0; \text{PR} - 10,92) + \\
 & 0,03 \cdot \max(0; \text{Max30} - 7,87) \cdot \max(0; 10,92 - \text{PR}) - 3,16 \cdot \max(0; 0,12 - \theta_{init}) \cdot \max(0; \\
 & \text{Max30} - 11,18) + 1,84 \cdot \max(0; 0,12 - \theta_{init}) \cdot \max(0; 11,18 - \text{Max30}) - 4,74 \cdot \max(0; \\
 & \theta_{init} - 0,24) \cdot \max(0; \text{Max30} - 7,87) + 15,86 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,20) + 3,15 \cdot \max(0; 0,12 - \\
 & \theta_{init}) \cdot \max(0; \text{PR} - 9,40) + 1,06 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,12) \cdot \max(0; 4,32 - \text{PR}) + \\
 & 4,15 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,20) \cdot \max(0; \text{PR} - 10,92) - 11,03 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,25)
 \end{aligned}$$

Equação 12

5.5.4 Estação Pluviográfica 04

Para a estação pluviográfica 04, foram utilizados os eventos chuvosos observados nos anos de 2008 a 2010 e 2013 a 2015. Esta estação está situada em uma área quase sem vegetação. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para a estação pluviográfica 04, para o escoamento lento, onde todos os resultados apresentados são para um grau de interação igual a 2.

Tabela 20 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 04

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m³/m³)	14%	15%	13%	23%	24%	24%	16%
D (h)	11%	15%	15%	5%	8%	4%	18%
Prec. (mm)	18%	13%	20%	21%	20%	18%	16,00%
Max – 30 (mm)	18%	26%	18%	19%	27%	16%	18,00%
AP48 (mm)	2%	7%	4%	0%	0%	4%	2%
AP5 (mm)	18%	7%	5%	5%	4%	0%	16%
TLE (h)	2%	2%	4%	7%	4%	7%	4%
TPE (h)	5%	4%	15%	2%	0%	0%	0%
TR (h)	5%	4%	4%	0%	6%	7%	8%
PR (mm)	8%	7%	4%	19%	8%	20%	2%
R²	90%	90%	91%	87%	92%	90%	90%
GCV	0,14	0,15	0,12	0,18	0,14	0,13	0,19
Nº de termos	37	28	32	26	30	27	30
Função Básica	65	46	55	43	51	45	50

A precipitação acumulada, a precipitação máxima em 30 minutos e a umidade do solo inicial são as variáveis independentes que se destacam para todos os MIT's analisados, em contrapartida, o TLE, o TPE, o TR e a precipitação antecedente apresentam importância relativa nula ou insignificante na maioria dos casos observados.

Assim como a estação pluviográfica 03, a estação 04 apresenta um nível estático próximo a superfície, com isso a adição desta variável poderá ser de grande valia para obtenção de uma equação mais representativa e simples.

Os resultados obtidos são bastante semelhantes no que se trata dos valores do coeficiente de determinação, entre 87% e 92%, e GCV, entre 0,12 e 0,19. Portanto, o MIT de 8 horas foi escolhido por apresentar o maior coeficiente de determinação, e a equação obtida apresenta 30 termos e 51 funções básicas, em que é composta por oito variáveis independentes. Abaixo está apresentada a Equação 13 para o MIT de 8 horas.

$$\begin{aligned}
 S_{max} = & 2,89 - 0,59 * \max(0; \text{Max30}-12,45) - 0,31 * \max(0; 12,45-\text{Max30}) - 12,47 * \max(0; \\
 & 0,13-\theta_{init}) + 0,44 * \max(0; 0,13-\theta_{init}) * \max(0; \text{Prec.}-36,83) - 0,34 * \max(0; 0,13- \\
 & \theta_{init}) * \max(0; 0,37-\text{Prec.}) + 2,20 * \max(0; \theta_{init}-0,184) * \max(0; 12,45-\text{Max30}) + 1,14 * \max(0; \\
 & 183,89) * \max(0; 12,45-\text{Max30}) - 22,35 * \max(0; \theta_{init}-0,20) + 0,46 * \max(0; 0,13- \\
 & \theta_{init}) * \max(0; D-26,18) + 0,30 * \max(0; 0,13-\theta_{init}) * \max(0; 26,18-D) + 0,12 * \max(0; 12,45- \\
 & \text{Max30}) * \max(0; PR-15,75) + 0,007 * \max(0; 1,25-\text{Max30}) * \max(0; 15,75-PR) + \\
 & 0,06 * \max(0; 36,07-\text{Prec.}) * \max(0; \text{Max30}-12,45) + 0,009 * \max(0; 0,13-\theta_{init}) * \max(0; \\
 & 394,65-TLE) + 0,04 * \max(0; \text{Max30}-12,45) * \max(0; AP5-11,68) + 0,02 * \max(0; \text{Max30}- \\
 & 12,45) * \max(0; 11,68-AP5) - 0,03 * \max(0; \text{Max30}-12,45) * \max(0; TR-1,60) + 0,35 * \max(0; \\
 & \text{Max30}-9,40) - 0,07 * \max(0; \text{Prec.}-0,36) - 0,02 * \max(0; 36,83-\text{Prec.}) + 0,006 * \max(0; \text{Prec.}- \\
 & 36,83) * \max(0; 7,13) + 2,66565432231338e-004 * \max(0; \text{Prec.}-0,36) * \max(0; 215,27-TLE) \\
 & - 0,03 * \max(0; 0,37-\text{Prec.}) * \max(0; \text{Max30}-10,92) - 0,001 * \max(0; D-30,27) * \max(0; \text{Prec.}- \\
 & 36,83) - 0,002 * \max(0; 30,27-D) * \max(0; \text{Prec.}-36,83) + 0,007 * \max(0; \text{Max30}- \\
 & 9,40) * \max(0; PR-16,26) - 0,90 * \max(0; \theta_{init}-0,13) * \max(0; 3,05-PR) + 15,10 * \max(0; \theta_{init}- \\
 & 0,27) * \max(0; \text{Max30}-12,45) - 1,87 * \max(0; 0,13-\theta_{init}) * \max(0; 2,02-TR)
 \end{aligned}$$

Equação 13

A Tabela 21 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 8 horas.

Tabela 21 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 8 horas na estação pluviográfica 04

	Smax	θ_{init}	D	Prec.	Max30	AP48	AP5	TLE	TPE	TR	PR
Smax	100%										
θ_{init}	-38%	100%									
D	20%	12%	100%								
Prec.	53%	-7%	53%	100%							
Max30	73%	-30%	8%	62%	100%						
AP48	1%	7%	3%	-1%	5%	100%					
AP5	-12%	23%	9%	-1%	-8%	52%	100%				
TLE	3%	-29%	-10%	5%	9%	-21%	-28%	100%			
TPE	12%	-38%	-14%	10%	23%	-21%	-30%	83%	100%		
TR	-1%	-24%	29%	8%	-8%	-3%	-2%	15%	14%	100%	
PR	52%	-45%	-13%	28%	69%	8%	-10%	13%	27%	6%	100%

Há correlações positivas e negativas entre as diversas variáveis independentes. Entre as correlações positivas, destacam-se a correlação entre TPE e TLE com um valor de 83%; Prec e D com um valor de 53% e PR e Max30 com um valor de 69%. Foi observado, também, correlações negativas entre θ_{init} e PR com valor de -38% e entre θ_{init} e Max30 com valor de -30%. E ainda há correlações quase nulas entre AP5 e Prec. e AP48 e Prec.

Foi realizado a simplificação das equações, nas quais foram modeladas as novas equações observando apenas as variáveis que apresentaram maior importância relativa (Tabela 22).

Tabela 22 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na estação pluviográfica 04

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	18%	29%	21%	31%	22%	30%	19%
D (h)	14%	26%	15%	0%	0%	0%	24%
Prec. (mm)	27%	24%	24%	31%	33%	26%	27%
Max30 (mm)	23%	21%	24%	26%	44%	26%	30%
AP48 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TLE (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TPE (h)	0%	0%	18%	0%	0%	0%	0%
TR (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PR (mm)	24%	0%	0%	11%	0%	17%	0%
R ²	87%	85%	88%	86%	87%	86%	85%
GCV	0,16	0,19	0,14	0,19	0,17	0,2	0,25
Nº de termos	27	21	22	23	17	16	22
Funções Básicas	44	34	34	35	27	23	37

A simplificação do modelo provocou grande diminuição dos números de termos e funções básicas de cada equação obtida, porém mantendo coeficientes de determinação e GCV expressivos. Abaixo está apresentada a Equação 14 para o MIT de 3 horas simplificado.

$$\begin{aligned} S_{\max} = & -1,23 - 0,56 \cdot \max(0; \text{Max30}-12,19) - 8,05 \cdot \max(0; 0,13-\theta_{\text{init}}) + \\ & 1,36 \cdot \max(0; 0,18-\theta_{\text{init}}) \cdot \max(0; 12,19-\text{Max30}) + 1,03 \cdot \max(0; \text{Max30}-6,60) - \\ & 0,04 \cdot \max(0; \text{Prec.}-42,92) + 0,03 \cdot \max(0; 35,31-\text{Prec.}) \cdot \max(0; \text{Max30}-12,19) + \\ & 0,19 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}}-0,02) \cdot \max(0; 42,93-\text{Prec.}) - 4,98 \cdot \max(0; 0,13-\theta_{\text{init}}) \cdot \max(0; \\ & \text{Max30}-12,19) - 1,79 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}}-0,13) \cdot \max(0; \text{Max30}-4,83) - 0,03 \cdot \max(0; \\ & 42,93-\text{Prec.}) \cdot \max(0; \text{Max30}-7,11) + 0,007 \cdot \max(0; 42,93-\text{Prec.}) \cdot \max(0; \text{Max30}- \\ & 2,54) + 0,008 \cdot \max(0; \text{Prec.}-12,70) \cdot \max(0; 12,19-\text{Max30}) + 0,017 \cdot \max(0; \\ & 42,93-\text{Prec.}) \cdot \max(0; \text{Max30}-13,72) + 0,006 \cdot \max(0; \text{Prec.}-57,91) \cdot \max(0; \\ & \text{Max30}-12,19) + 0,004 \cdot \max(0; \text{Prec.}-4,32) \cdot \max(0; 12,19-\text{Max30}) - \\ & 10,63 \cdot \max(0; \theta_{\text{init}}-0,23) \end{aligned} \quad \text{Equação 14}$$

5.5.5 Bacia experimental

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para os dados de todas as estações para o escoamento lento, onde todos os resultados apresentados são para um grau de interação igual a 2.

Tabela 23 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na bacia experimental

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	19%	16%	26%	22%	11%	29%	23%
D (h)	6%	14%	11%	7%	16%	4%	17%
Prec. (mm)	25%	27%	18%	20%	20%	17%	20,75%
Max30 (mm)	11%	11%	8%	13%	13%	21%	13%
AP48 (mm)	15%	0%	3%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	2%	5%	0%	2%	0%	0%	2%
TLE (h)	0%	7%	18%	9%	16%	0%	6%
TPE (h)	9%	2%	0%	4%	0%	4%	6%
TR (h)	9%	0%	0%	7%	11%	0%	2%
PR (mm)	0%	7%	5%	9%	9%	13%	2%
Veg	4%	11%	11%	7%	4%	13%	9%
R ²	59%	61%	64%	68%	64%	62%	68%
GCV	0,4	0,36	0,38	0,36	0,43	0,44	0,51
Nº de termos	31	26	23	27	26	15	31
Função Básica	53	44	38	45	45	24	53

A precipitação acumulada, a precipitação máxima em 30 minutos e a umidade do solo inicial são as variáveis independentes que se destacam para todos os MIT's analisados, em contrapartida, o TLE, o TPE, o TR e a precipitação antecedente apresentam importância relativa nula ou insignificante na maioria dos casos observados.

Os resultados obtidos são bastante semelhantes no que se trata dos valores do coeficiente de determinação, entre 59% e 68%, e GCV, entre 0,36 e 0,51. Portanto, o MIT de 6 horas foi escolhido por apresentar o maior coeficiente de determinação, e a equação obtida apresenta 27 termos e 45 funções básicas, em que é composta por 10 variáveis independentes. Abaixo está apresentada a Equação 15 para o MIT de 6 horas.

$$\begin{aligned} S_{max} = & 0,78 + 0,03 \cdot \max(0; \text{Prec.}-30,99) - 0,06 \cdot \max(0; 30,99-\text{Prec.}) - 2,81 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,048) - 0,068 \cdot \max(0; 9,14-\text{Max}30) + 0,18 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,048) \cdot \max(0; 22,35-\text{Prec.}) + \\ & 28,21 \cdot \max(0; 0,048-\theta_{init}) \cdot \max(0; \text{Veg.}) + 0,095 \cdot \max(0; 9,91-\text{PR}) + 0,002 \cdot \max(0; 396,38-\text{TLE}) + 0,16 \cdot \max(0; \text{Max}30-9,14) \cdot \max(0; \text{Veg.}) - 0,0008 \cdot \max(0; 396,38-\text{TLE}) \cdot \max(0; \text{Veg.}) \\ & + 0,031 \cdot \max(0; \text{Max}30-9,14) \cdot \max(0; \text{TR}-6,88) - 0,019 \cdot \max(0; \text{Max}30-9,14) \cdot \max(0; 6,88-\text{TR}) - 0,00005 \cdot \max(0; \text{Max}30-9,14) \cdot \max(0; \text{TPE}-260,28) + 0,0005 \cdot \max(0; \text{Max}30-9,14) \cdot \max(0; 260,28-\text{TPE}) \\ & + 0,044 \cdot \max(0; 42,88-\text{D}) - 0,00004 \cdot \max(0; \text{Prec.}-24,64) \cdot \max(0; 396,38-\text{TLE}) - 0,00007 \cdot \max(0; 24,64-\text{Prec.}) \cdot \max(0; 396,38-\text{TLE}) - 0,002 \cdot \max(0; 42,88-\text{D}) \cdot \max(0; 16,51-\text{PR}) \\ & - 2,03 \cdot \max(0; 0,048-\theta_{init}) \cdot \max(0; \text{PR}-3,81) + 3,12 \cdot \max(0; 0,048-\theta_{init}) \cdot \max(0; 5,33-\text{AP}5) + 0,58 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,26) \cdot \max(0; \text{Prec.}-30,99) - 3,93 \cdot \max(0; 0,048-\theta_{init}) \cdot \max(0; 5,27-\text{D}) \\ & + 0,002 \cdot \max(0; 30,99-\text{Prec.}) \cdot \max(0; \text{TR}-3,75) - 2,43 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,25) \cdot \max(0; 9,91-\text{PR}) + 0,62 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,24) \cdot \max(0; 30,99-\text{Prec.}) - 0,33 \cdot \max(0; \theta_{init}-0,17) \cdot \max(0; \text{Prec.}-30,99) \end{aligned}$$

Equação 15

A Tabela 24 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 6 horas. Há correlações positivas, negativas e nulas entre as diversas variáveis independentes. Entre as correlações positivas, destacam-se a correlação entre TPE e TLE com um valor de 78%; Prec e D com um valor de 63% e PR e Max – 30 com um valor de 59%. Foi observado, também, correlações negativas entre θ_{init} e TPE com valor de -25% e entre TPE e AP5 com valor de -24%. E ainda há correlações quase nulas entre TLE e Prec. e AP48 e PR.

Tabela 24 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 6 horas na estação pluviográfica 04

	<i>S_{max}</i>	θ_{init}	<i>D</i>	<i>Prec.</i>	<i>Max30</i>	<i>AP48</i>	<i>AP5</i>	<i>TLE</i>	<i>TPE</i>	<i>TR</i>	<i>PR</i>
<i>S_{max}</i>	100%										
θ_{init}	-17%	100%									
<i>D</i>	23%	14%	100%								
<i>Prec.</i>	47%	15%	63%	100%							
<i>Max30</i>	57%	-5%	11%	58%	100%						
<i>AP48</i>	2%	11%	7%	6%	1%	100%					
<i>AP5</i>	2%	24%	10%	9%	1%	56%	100%				
<i>TLE</i>	-3%	-20%	-7%	-1%	9%	-16%	-22%	100%			
<i>TPE</i>	-3%	-25%	-10%	-3%	10%	-14%	-24%	78%	100%		
<i>TR</i>	12%	-12%	37%	13%	-4%	-4%	-1%	4%	1%	100%	
<i>PR</i>	37%	-18%	-11%	24%	59%	-1%	-2%	9%	9%	16%	100%

Foi realizado a simplificação das equações, nas quais foram modeladas as novas equações observando apenas as variáveis que apresentaram maior importância relativa (Tabela 25).

Tabela 25 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos na bacia experimental

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	24%	46%	38%	41%	0%	41%	30%
D (h)	0%	25%	0%	0%	11%	0%	23%
Prec. (mm)	27%	29%	42%	41%	43%	21%	27%
Max30 (mm)	34%	0%	0%	17%	29%	38%	20%
AP48 (mm)	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
TLE (h)	0%	0%	19%	0%	18%	0%	0%
TPE (h)	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%
TR (h)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PR (mm)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Veg	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
R ²	54%	55%	56%	58%	54%	59%	59%
GCV	0,45	0,41	0,46	0,46	0,54	0,49	0,56
Nº de termos	26	19	18	19	17	19	18
Função Básica	41	28	26	29	28	29	30

A simplificação do modelo provocou grande diminuição dos números de termos e funções básicas de cada equação obtida, porém mantendo coeficientes de determinação e GCV expressivos. Abaixo está apresentada a Equação 16 para o MIT de 6 horas simplificado.

$$\begin{aligned}
 S_{max} = & 2,77 - 0,033 \cdot \max(0; \text{Prec.} - 30,99) - 0,07 \cdot \max(0; 30,99 - \text{Prec.}) - \\
 & 30,06 \cdot \max(0; 0,048 - \theta_{init}) + 0,032 \cdot \max(0; \text{Max30} - 9,14) - 0,11 \cdot \max(0; 9,14 - \\
 & \text{Max30}) + 0,22 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,048) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 22,35) + 2,94 \cdot \max(0; 0,048 - \\
 & \theta_{init}) \cdot \max(0; 14,48 - \text{Max30}) + 2,33 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,26) \cdot \max(0; \text{Max30} - 9,14) + \\
 & 0,0094 \cdot \max(0; 7,37 - \text{Prec.}) \cdot \max(0; 9,14 - \text{Max30}) + 8,07 \cdot \max(0; 0,048 - \\
 & \theta_{init}) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 30,73) + 0,05 \cdot \max(0; \text{Prec.} - 53,85) - 0,43 \cdot \max(0; \theta_{init} - \\
 & 0,13) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 30,99) - 6,21 \cdot \max(0; 0,048 - \theta_{init}) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 39,37) - \\
 & 1,60 \cdot \max(0; 0,048 - \theta_{init}) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 16,00) - 0,15 \cdot \max(0; \theta_{init} - \\
 & 0,048) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 79,25) + 0,24 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,07) \cdot \max(0; 30,99 - \text{Prec.}) - \\
 & 7,20 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,088) + 0,67 \cdot \max(0; \theta_{init} - 0,30) \cdot \max(0; \text{Prec.} - 41,91)
 \end{aligned}
 \tag{Equação 16}$$

A Tabela 26 resume os resultados estatísticos da variável dependente, $S_{máx}$, a partir dos eventos chuvosos obtidos através da seleção do MIT mais representativo para o estudo de cada estação e para a bacia experimental. Já a Figura 27 mostra a importância relativa das variáveis independentes para os MIT's selecionados para cada estação pluviográfica.

Para o estudo, os MIT's de 6 horas e 8 horas foram os mais representativos para o estudo e observou-se também que os resultados obtidos em cada estação pluviográfica para

o MIT de 6 horas e 8 horas são bastante semelhantes, com exceção da estação pluviográfica 03. Este por sua vez é a estação com menor número de eventos chuvosos analisados devido as limitações dos dados, portanto estudos futuros são importantes para o melhoramento do modelo a partir da utilização de um banco de dados mais consistente.

Tabela 26 – Resumo estatístico da variável dependente, Smax, utilizados para calibração e validação do modelo do escoamento lento

	MIT		n	Média	Mediana	DP	Máx	Min
Est Pluv 01	8h	Calibração	196	1,12	0,76	1,03	3,94	0,05
		Validação	66	0,96	0,62	0,85	3,54	0,10
Est Pluv 02	6h	Calibração	267	1,26	0,92	1,08	3,94	0,06
		Validação	89	1,37	1,25	1,02	3,69	0,06
Est Pluv 03	1h	Calibração	104	0,73	0,50	0,69	3,81	0,02
		Validação	35	0,91	0,64	0,80	3,73	0,01
Est Pluv 04	8h	Calibração	214	0,90	0,45	0,98	3,90	0,07
		Validação	71	0,96	0,51	1,03	3,96	0,08
Bacia experimental	6h	Calibração	772	1,04	0,64	0,99	3,96	0,02
		Validação	257	1,14	0,79	1,03	3,94	0,05

Observando a Tabela 26 observa-se uma pequena variação dos valores médios para calibração e validação, porém constata-se que a variável dependente, Smáx, apresentou resultados médios para calibração e validação em torno de $1 \text{ m}^3\text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$, e, também, todas as estações apresentaram valores máximo para Smax próximo do valor máximo adotado para os escoamentos lentos ($4 \text{ m}^3\text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$).

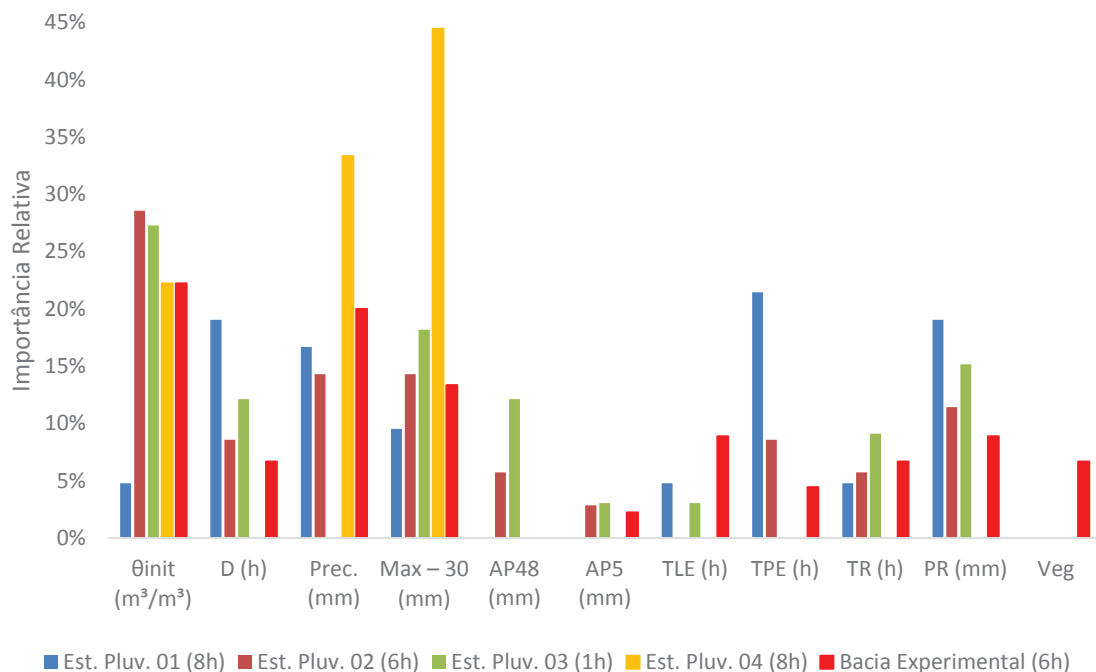


Figura 27 - Variáveis independentes utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos lentos

Já a Figura 27 mostra grande importância da precipitação acumulada, umidade do solo inicial, duração e precipitação máxima em 30 minutos. Por outro lado, a precipitação acumulada em 48 horas e 5 dias, TLE, TPE, tempo de reação do sensor e vegetação apresentaram resultados com importância relativa baixa ou até mesmo nula, com exceção do TPE para a estação 01. Já a precipitação de reação obteve resultados consideráveis, pois obteve resultados importantes principalmente para a estação pluviográfica 01 e 03, porém apresentaram valores pequenos ou nulos para as demais estações.

5.6 Calibração do modelo para escoamento rápido através dos diferentes MIT

A realização das análises para o escoamento rápido foi realizada agrupando os eventos das estações pluviográficas 01 e 02, pois as estações 03 e 04 não apresentaram eventos com características do escoamento rápido, e este agrupamento é necessário, pois o número de eventos seria insuficiente para aplicação da técnica MARS separadamente para cada estação. Logo, a Tabela 27 apresenta os resultados obtidos para os dados de todas as estações para o escoamento rápido, onde todos os resultados apresentados são para um grau de interação igual a 2.

Tabela 27 – Variáveis independentes, que foram obtidas através dos eventos chuvosos com os diversos MIT's, utilizadas no modelo e suas importâncias relativas para explicar os escoamentos rápidos na bacia experimental

	1h	2h	3h	6h	8h	12h	24h
θ_{init} (m ³ /m ³)	0%	21%	8%	20%	27%	33%	0%
D (h)	6%	0%	0%	13%	0%	11%	0%
Prec. (mm)	25%	21%	8%	13%	33%	22%	75%
Max30 (mm)	19%	0%	17%	7%	0%	0%	0%
AP48 (mm)	6%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
AP5 (mm)	13%	14%	13%	0%	0%	0%	0%
TLE (h)	0%	0%	4%	0%	7%	0%	0%
TPE (h)	0%	0%	4%	7%	0%	0%	0%
TR (h)	0%	0%	13%	0%	7%	0%	0%
PR (mm)	6%	0%	0%	7%	0%	0%	0%
Veg	25%	36%	33%	33%	27%	33%	25%
R ²	93%	90%	93%	94%	91%	72%	40%
GCV	12,25	17,4	34,62	9,06	22,7	35,98	62,91
N° de termos	9	9	14	9	10	6	4
Função Básica	16	14	24	15	15	9	4

A vegetação, precipitação acumulada e a umidade do solo inicial são as variáveis independentes que se destacam para todos os MIT's analisados, em contrapartida, o TLE, o TPE, o TR e a precipitação antecedente apresentam importância relativa nula ou insignificante na maioria dos casos observados.

Os resultados obtidos são bastante semelhantes no que se trata dos valores do coeficiente de determinação, entre 90% e 94%. Porém, o MIT de 6 horas foi escolhido por apresentar o maior coeficiente de determinação e o menor valor de GCV, igual a 9,06. A equação obtida apresenta 9 termos e 15 funções básicas, em que é composta por sete variáveis independentes. Abaixo está apresentada a Equação 17 para o MIT de 6 horas.

$$\begin{aligned} S_{\max} = & 9,73 + 1,78 * \max(0; 0,089 - \theta_{\text{init}}) * \max(0; \text{Prec.} - 71,88) + 19,35 * \max(0; \text{Veg.}) - \\ & 88,90 * \max(0; \theta_{\text{init}} - 0,06) * \max(0; \text{Veg.}) - 544,24 * \max(0; 0,062 - \theta_{\text{init}}) * \max(0; \text{Veg.}) + \\ & 0,04 * \max(0; \text{Prec.} - 71,88) * \max(0; 7,11 - \text{PR}) - 0,76 * \max(0; 15,49 - \text{Max30}) * \max(0; \text{Veg.}) \\ & + 0,004 * \max(0; 11,22 - D) * \max(0; \text{TPE} - 209,02) - 0,21 * \max(0; 23,95 - D) * \max(0; \text{Veg.}) \end{aligned} \quad \text{Equação 17}$$

A Tabela 28 mostra a matriz de correlação das variáveis obtidas a partir dos eventos chuvosos para o MIT de 6 horas. Há correlações positivas e negativas entre as diversas variáveis independentes. Entre as correlações positivas, destacam-se a correlação entre Prec. e D com um valor de 77% e TLE e TPE com um valor de 44%. Foi observado, também, correlações negativas entre AP48 e TLE com valor de -44% e entre θ_{init} e TLE com valor de -37%. E ainda há correlações quase nulas entre TPE e PR.

Tabela 28 - Matriz de Correlação das variáveis independentes obtidas para o MIT de 8 horas na estação pluviográfica 04

	<i>S_{max}</i>	θ_{init}	<i>D</i>	<i>Prec.</i>	<i>Max30</i>	<i>AP48</i>	<i>AP5</i>	<i>TLE</i>	<i>TPE</i>	<i>TR</i>	<i>PR</i>
<i>S_{max}</i>	100%										
θ_{init}	1%	100%									
<i>D</i>	35%	29%	100%								
<i>Prec.</i>	44%	19%	77%	100%							
<i>Max30</i>	16%	-10%	-9%	37%	100%						
<i>AP48</i>	4%	19%	32%	25%	13%	100%					
<i>AP5</i>	-3%	13%	-4%	-6%	9%	25%	100%				
<i>TLE</i>	-16%	-37%	-20%	-26%	-19%	-44%	-37%	100%			
<i>TPE</i>	4%	-26%	-17%	-14%	-11%	-30%	-19%	44%	100%		
<i>TR</i>	16%	27%	38%	17%	-15%	4%	-18%	5%	-7%	100%	
<i>PR</i>	-13%	-4%	-31%	-15%	23%	12%	-6%	-5%	1%	16%	100%

A Tabela 29 resume os resultados estatísticos da variável dependente, *Smáx*, a partir dos eventos chuvosos obtidos através da seleção do MIT mais representativo para o estudo de cada estação e para a bacia experimental.

Tabela 29 - Resumo estatístico do eventos chuvosos utilizados para calibração e validação do modelo do escoamento rápido

	$S_{m\acute{a}x}$ $m^3 m^{-3} * \frac{10^4}{60 min}$		n	Média	Mediana	DP	Máx	Min
Bacia experimental	>8	Calibração	40	15,05	11,02	7,60	37,22	8,34
		Validação	13	16,00	12,91	8,34	31,07	8,27

5.7 Validação dos modelos

A validação da estação pluviográfica 01 está apresentada na Figura 28 para o modelo completo e o simplificado. Os resultados obtidos para os modelos, coeficiente de determinação, RMSE e BIAS, são semelhantes e que de uma forma geral há uma superestimação dos valores previstos (valor de bias positivo), principalmente para valores mais elevados de Smax.

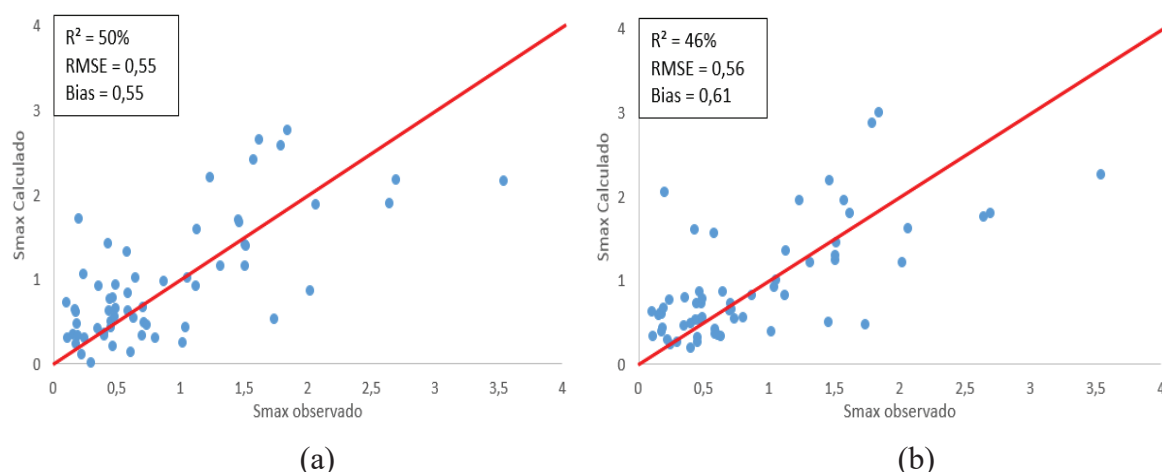


Figura 28 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 01 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada

A validação da estação pluviográfica 02 está apresentada na Figura 29 para o modelo completo e simplificado. Os resultados obtidos para os modelos mostram grande dispersão das informações, principalmente, para o modelo simplificado, que resultou em valores elevados de RMSE (1,32) e Bias (2,51). Para o modelo completo, observou-se que ocorre dispersão maior dos resultados ocorrem quando há a superestimação dos valores e que os valores subestimados estão mais próximos dos valores observados, com exceção de alguns casos.

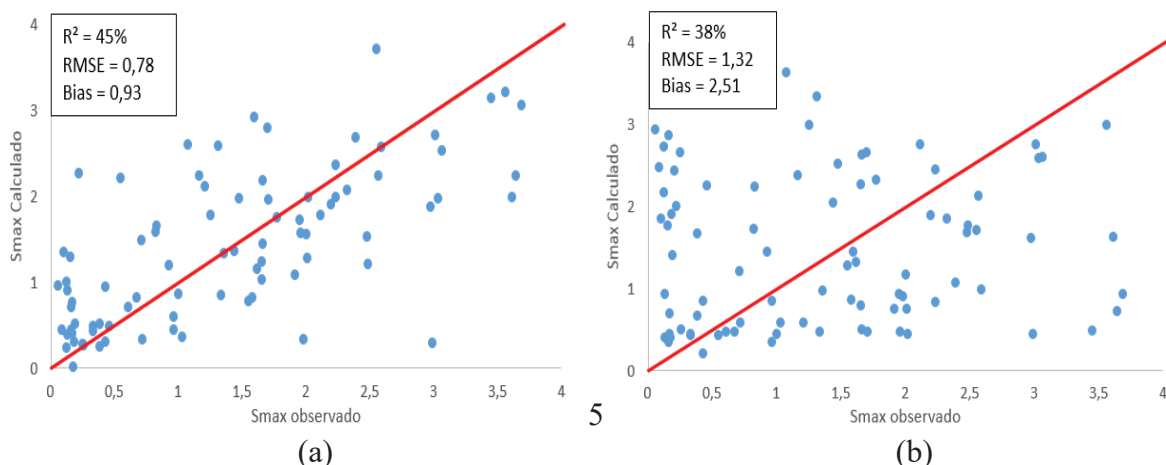


Figura 29 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 02 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada

Já a estação pluviográfica 03, Figura 30, apresentou coeficiente de determinação significativo tanto para a equação completa como para a equação simplificada, 73% e 66% respectivamente, assim como pequenos valores para RMSE e Bias. Este último indicando que o modelo obtido realiza pequenas superestimação dos valores.

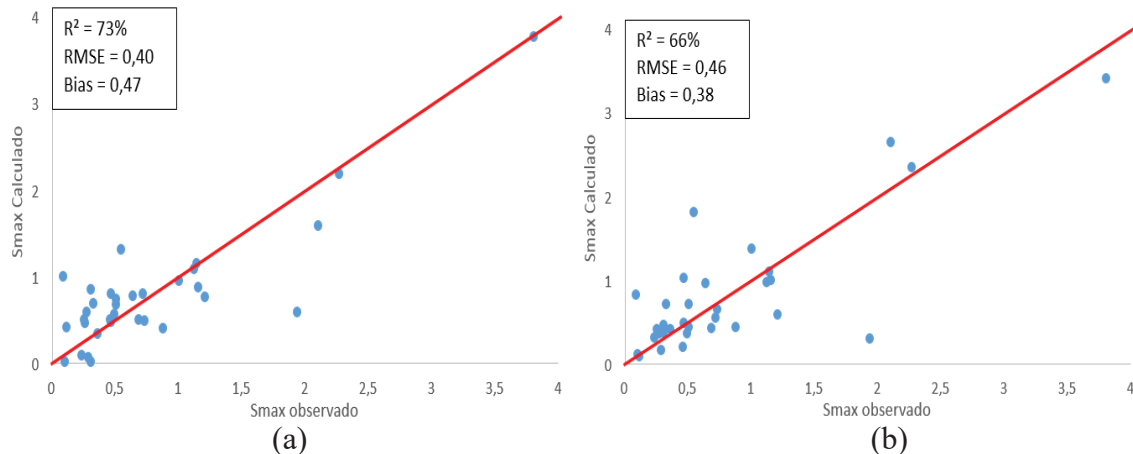


Figura 30 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 03 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada

A estação pluviográfica 04, Figura 31, apresentou melhor resultado para o modelo completo, em que observou-se uma melhor adequação do modelo para os valores baixos de Smax e uma maior dispersão para valores maiores. De uma forma geral, houve uma superestimação dos valores calculados para ambos os modelos.

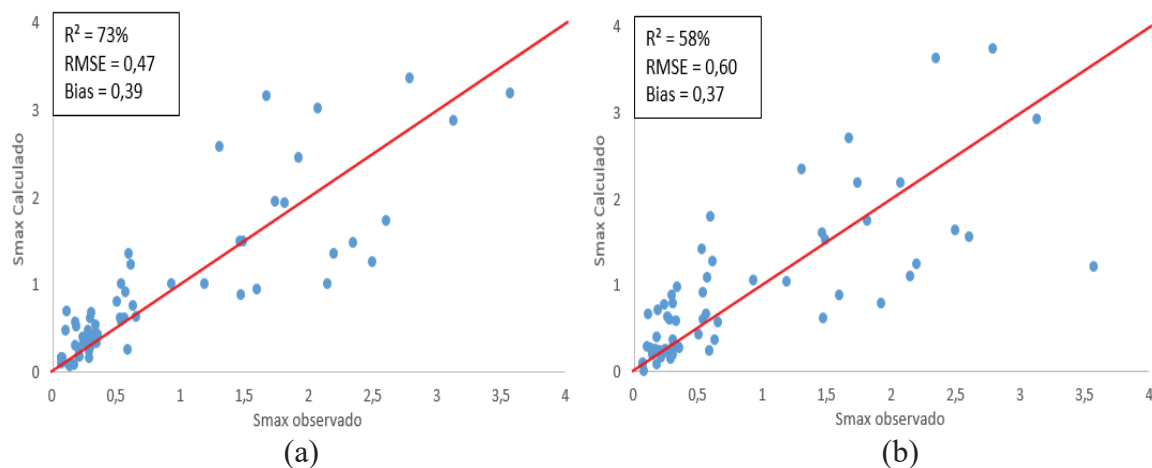


Figura 31 – Gráfico de dispersão da estação pluviográfica 04 mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada

A validação da bacia experimental para o escoamento lento está apresentada na Figura 32 para o modelo completo e simplificado. Os resultados obtidos para os modelos mostram grande dispersão das informações, principalmente, para o modelo completo, que resultou em valores elevados de RMSE (0,91) e Bias (0,71). Para o modelo simplificado, os resultados obtidos foram superiores ao modelo completo e também observou-se que ocorre dispersão maior dos resultados ocorrem quando há a superestimação dos valores e que os valores subestimados estão mais próximos dos valores observados, com exceção de casos para valores de Smax maiores que $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

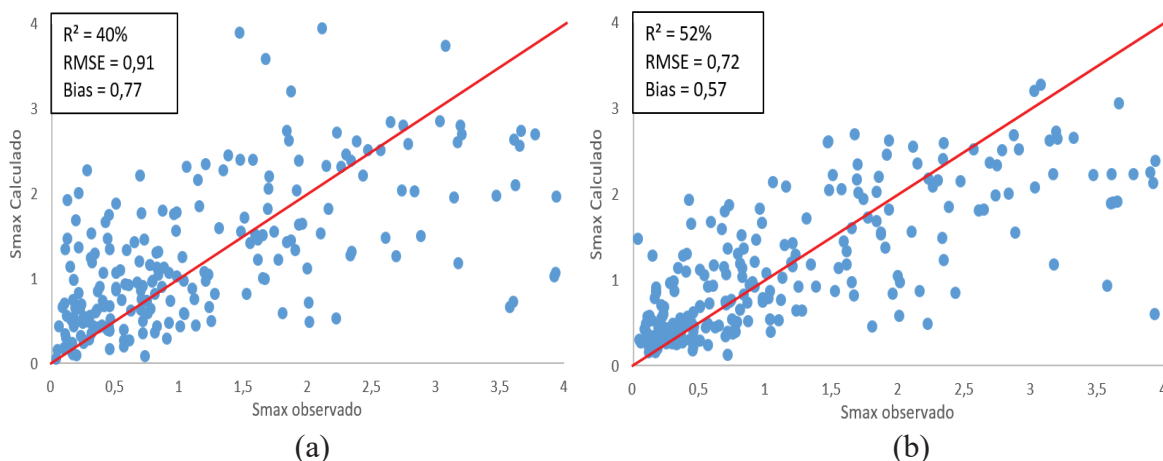


Figura 32 – Gráfico de dispersão da bacia experimental mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento lento desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS (a) Equação Completa (b) Equação Simplificada

Obeve-se para o modelo do escoamento rápido da bacia experimental, Figura 33, um coeficiente de determinação igual a 38%, um valor de bias igual a 0,31, indicando uma superestimação dos valores previstos, e uma raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) igual a 6,75. Porém, observa-se que o modelo levou a valores constantes para algumas informações, sendo necessário um número maior de eventos para uma melhor calibração do modelo.

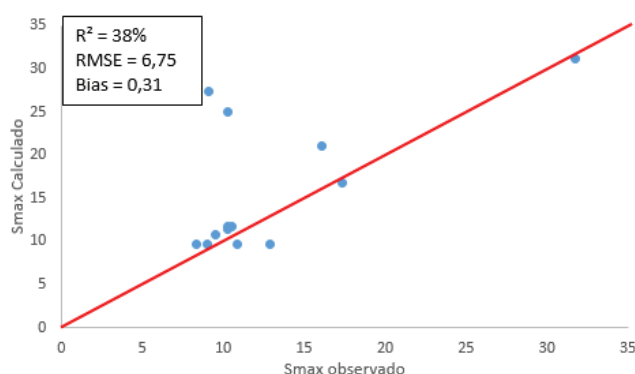


Figura 33 – Gráfico de dispersão da bacia experimental mostrando os valores registrados pelo sensor contra os valores calculados pelo modelo de escoamento rápido desenvolvido pelo Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS

5.8 Adequação do método para identificar os tipos de processos de umedecimento do solo

Os altos valores do coeficiente de determinação obtidos entre $S_{m\acute{a}x}$ e o incremento total de umidade do solo (Tabela 30) indicam que uma grande parte da variação total da umidade do solo causado pelo evento chuvoso pode ser adequadamente explicado por sua máxima variação em 60 minutos. Bem como determinar quais processos de umedecimento do solo ocorreram num dado evento chuvoso a partir da variação máxima da umidade do solo.

Tabela 30 – Coeficiente de determinação (R^2) entre valores de $S_{m\acute{a}x}$ e incremento máximo da umidade do solo ($\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init}$) produzido pelos eventos chuvosos para da estação pluviográfica e cada MIT estudado

MIT	Est. Pluv. 1	Est. Pluv. 2	Est. Pluv. 3	Est. Pluv. 4	Bacia experimental
1h	84%	91%	72%	81%	84%
2h	82%	91%	73%	83%	83%
3h	81%	92%	72%	84%	83%
6h	81%	89%	75%	85%	80%
8h	80%	89%	75%	58%	80%
12h	80%	88%	57%	55%	79%
24h	82%	85%	45%	56%	76%

Os resultados obtidos mostram que uma equação linear se adequa melhor para a estação pluviográfica 01 (Figura 34) e para a bacia experimental (Figura 38), ambas obtiveram um coeficiente de determinação igual a 84%. Por outro lado, as estações pluviográficas 02, 03 e 04 obtiveram como melhor resultado uma equação polinomial de grau dois com um coeficiente de determinação respectivamente igual a 92% (Figura 35), 75% (Figura 36) e 85% (Figura 37).

Observa-se também que os coeficientes de determinação de cada estação obtidos para os diversos MIT's não apresentam grande variação se comparados com o melhor resultado obtido, com exceção do MIT de 12 horas e 24 horas da estação pluviográfica 03 e o MIT de 8 horas, 12 horas e 24 horas da estação pluviográfica 04. Estas variações no coeficiente de determinação são provocadas pela variação do MIT, pois esta variação provoca a agregação de eventos chuvosos e consequentemente ocorre a eliminação dos valores menores de $S_{m\acute{a}x}$ e a alteração dos valores de $\theta_{m\acute{a}x}$ e θ_{init} para cada evento analisado.

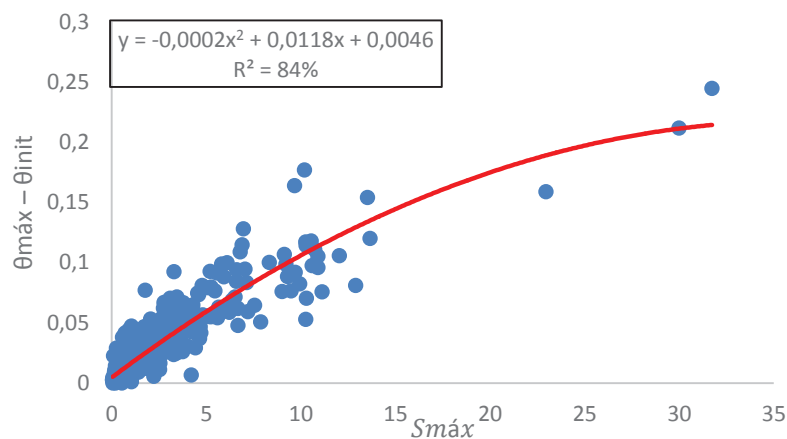


Figura 34 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{m\acute{a}x}$ e $(\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 01, com MIT de 1 hora

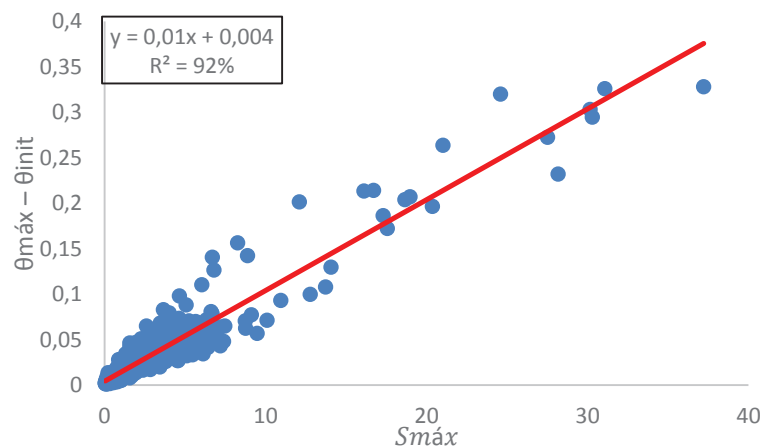


Figura 35 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{m\acute{a}x}$ e $(\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 02, com MIT de 3 horas

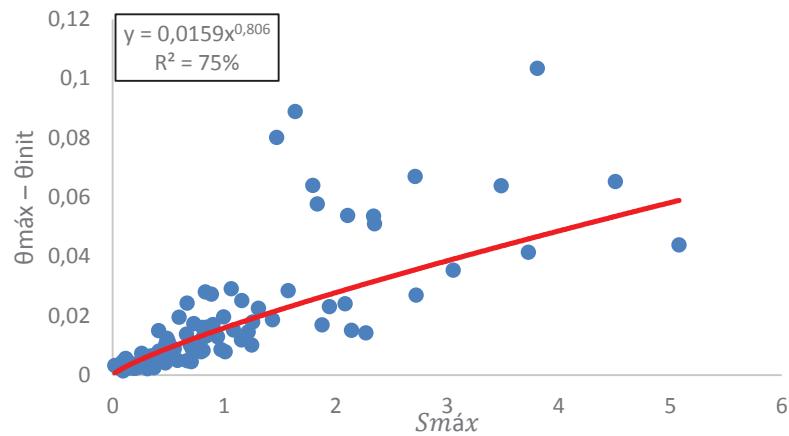


Figura 36 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 03, com MIT de 6 horas

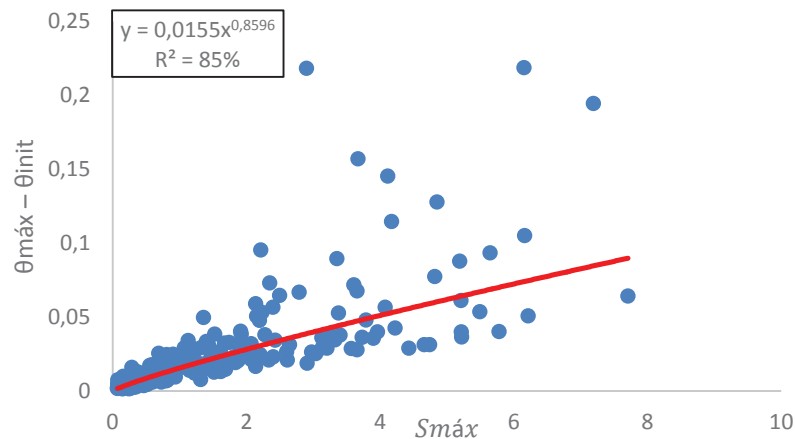


Figura 37 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na estação pluviográfica 04, com MIT de 6 horas

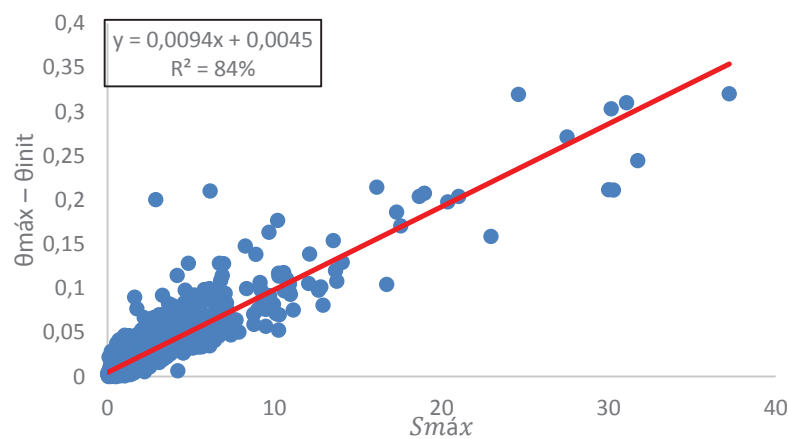


Figura 38 – Gráfico de dispersão entre os valores de $S_{máx}$ e $(\theta_{máx} - \theta_{init})$ produzidos por eventos chuvosos, na bacia experimental, com MIT de 1 hora

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O monitoramento da umidade do solo é primordial para observar a dinâmica da umidade em cada estação de monitoramento, para detectar as diferenças existentes entre elas, para observar a continuidade dos dados e também analisar e detectar erros de medição, como, por exemplo, os erros observados à meia noite. A estação 02 apresentou os maiores picos de umidade e maior velocidade na variação da umidade, enquanto que as estações 03 e 04 apresentaram valores mais constantes com velocidade de variação mais lentos. Por fim, a estação 01, com vegetação composta por árvores do tipo mata atlântica, apresentou os menores valores de umidade.

Para os 7 diferentes valores para o Mínimo Intervalo de Tempo entre eventos (1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 8 h, 12 h e 24 h), observou-se que seu aumento reduz entre 40% a 47% o número de eventos. Consequentemente, as variáveis independentes utilizadas sofreram alterações nos valores sendo por vezes proporcionais ao aumento do MIT, como é o caso da duração do evento chuvoso e precipitação acumulada, porém, às vezes foram inversamente proporcionais ao aumento do MIT, como é o caso da umidade do solo inicial e as precipitações acumuladas de 48 horas e 5 dias. Estas alterações provocadas pela variação do MIT trouxeram como consequência a variação da importância relativa de cada variável independente para o modelo, diferentes coeficientes de determinação, GCV, número de termos e funções básicas.

A calibração dos modelos para escoamento lento para cada estação pluviográfica e para a bacia experimental levaram a diferentes interações entre as variáveis independentes, bem como, a variação da importância de cada uma delas para o modelo. O número de funções básicas, o número de termos da equação, o coeficiente de determinação e o GCV foram elementos utilizados para determinar a equação que melhor representa o modelo. Logo, observou-se o MIT de 8 horas como a melhor resposta para as estações pluviográficas 01 e 04, o MIT de 6 horas para a estação 02 e bacia experimental e o MIT de 1 hora para a estação 03. Quanto as variáveis independentes, observou-se que a umidade inicial do solo, a precipitação acumulada, a precipitação máxima em 30 minutos e a duração do evento chuvoso foram variáveis de grande importância para todos os modelos de escoamento lento, ao contrário das variáveis: precipitação acumulada em 48 horas e 5 dias, vegetação, tempo decorrido até o último evento e o tempo necessário para reação do sensor. No entanto, a estação pluviográfica 01 apresentou TPE como variável de maior importância para o modelo, divergindo, assim, com as demais estações. A precipitação de reação obteve resultados

consideráveis, pois apresentou resultados importantes principalmente para a estação pluviográfica 01 e 03, porém apresentaram valores pequenos ou nulos para as demais estações.

As validações dos modelos de escoamento lento obtiveram como resultado uma superestimação dos valores previstos muitas vezes provocados por valores de S_{max} pequenos, por outro lado os valores maiores se adaptaram melhor a técnica utilizada. Por outro lado, a validação do modelo do escoamento rápido trouxe resultados significantes, porém, a equação obtida resultou em valores constantes para alguns eventos. Isto pode ser provocado pela falta de eventos chuvosos para uma melhor calibração do modelo.

Valores significantes do coeficiente de determinação, entre 45% e 92%, obtidos entre S_{max} e o incremento total máximo da umidade do solo ($\theta_{m\acute{a}x} - \theta_{init}$) indica que a variação total da umidade do solo causado pelo evento chuvoso pode ser adequadamente explicada por sua máxima variação em 60 minutos. Destacando também que os resultados obtidos se adequaram melhor para equações polinomiais de 2º grau, linear e exponencial.

Portanto, a classificação dos diferentes tipos de processos de umedecimento do solo e determinação dos fatores que afetam estes processos podem ser satisfatoriamente determinados através de sensores de umidade do solo do tipo TDR (*Time Domain Reflectometer*) usando a inclinação máxima de umedecimento causado por um evento chuvoso como variável delimitadora dos processos de umedecimento do solo.

A continuação do monitoramento da precipitação e umidade do solo é essencial para a reaplicação futura desta metodologia para essa mesma região com uma maior quantidade de informações objetivando encontrar melhores resultados que os apresentados neste trabalho, bem como, a aplicação desta metodologia em outras áreas de estudo. O acréscimo de outras variáveis como a evapotranspiração e a variação do nível do lençol freático podem trazer grandes benefícios para a calibração dos modelos. A evapotranspiração poderá influenciar nos resultados obtidos para a estação 01, pois é uma área coberta pela mata atlântica. Já o nível estático pode influenciar nos resultados das estações pluviográficas 03 e 04, pois o nível observado nestas estações estão próximas da sonda TDR.

Um outro estudo que deve ser observado é a análise da influência do lençol freático na dinâmica da umidade do solo nas estações pluviográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAIRE, S.; ROULIER, S.; CESSNA, A. J. **Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques.** Journal of Hydrology. v. 378, p. 179 – 204, 2009.

BARBOSA, L. R. **Relações precipitação-umidade do solo-vazão de eventos sub-diários em bacias experimentais do NE brasileiro.** 2015. 138p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

BONTA, J. V.; RAO, A. R. **Factors affecting the identification of independent storm events.** Journal of Hydrology, v. 98, n. 3–4, p. 275–293, 1988.

BROCCA, L.; TULLO, T.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. **Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability.** Journal of Hydrology. v. 422 – 423, p. 63 – 75, 2012.

BROCCA, L.; MASSARI, C.; CIABATTA, L.; MORAMARCO, T.; PENNA, D.; ZUECCO, G.; PIANEZZOLA, L.; BORGA, M.; MATGEN, P.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. **Rainfall estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe : an evaluation of the SM2RAIN algorithm.** Journal of Hydrology and Hydromechanics. n. 2014, p. 201–209, 2015.

BROWN, B. G.; KATZ, R. W.; MURPHY, A. H. **Exploratory analysis of precipitation events with implications for stochastic modelling.** Journal of Climate and Applied Meteorology. v.24, p. 57 – 67, 1985.

CHO, E.; CHOI, M. **Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula.** Journal of Hydrology, v. 516, p. 317–329, 2014.

COELHO, V. H. R. **Monitoramento e análise da variação do nível d'água para estimativa da recarga do aquífero livre da bacia do Rio Gramame – PB.** 2011. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

CORDEIRO, L. E. P., ALBUQUERQUE, F. A., MONTENEGRO, S. M. L. G. **Evapotranspiração de referência em bacia experimental do riacho Gameleira, Pernambuco, usando o método Penman-Monteith da FAO.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, DF, 2015.

COUTINHO, J.; ALMEIDA, C. N.; LEAL, A. M. F.; BARBOSA, L. R. **Experimental basins in the Northeast of Brazil: investigation on the characteristics of the sub-daily rainfall.** In: 6th IAHS-EGU International Symposium on Integrated Water Resources Management, Bologna, Itália, 2014.

DUNKERLEY, D. **Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting.** Hydrological processes, v. 22 (22), p. 4415–4435, 2008.

EGLER, M. **Gerenciamento integrado de recursos hídricos no estado do Rio de Janeiro: ensaio de indicador para o estabelecimento da avaliação das relações entre qualidade da água e cobertura vegetal.** 2012. 315p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FIGUEIREDO, J. V. de; ARAÚJO, J. C. de; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A. C. **Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil.** *Hydrological Processes*. v. 30, p. 2390-2400, 2016

FONTES, A. S., ALVARES, D., MEDEIROS, Y. D. P. (2004). **Bacia Experimental do Rio do Cedro: Implantação e Primeiros Resultados.** VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, MA, 2004.

GARCIA, J. F. C. **Análise da precipitação no semiárido Potiguar.** 2011. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do aquífero Guarani.** 2009. 145p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos.

HE, Z.; ZHAO, W.; LIU, H.; CHANG, X. **The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains.** *Journal of Hydrology*. v. 420 – 421, p. 183 – 190, 2012.

LARSEN, M. L.; TEVES, J. B. **Identifying individual rain events with a dense disdrometer network.** *Advances in Meteorology*. 12p., 2015.

LIRA, N. B. **Análise da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na bacia experimental do riacho Guaraíra – Paraíba.** 2015. 126p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

LOZANO-PARRA, J; SCHAIK, N. L. M. B. van; SCHNABEL, S.; GÓMES-GUTIÉRREZ, Á. **Soil moisture dynamics at high temporal resolution in a semiarid Mediterranean watershed with scattered tree cover.** *Hydrological Processes*, v. 1170, n. October 2015, p. 1155–1170, 2015a.

LOZANO-PARRA, J.; SCHNABEL, S.; CEBALLOS-BARBANCHO, A. **The role of vegetation covers on soil wetting processes at rainfall event scale in scattered tree woodland of Mediterranean climate.** *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 951–961, 2015b.

MICHAELIDES, S; LEVIZZANI, V.; ANAGNOSTOU, E.; BAUER, P. KASPARIS, T.; LANE, J. E. **Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling.** *Atmospheric Research*, v. 94, n. 4, p. 512–533, 2009.

MITTELBAACH, H.; SENEVIRATNE, S. I. **A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: Temporal dynamics versus time-invariant contributions.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 7, p. 2169–2179, 2012.

MOLINA-SANCHIS, I.; LÁZARO, R.; ARNAU-ROSALÉN, E.; CALVO-CASES, A. **Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation.** Journal of Hydrology and Hydromechanics. n. 2008, p. 226–236, 2016.

PDRH. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame.** SEMARH/SCIENTEC. 2000.

QIU, Y.; FU, B.; WANG, J.; CHEN, L. **Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China.** Journal of Hydrology, v. 240, n. 3–4, p. 243–263, 2001.

REHISA. **Relatório Final da Caracterização das bacias experimentais do semiárido, IBESA – Implantação de bacias exp. do semiárido para o desenvolvimento de metodologias de avaliação dos balanços hídricos e energéticos em diferentes escalas temporais e espaciais.** Projeto integrado UFRN-UFCUFPB-UFCG-UFRPE-UFPE-UFBA, 2004, 143 p.

ROCHA, S. R. A. G. da. **Simulação do escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema.** 2008. 148p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceio.

ROMANO, N. **Soil moisture at local scale: Measurements and simulations.** Journal of Hydrology, v. 516, p. 6–20, 2014.

SANTOS, M. V. C dos. **Estudo do comportamento de um pequeno aquífero aluvial na bacia experimental de Santana do Ipanema: semiárido alagoano.** 2009. 138p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SHRESTHA, I. N.; KANSAKAR, B. R. **Comparison Of Preferential Flow Of Solute In Porous Media With Darcy ' s Flow.** International Journal of Scientific & Technology Research. v. 5, n. 7, p. 151–157, 2016.

TODISCO, F. **The internal structure of erosive and non-erosive storm events for interpretation of erosive processes and rainfall simulation.** Journal of Hydrology. v. 519, p. 3651 – 3663, 2014.

TOEBES, C.; OURYVAEV, V.: **Representative and experimental basin: an international guide for research and practice.** Studies and Reports in Hydrology, No. 4. UNESCO, Paris. 1973.

TRONCOSO, R. F. **Estudo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Jundiaí – RN visando a implantação de bacia experimental e a atenuação de cheias pela barragem Tabatinga.** 2012. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

VERECKEN, H.; HUISMAN, J. A.; PACHEPSKY, Y.; MONTZKA, C.; KRUK, J. van der; BOGENA, H.; WEIHERMULLER, L.; HERBST, M.; MARTINEZ, G.; VANDERBORGHT, J. **On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field**

scale. Journal of Hydrology, v. 516, p. 76–96, 2014.

ZUCCO, G; BROCCA, L.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. **Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring.** Journal of Hydrology, v. 516, p. 193–199, 2014.

**APÊNDICE A – PRECIPITAÇÃO E DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO
NAS ESTAÇÕES PLUVIOGRÁFICAS**

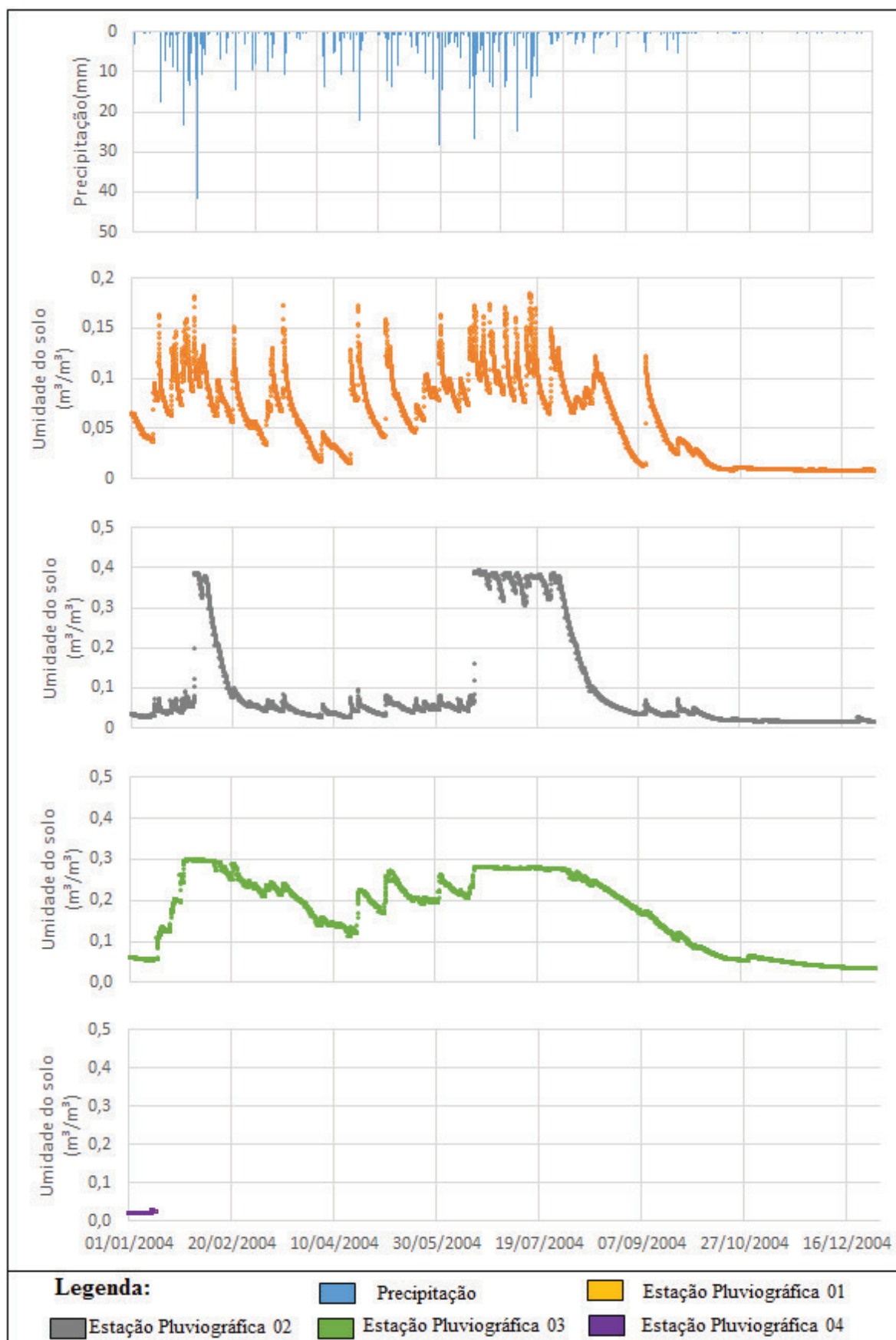


Figura 39 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2004 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

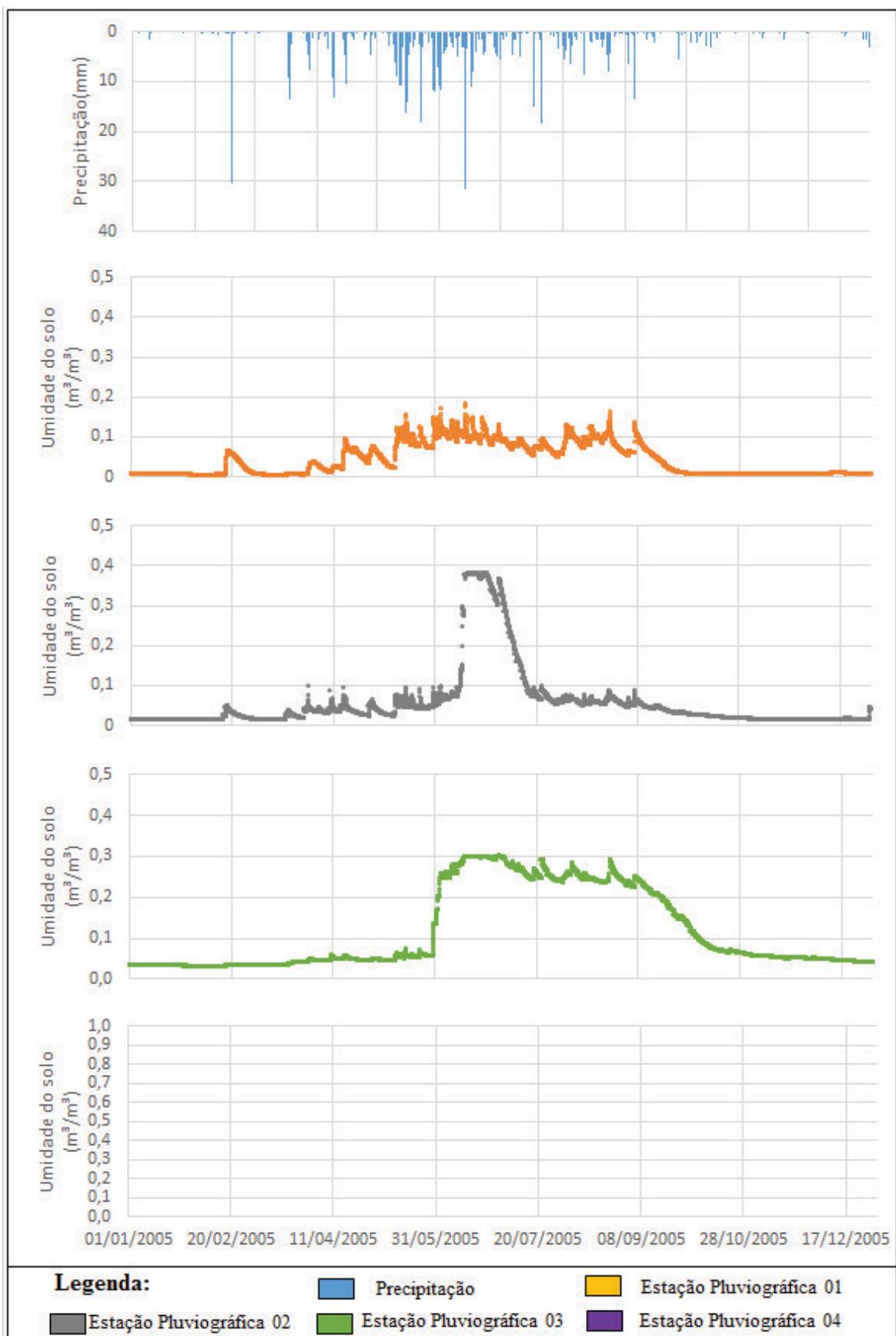


Figura 40 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2005 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

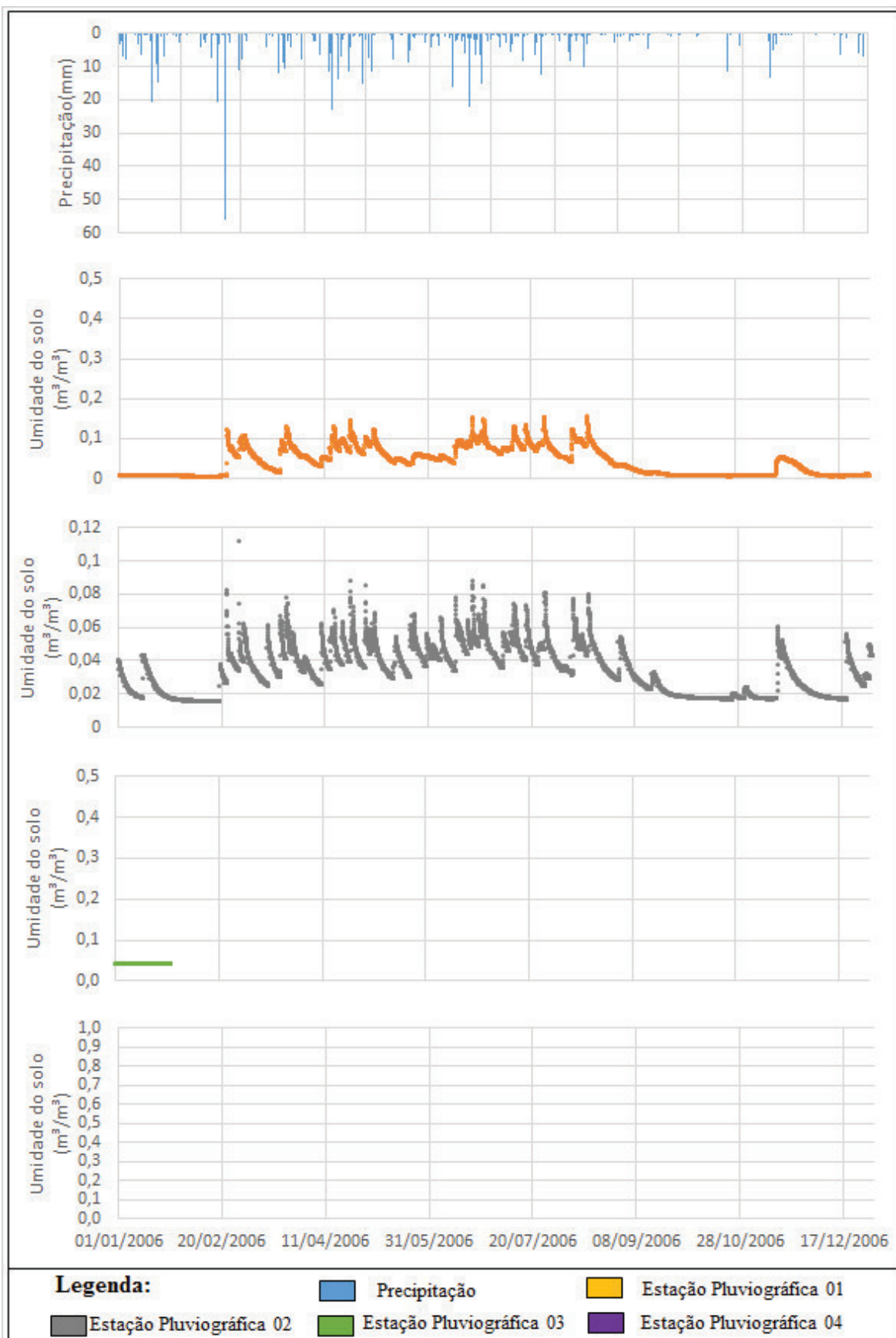


Figura 41 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2006 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

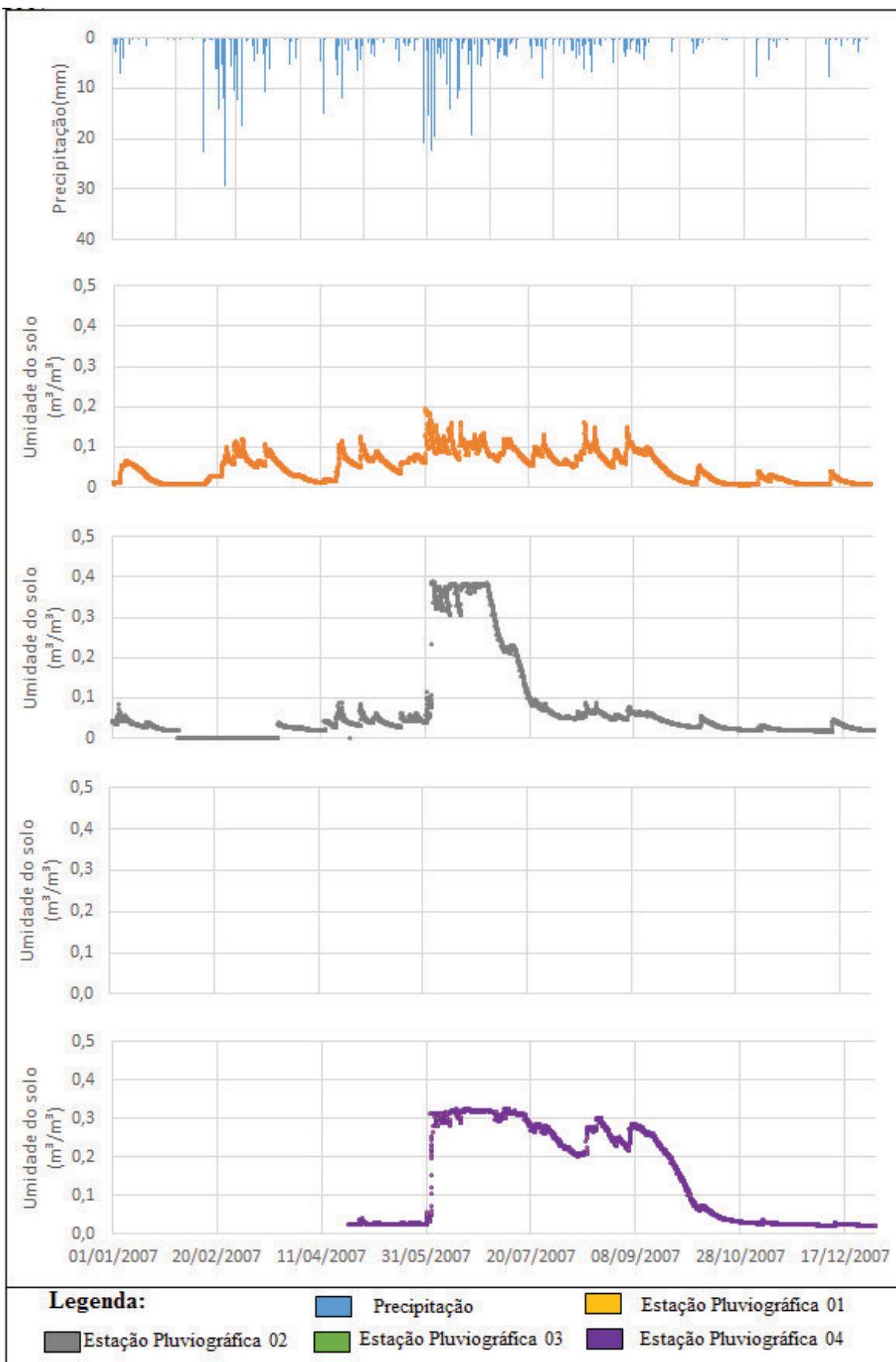


Figura 42 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2007 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

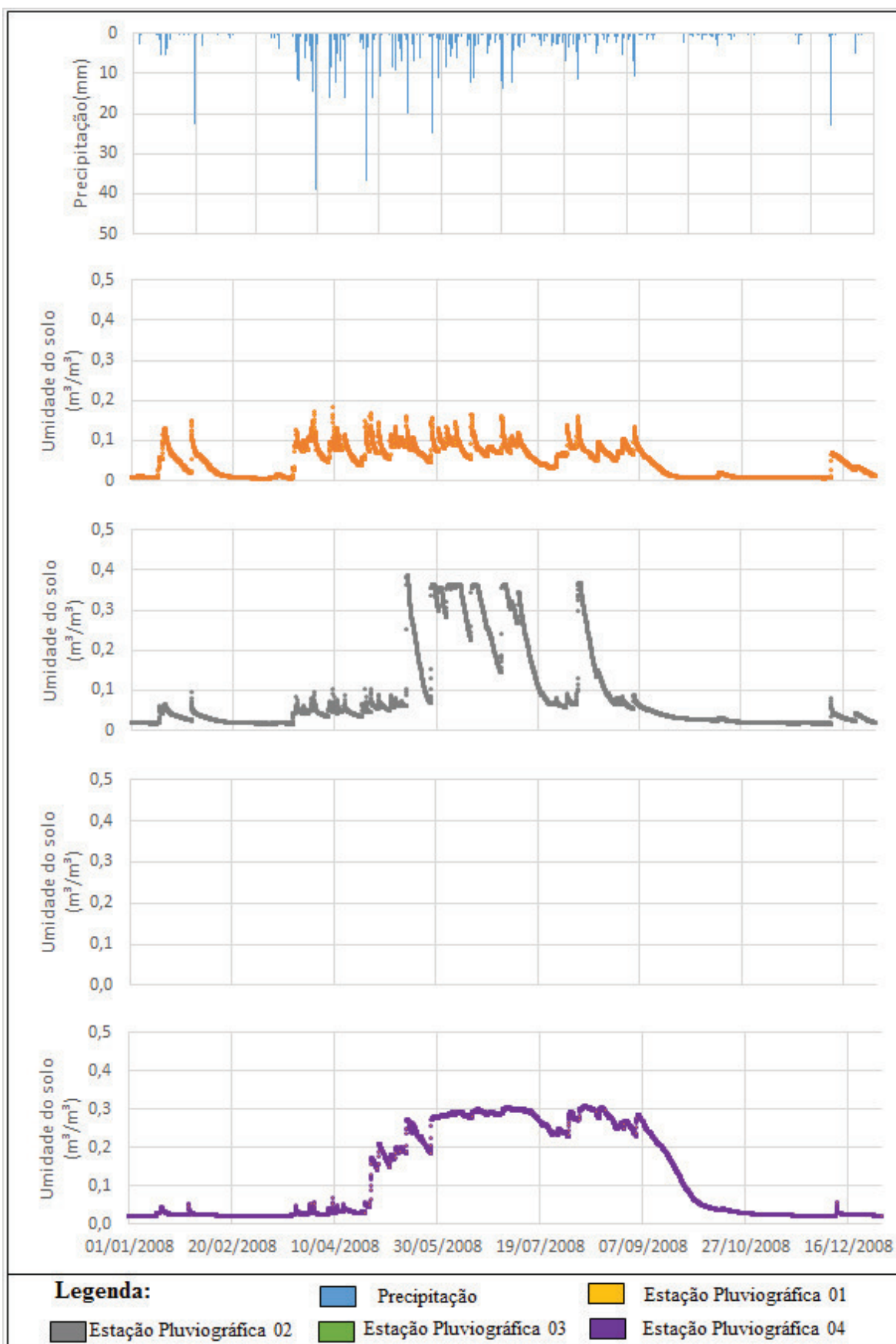


Figura 43 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2008 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

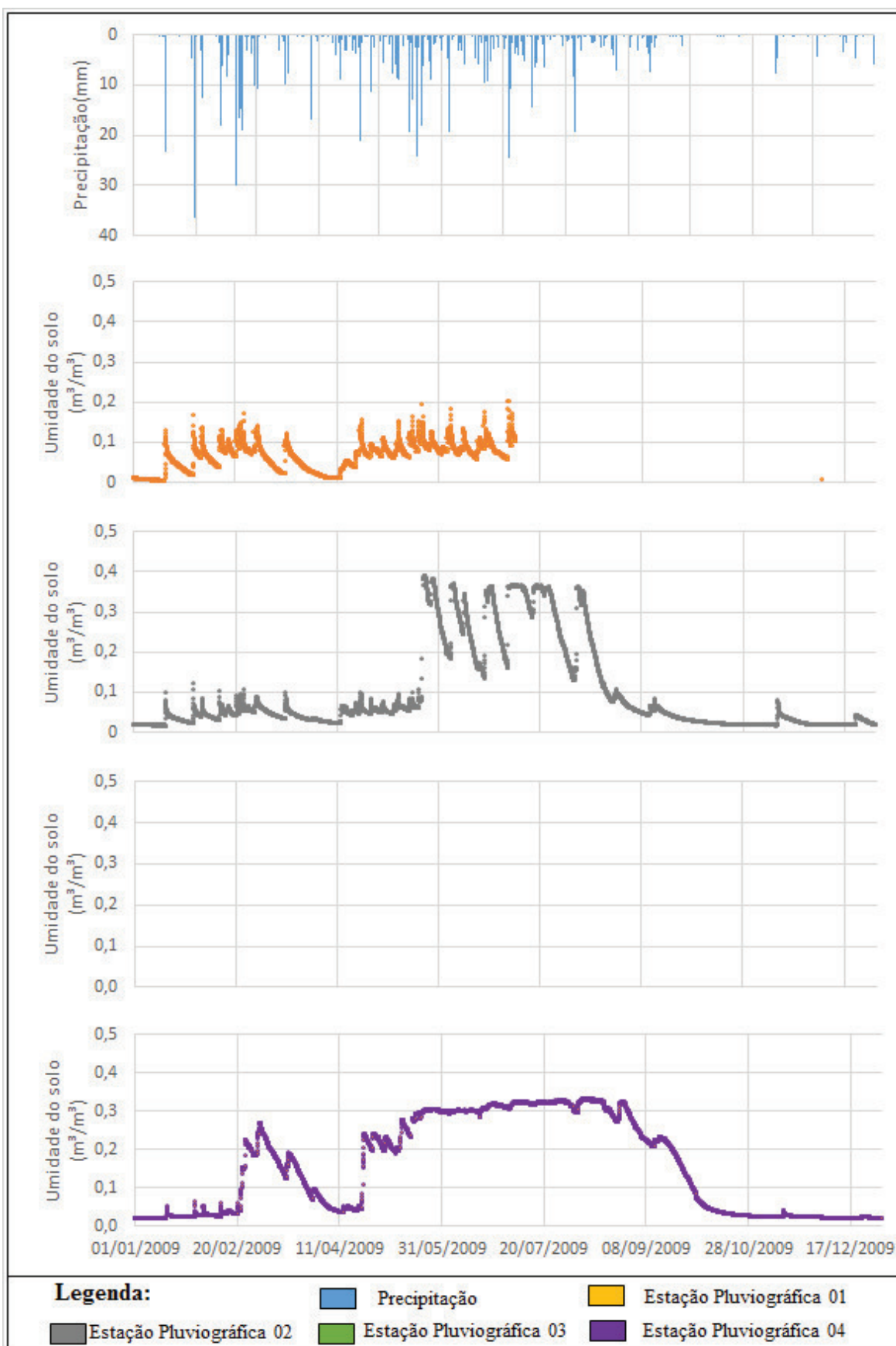


Figura 44 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2009 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

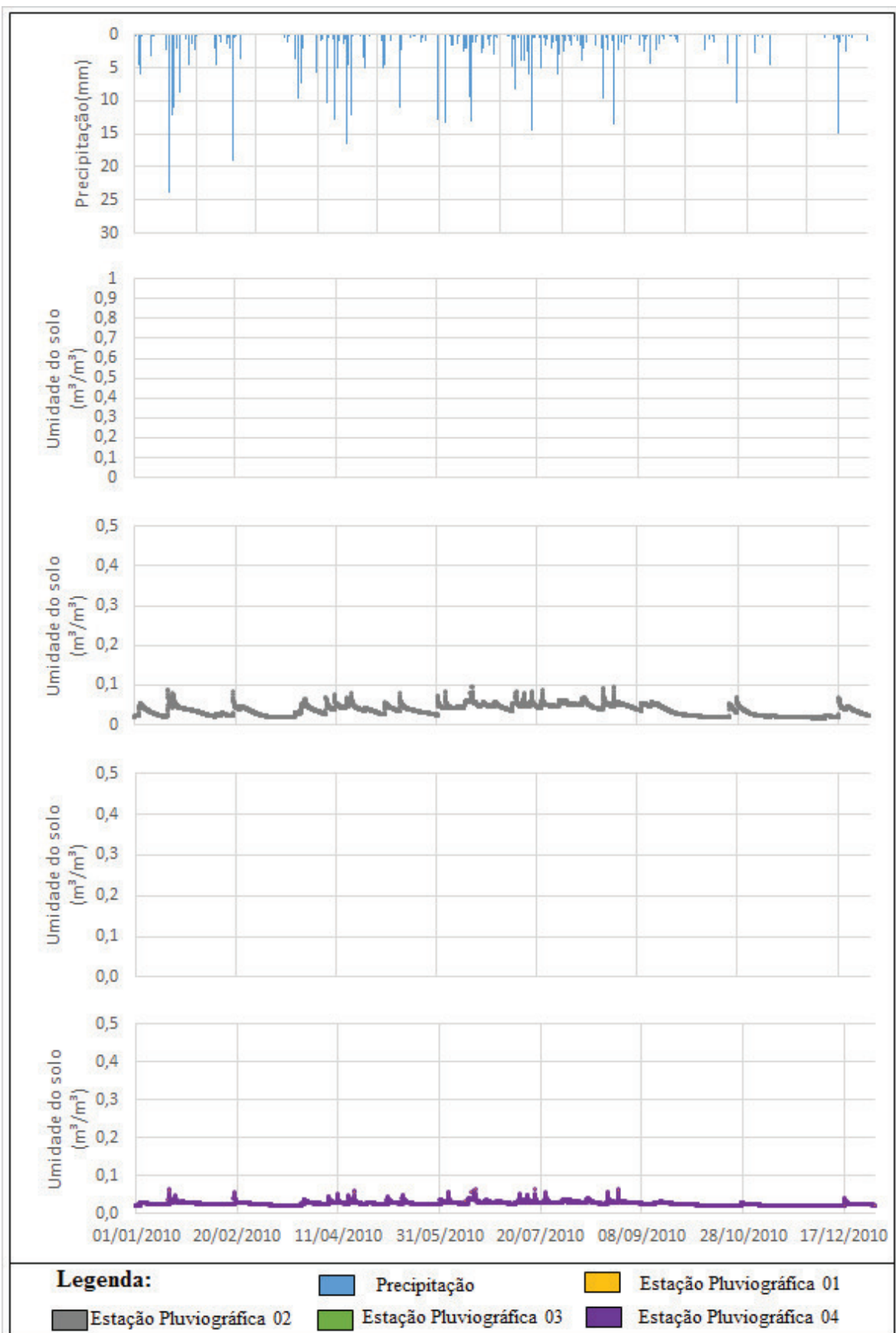


Figura 45 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2010 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

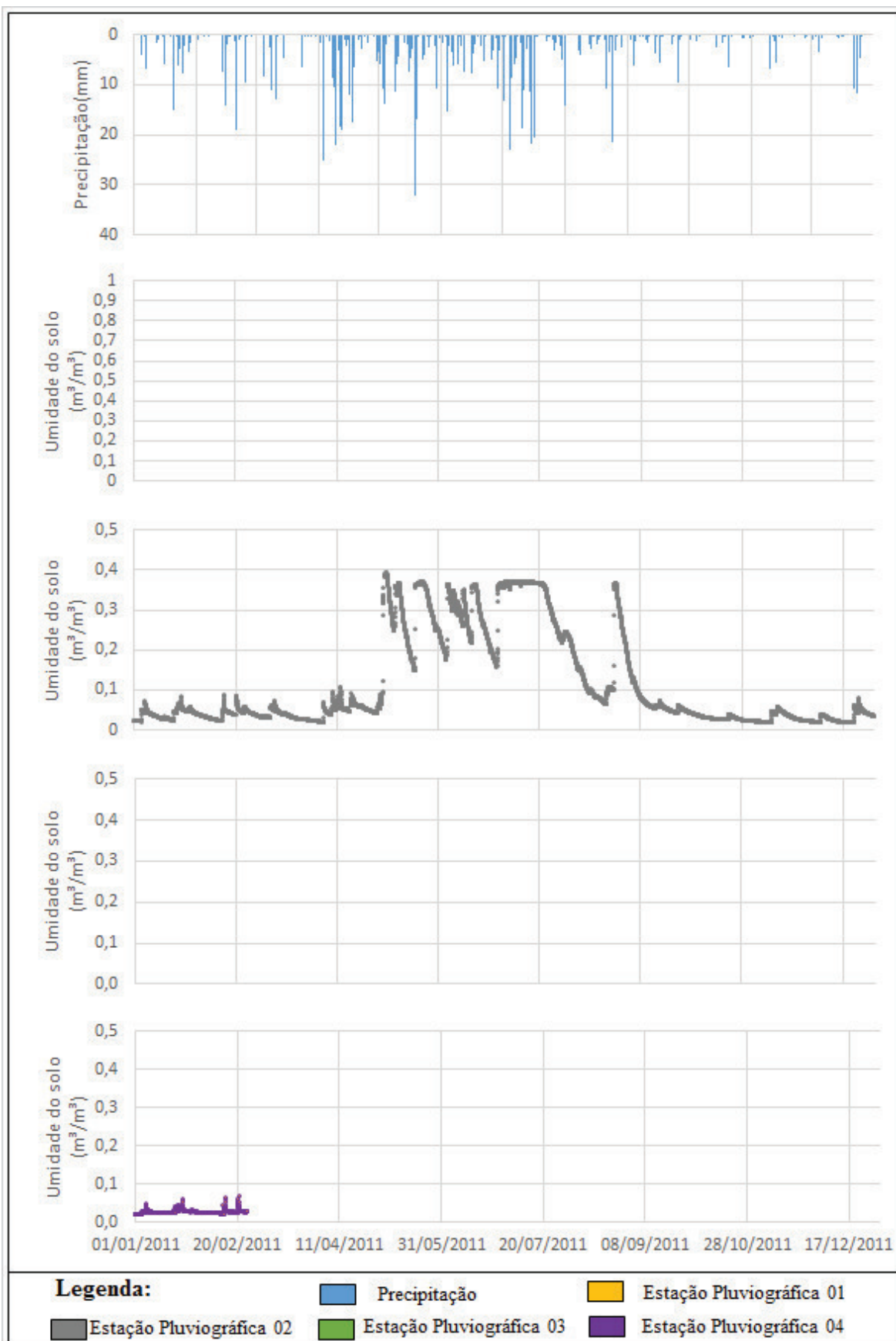


Figura 46 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2011 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

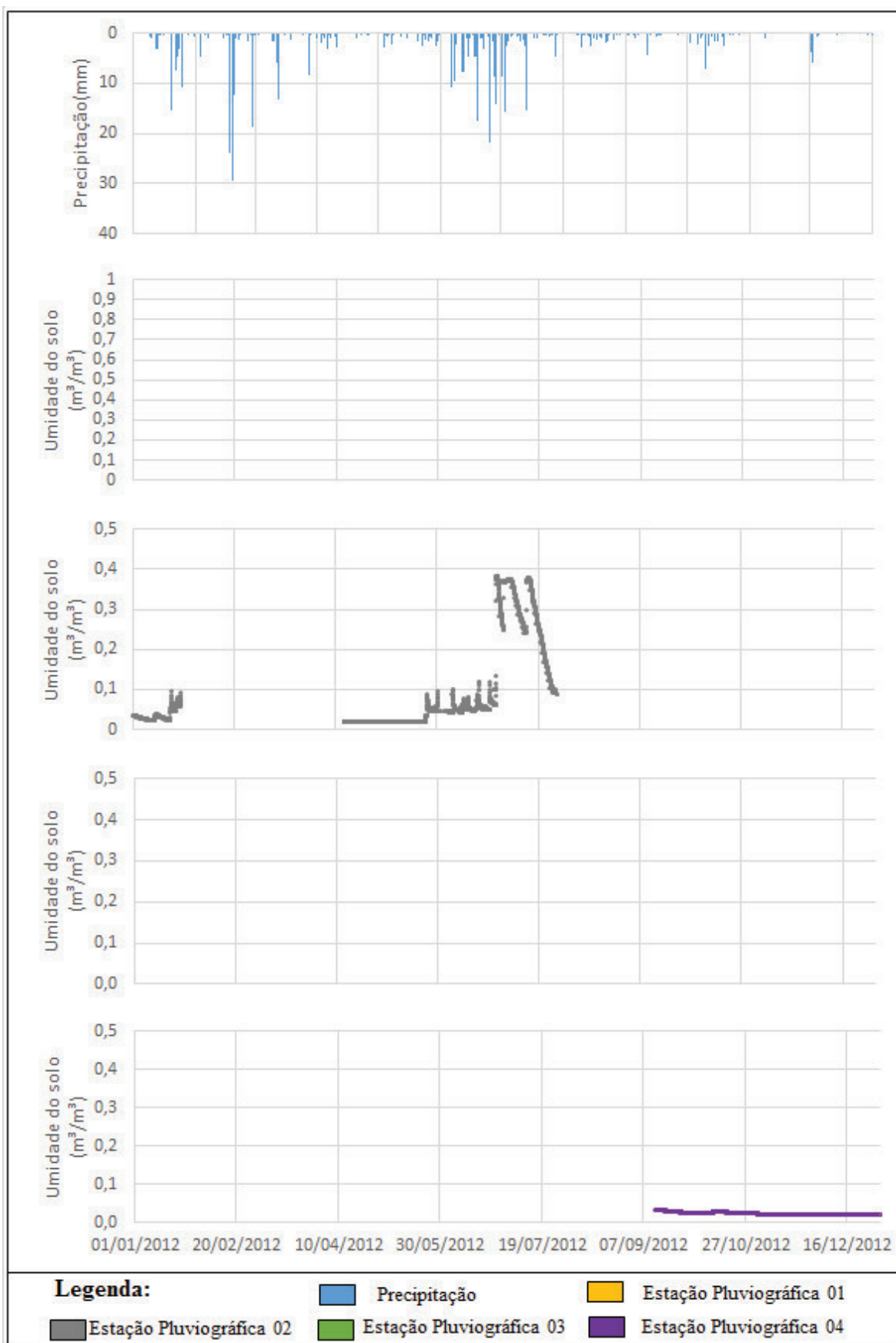


Figura 47 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2012 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

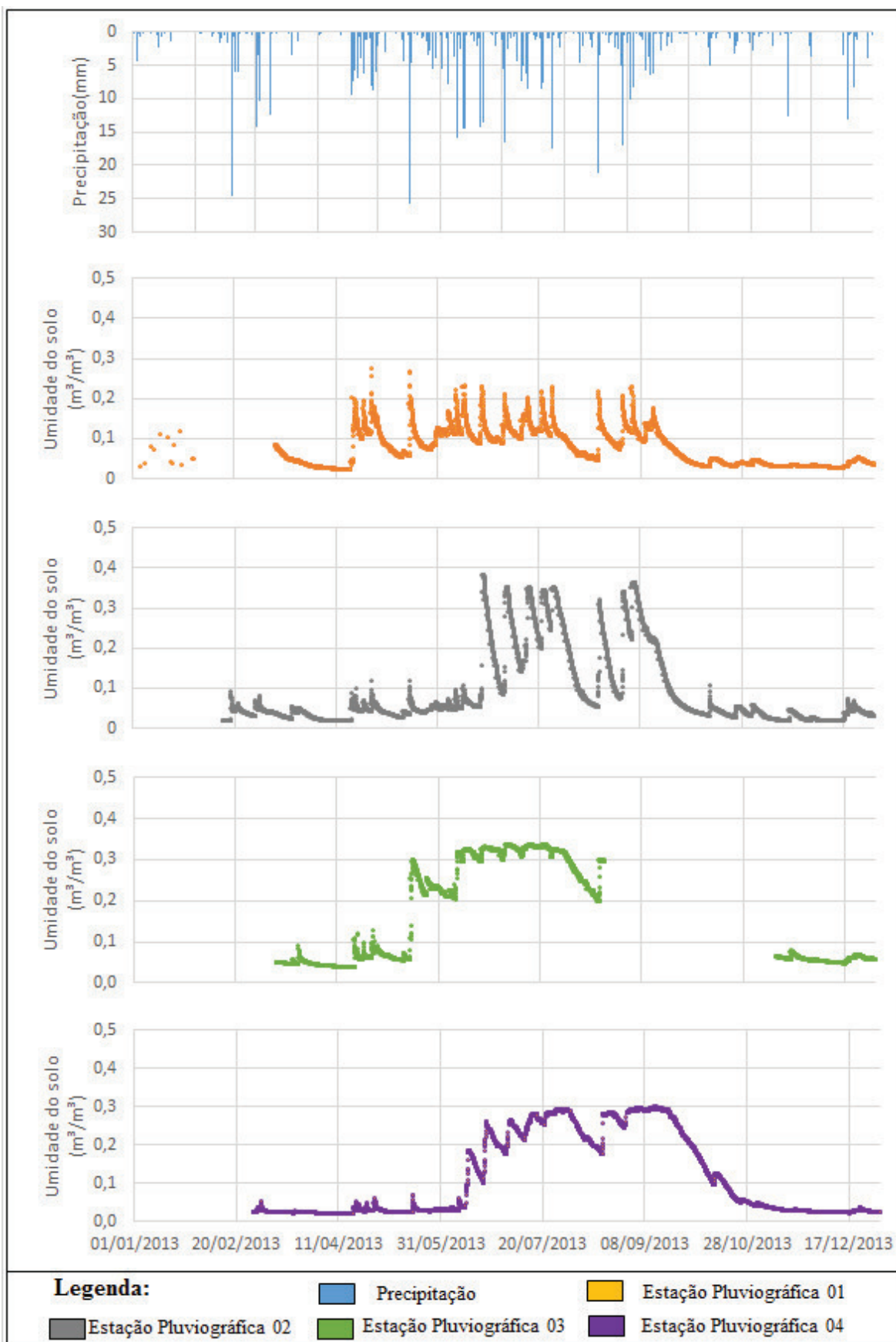


Figura 48 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2013 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

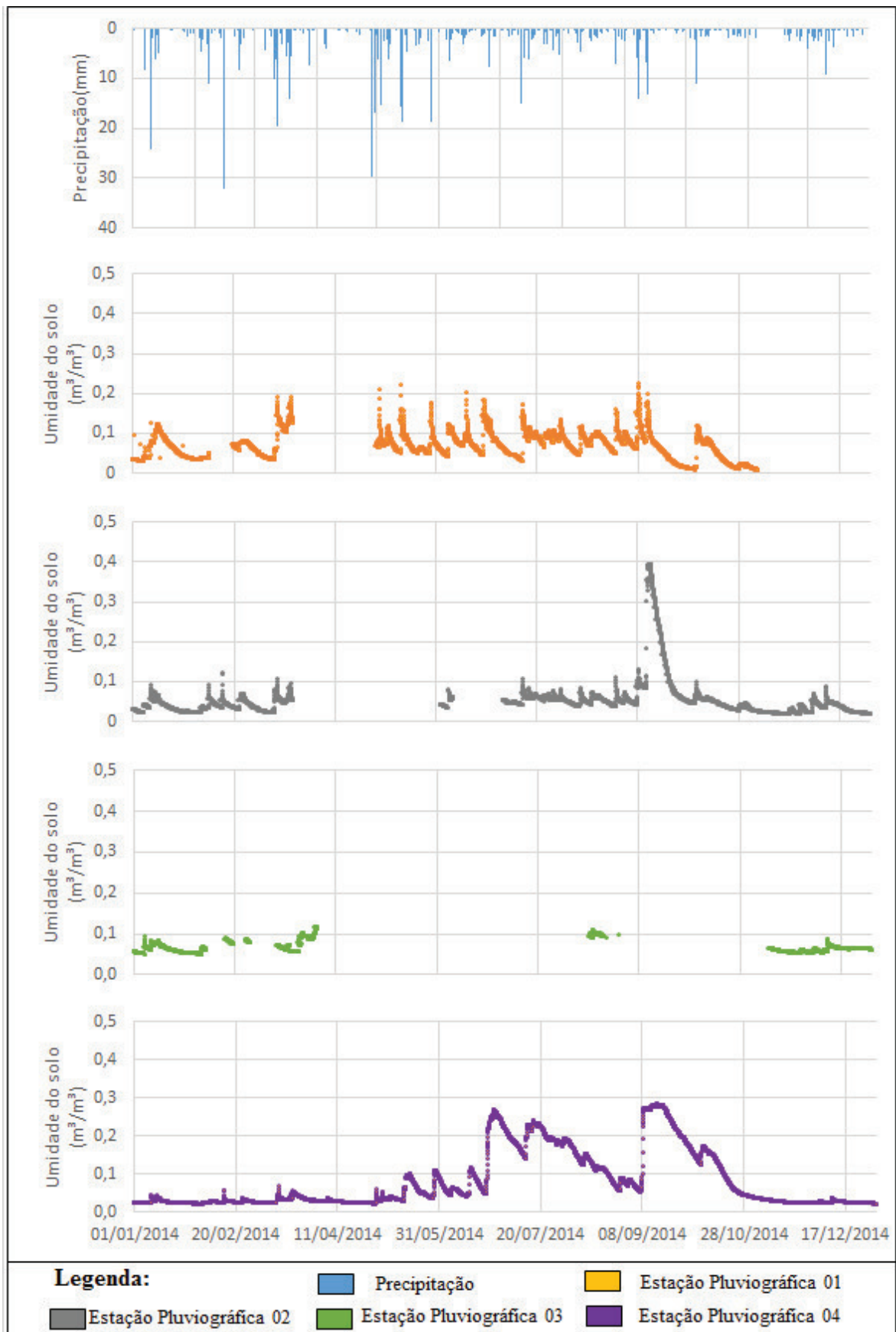


Figura 49 – Dinâmica da umidade do solo e precipitação no ano de 2014 nas estações de monitoramento da bacia experimental do Riacho Guaraíra.

APÊNDICE B – EVENTOS CHUVOSOS

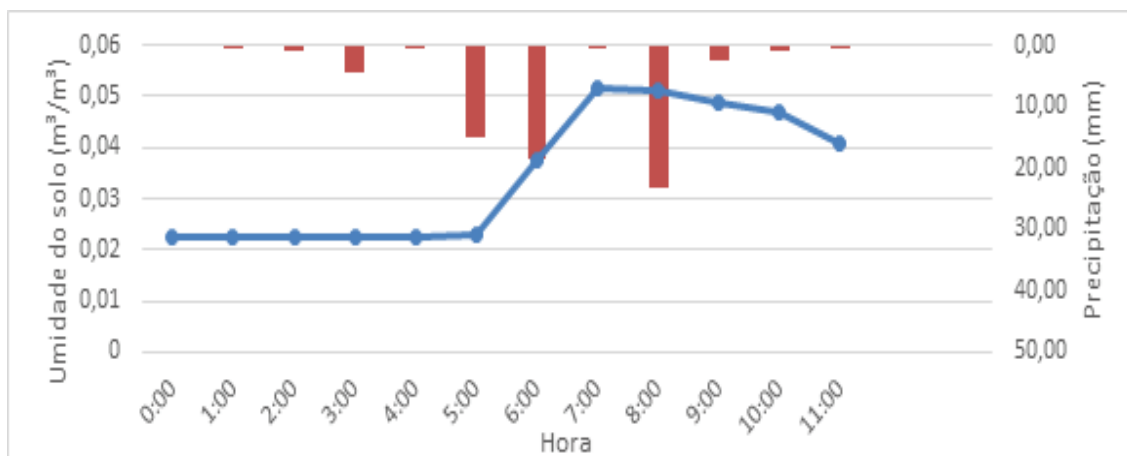


Figura 50 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 6 horas, da estação pluviográfica 04 no dia 30/01/2008 com valor de S_{max} igual a $2,4 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

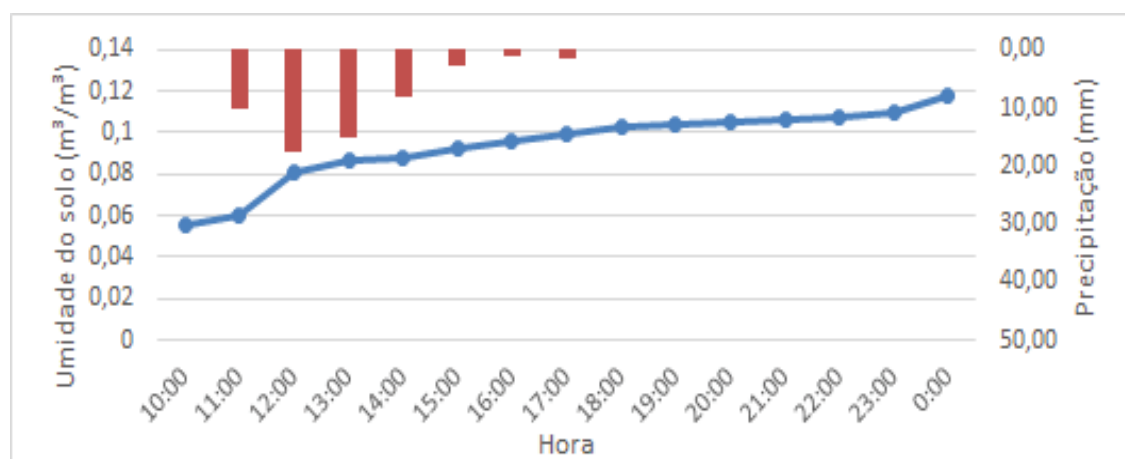


Figura 51 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 3 horas, da estação pluviográfica 03 no dia 14/01/2004 com valor de S_{max} igual a $3,48 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

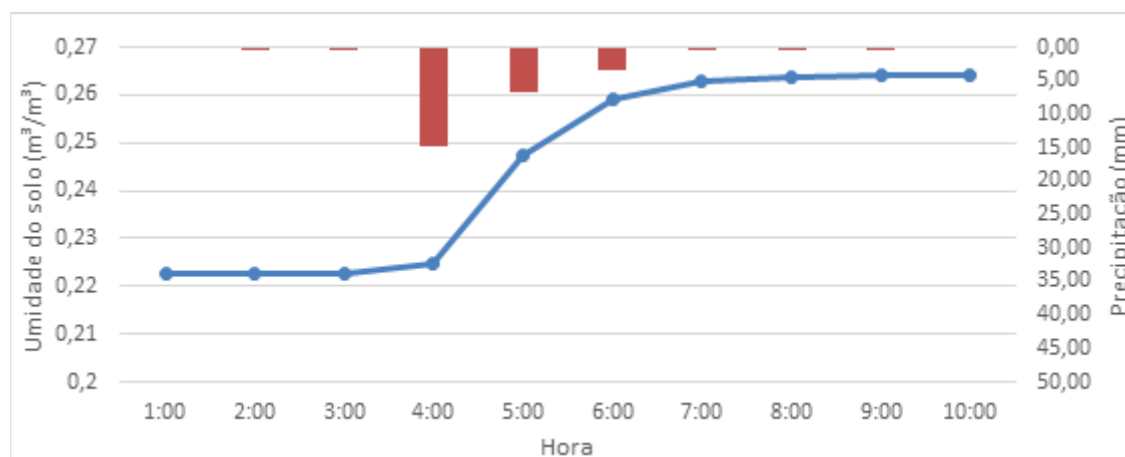


Figura 52 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 3 horas, da estação pluviográfica 03 no dia 01/06/2004 com valor de S_{max} igual a $3,73 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

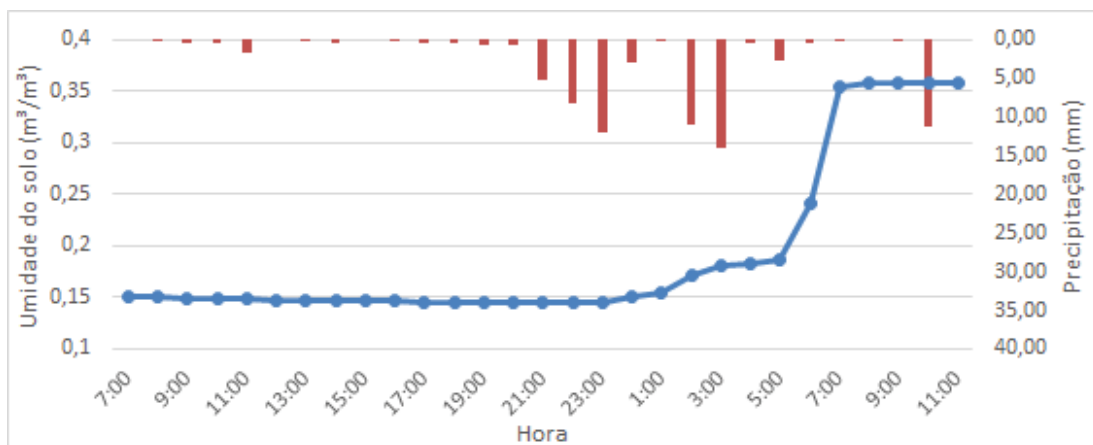


Figura 53 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 8 horas, da estação pluviográfica 02 entre o dia 30/06/2008 e 01/07/2008 com valor de S_{max} igual a $18,98 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

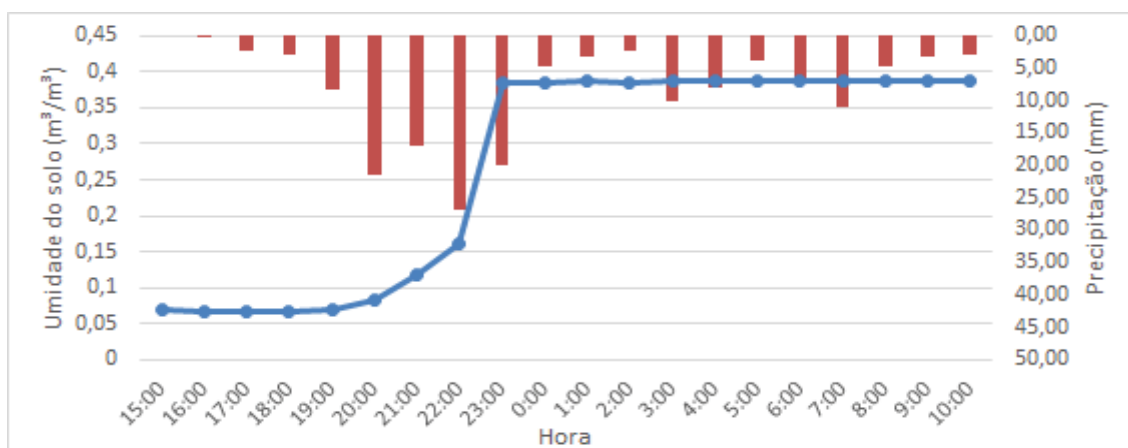


Figura 54 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 1 hora, da estação pluviográfica 02 entre o dia 17/06/2004 e 18/06/2004 com valor de S_{max} igual a $37,22 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.

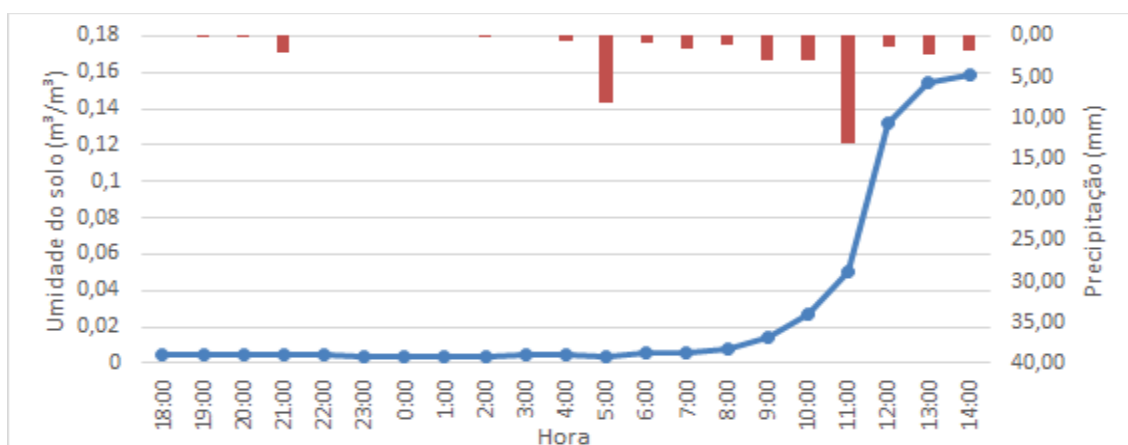


Figura 55 - Variabilidade temporal da umidade do solo e precipitação para um evento chuvoso, obtido para um MIT de 6 horas, da estação pluviográfica 01 entre o dia 29/05/2015 e 30/05/2015 com valor de S_{max} igual a $13,52 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} * \frac{10^4}{60 \text{ min}}$.