



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
UMIDADE DO SOLO NA BACIA EXPERIMENTAL DO RIACHO
GUARAÍRA - PARAÍBA**

Por

Nicholas Borges de Lira

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

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2015



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

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

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
UMIDADE DO SOLO NA BACIA EXPERIMENTAL DO RIACHO
GUARAÍRA - PARAÍBA**

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.

Nicholas Borges de Lira

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2015

L768a Lira, Nicholas Borges de.
Análise da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na bacia experimental do riacho Guaraíra - Paraíba / Nicholas Borges de Lira.- João Pessoa, 2015.
125f. : il.
Orientador: Cristiano das Neves Almeida
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia civil e ambiental. 2. Umidade do solo.
3. Variabilidade espaço-temporal. 4. Bacia experimental.
5. Cobertura vegetal. 6. Resolução temporal.

**"ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO NA
BACIA EXPERIMENTAL DO RIACHO GUARAÍRA-PB"**

NICHOLAS BORGES DE LIRA

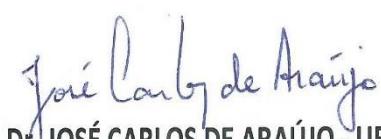
Dissertação aprovada em 10 de setembro de 2015.

Período Letivo: 2015.2


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


Prof. Dr. ADRIANO ROLIM DA PAZ - UFPB
(Membro Interno)


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


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO - UFC
(Membro Externo)

João Pessoa/PB
2015

Aos meus pais, Valsi e Normélia, que se esforçaram e contribuíram desde sempre para a minha educação.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço aqui a todos que de alguma forma participaram desta dissertação, desde os que a acompanharam comigo aos que sempre me desejaram sorte e bênçãos na minha vida e estudos.

Ao Professor Cristiano das Neves Almeida, pelas cobranças desde suas aulas de fluidos no curso de Engenharia Civil, passando pelos projetos em conjunto no PIBIC e pelas cobranças ainda mais fortes durante este mestrado. Ainda pelo auxílio e motivação enquanto eu estudava para o concurso e finalmente pela grande oportunidade de o ter como orientador desta dissertação de mestrado.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.

A todos os professores, funcionários e alunos que fazem parte do LARHENA (Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental) e do Laboratório de Hidráulica, ambos da UFPB, pela troca de conhecimentos e disponibilização de equipamentos e materiais.

Aos colegas e amigos da turma do mestrado, em especial aqueles que mais conviveram comigo durante as atividades do curso: Romero e Urquiza.

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

Ao técnico Edilson, que contribuiu com seu esforço, dedicação e experiência em todas as atividades de campo e laboratório, bem como Antônio Marcos.

A todos aqueles que participaram comigo durante um ano e meio das frequentes atividades de campo: Romero, Miguel, Jaqueline, Amanda, Edílson, Alain, René e meu orientador Cristiano.

A todos os meus familiares e amigos que sempre incentivaram meus estudos.

Aos meus pais (Valsi e Normélia), presentes sempre na minha vida e educação, sempre me apoiando e incentivando.

RESUMO

Este trabalho tem como objeto de estudo a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na bacia hidrográfica experimental do riacho Guaraíra, localizada na região litorânea sul do Estado da Paraíba. Tratando-se de uma bacia experimental, é de suma importância conhecer como funcionam e interagem entre si seus variados elementos, afim de possibilitar inferências em bacias semelhantes. Nisto, a umidade do solo é responsável por vários outros fatores na bacia hidrográfica, tais quais geração de vazão, desenvolvimento de secas e recarga de aquíferos, por exemplo. Inicialmente, por ser uma área pequena ($5,84 \text{ km}^2$), acreditava-se que os seus resultados relativos à umidade do solo seriam bastante homogêneos, entretanto, pensou-se na hipótese de os diferentes solos e vegetações de cada estação poderem influenciar no comportamento da umidade do solo. A pesquisa teve então como principal objetivo estudar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na referida área de estudo, de forma a utilizar estas informações como subsídio para bacias semelhantes, podendo até serem de maior porte. Para isto, utilizaram-se dados das sondas de umidade do solo do tipo TDR (*Time Domain Reflectometry*) e pluviógrafos instalados em cinco locais da bacia experimental, aliados à coletas manuais para calibração e validação dos resultados destas sondas durante o período de abril de 2013 até setembro de 2014. Com isto, aplicaram-se os métodos propostos por Vachaud *et al.* (1985) e Mittelbach & Seneviratne (2012), que permitem a separação da umidade do solo em suas parcelas variáveis e invariáveis no tempo, que consistem na análise de variabilidade espaço-temporal da umidade do solo. Como as sondas TDR utilizadas para medição da umidade fornecem uma resolução temporal de uma hora, procedeu-se uma avaliação desta resolução temporal que permitiu utilizar dados diários para representar as umidades dos solos, sem variação significativa de resultados. Os resultados confirmaram a homogeneidade da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na bacia experimental, com a exceção da estação que possui menor cobertura vegetal, onde a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo diferiu significativamente do resto da bacia. Ainda, percebeu-se a semelhança entre os resultados de umidade do solo das estações com cobertura vegetal semelhantes em termos tanto de média temporal quanto de anomalias. Desta forma, concluiu-se que, o fato de os resultados da estação com pouca cobertura vegetal terem sido tão diferentes na época chuvosa deve-se justamente à esta falta de cobertura vegetal, diferente das outras estações, reforçando a importância da cobertura vegetal como um controlador natural da umidade do solo. Quanto à variabilidade temporal, esta é mais sujeita aos efeitos climáticos, como por exemplo a

precipitação, enquanto que a variabilidade espacial está mais atrelada aos termos invariáveis no tempo. Ainda, a calibração das sondas foi efetuada com sucesso e representam bem a umidade do solo para a área de estudo, tornando possível o contínuo monitoramento desta bacia experimental.

PALAVRAS-CHAVE: umidade do solo, variabilidade espaço-temporal, bacia experimental, cobertura vegetal, resolução temporal.

ABSTRACT

This Master thesis studies the spatio-temporal variability of soil moisture in the Guaraíra experimental watershed, located on the southern coast of Paraíba. As it is an experimental basin, it is of great importance to know how its variables work and interact together, in order to allow inferences in similar basins. In that case, the soil moisture play a role responsible for several factors in the watershed, like flow generation, drought development and groundwater recharge, for example. Initially, being a small watershed, ($5,84 \text{ km}^2$) it was believed that its results related to soil moisture should be very homogeneous, however, a hypothesis was made about how the different soil and vegetation cover between each station could make an influence in the results. The research had as its main objective to study the spatio-temporal variability on the soil moisture on the said study area, in order to use these information as subsidy to similar basins, even bigger ones. For this it was used data from the TDR (Time Domain Reflectometry) soil moisture probes installed at five stations and pluviographs in the study area combined with manual collection for calibration and validation of the probe's results since April 2013 until September 2014. This way, it was possible to apply the methods used by Vachaud et al. (1985) and Mittelbach & Seneviratne (2012), with the disconnection of the results of soil moisture into its variable and invariable parts on time, which consist in the spatio-temporal variability of soil moisture analysis. As the TDR probes used to measure soil moisture give a temporal resolution of one hour, an analysis of temporal resolution was proceeded, allowing to use diary data in order to represent the soil moisture, without significant variation of results. The results confirmed the homogeneity of spatio-temporal variability of the soil moisture in the basin, except for the station with less vegetation cover, where the spatio-temporal variability of soil moisture differed significantly from the rest of the basin. Thus, it was perceived the similarity between the results of soil moisture in the terms of temporal mean and anomalies, for the stations with similar vegetation cover. This way, it was concluded that the fact that the results of the

station with less vegetation cover had been so different is due to its lack of vegetation cover, being very different from the rest of the basin, thus enhancing the importance of vegetacion cover as a natural controller of soil moisture. As to the temporal variability, that is more susceptible to climatic effect, like precipitation for example, while the spatial-variability is more related to the invariable terms on time. Yet, the calibration of the probes was successfully executed and they do represent well the soil moisture for that study area, allowing continuous monitoring on that experimental basin.

KEYWORDS: soil moisture, spatio-temporal variability, experimental basin, vegetation cover, temporal resolution.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	BACIAS EXPERIMENTAIS	20
2.2	UMIDADE DO SOLO	22
2.3	FATORES QUE INFLUENCIAM NA UMIDADE DO SOLO	23
2.4	FORMAS DE MEDAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO	24
2.5	ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO	26
3	ÁREA DE ESTUDO E REDE DE MONITORAMENTO.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	RECUPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	37
4.2	COLETA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO.....	39
4.2.1	<i>Obtenção dos valores de umidade do solo e massa específica aparente das amostras em laboratório</i>	41
4.3	COLETA DOS DADOS DAS SONDAS TDR NAS ESTAÇÕES	41
4.4	CALIBRAÇÃO DAS SONDAS TDR	42
4.5	DEFINIÇÃO DA RESOLUÇÃO TEMPORAL A SER UTILIZADA	43
4.6	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DA BACIA EXPERIMENTAL.....	44
4.7	TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	46
4.8	DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	47
4.9	VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO	47
4.9.1	<i>Análises de distinção dos termos variáveis e invariáveis no tempo para a variabilidade espacial</i>	47
4.9.2	<i>A estabilidade temporal e os termos variáveis e invariáveis no tempo.....</i>	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE SOLO COLETADAS <i>IN LOCO</i>	51
5.1.1	<i>Análise estatística</i>	51
5.1.2	<i>Análise da umidade do solo e massa específica aparente do solo coletados in loco</i>	60
5.2	DADOS COLETADOS PELAS SONDAS TDR.....	66
5.2.1	<i>Calibração das sondas TDR</i>	66
5.2.2	<i>Escalas de resolução temporal.....</i>	69
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS PELAS SONDAS TDR.....	71

5.4	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA BACIA EXPERIMENTAL	73
5.5	ANÁLISES DE VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO.....	77
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICE A – RESULTADOS DE GRANULOMETRIA	97
	APÊNDICE B – RESULTADOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO.....	104
	APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO NAS ESTAÇÕES.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia experimental do riacho Guaraíra inserida na bacia hidrográfica representativa do rio Gramame	30
Figura 2 – Relevo, hidrografia e localização das estações de monitoramento da bacia do riacho Guaraíra.....	31
Figura 3 – Uso do solo na bacia experimental	33
Figura 4 – Vegetação da área de estudo.....	34
Figura 5 – Vegetação da área de estudo.....	34
Figura 6 – Vegetação da área de estudo.....	35
Figura 7 – Equipamentos para manutenção das estações de estudo	38
Figura 8 – Manutenção das estações de estudo	38
Figura 9 – Coleta de amostras indeformadas de solo	40
Figura 10 – Coleta dos dados das estações	42
Figura 11 – Ensaio de granulometria do solo - preparação das peneiras	45
Figura 12 – Ensaio de granulometria do solo - pesagem de amostra	45
Figura 13 – Ensaio de granulometria – solo retirado da estufa	46
Figura 14 – Médias das umidades volumétricas das amostras de solo em diferentes profundidades de toda a bacia experimental para o período estudado	51
Figura 15 – Médias das massa específicas aparentes do solo das amostras por profundidade de toda a bacia experimental para o período de estudo	52
Figura 16 – Precipitação diária na bacia experimental do riacho Guaraíra - representada pela estação pluviográfica 04.....	52
Figura 17 – Histograma do VWC da bacia experimental do riacho Guaraíra	53
Figura 18 – Histogramas da umidades volumétricas nos locais de coleta	54
Figura 19 – Histogramas das umidades volumétricas nas profundidades estudadas.....	54
Figura 20 - Histograma da massa específica aparente da bacia experimental do riacho Guaraíra para as quatro profundidades de coleta	55
Figura 21 - Histogramas das massa específicas aparentes nos locais de coleta	55
Figura 22 - Histogramas das massa específicas aparentes por profundidade estudada	56
Figura 23 – Umidade volumétrica média da bacia experimental por local de coleta	57
Figura 24 - Umidade volumétrica média do solo da bacia experimental por profundidade de coleta.....	57
Figura 25 – Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 01.....	58
Figura 26 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 02.....	58
Figura 27 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 03.....	58
Figura 28 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 04.....	59
Figura 29 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 05.....	59
Figura 30 – Umidade volumétrica do solo - variação temporal na bacia experimental do riacho Guaraíra.....	60
Figura 31 – Umidade volumétrica do solo - variação espacial da bacia experimental do riacho Guaraíra.....	61
Figura 32 – Massa específica aparente do solo - variação temporal da bacia experimental do riacho Guaraíra.....	61

Figura 33 – Massa específica aparente do solo - variação espacial da bacia experimental do riacho Guaraíra.....	62
Figura 34 – Variações espaço-temporais do VWC da estação 01	63
Figura 35 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 02.....	64
Figura 36 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 03.....	64
Figura 37 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 04.....	65
Figura 38 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 05.....	65
Figura 39 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 01	67
Figura 40 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 02	68
Figura 41 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 04	68
Figura 42 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 05	69
Figura 43 – Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 1, 2, 4 e 8 horas para a estação 01	70
Figura 44 - Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 12 horas, 1 dia, 2 dias e 4 dias para a estação 01.....	70
Figura 45 - Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 7 e 14 dias para a estação 01	70
Figura 46 – Histogramas dados de umidade volumétrica do solo diária (VWC) das sondas TDR para cada estação	71
Figura 47 – Histograma de dados diários de umidade volumétrica do solo (VWC) da área de estudo - média das estações 01, 02, 04 e 05.....	72
Figura 48 – <i>Box-plot</i> dos dados das sondas TDR em cada estação	72
Figura 49 – Resultado da granulometria para cada estação e média para a área de estudo .75	75
Figura 50 – Triângulo de grupamento textural do solo.....	76
Figura 51 - Distribuição temporal mensal da precipitação para o período de estudo 2013/2014 - Estação pluviográfica 04.....	77
Figura 52 – Média espacial <i>versus</i> variância espacial diária da umidade do solo da bacia experimental.....	78
Figura 53 - Média espacial <i>versus</i> coeficiente de variação diária da umidade do solo da bacia experimental	78
Figura 54 - Média espacial <i>versus</i> variância espacial diária das anomalias da bacia experimental.....	79
Figura 55 - Séries temporais de umidade do solo das estações e média	80
Figura 56 - Séries temporais das estações e média da parcela invariante no tempo da umidade do solo (média temporal).....	80
Figura 57 – Séries temporais das estações e média da parcela variante no tempo da umidade do solo (anomalias)	81
Figura 58 – Séries temporais da média da umidade do solo e seus desvios-padrões	82
Figura 59 – Séries temporais da anomalia e seus desvios padrões	82
Figura 60 – Decomposição da variância espacial da umidade do solo em seus contribuintes como na equação 10 (mm^2)	83
Figura 61 - Decomposição da variância espacial da umidade do solo em seus contribuintes como nas equações 11 e 12 (Valores em %)	83
Figura 62 – Porcentagens das parcelas decompostas da variância espacial da umidade do solo	84
Figura 63 – Variância espacial da umidade do solo <i>versus</i> variância espacial da parcela variável no tempo (variância espacial da média temporal representada na linha verde vertical).....	85

Figura 64 – Variância espacial da umidade do solo <i>versus</i> covariância da média temporal e anomalias (variância espacial da média temporal representada na linha verde vertical)	86
Figura 65 - Variância espacial das anomalias <i>versus</i> covariância da média temporal e anomalias	87
Figura 66 – Rankings de estabilidade de: (a) média temporal da diferença de umidade absoluta do solo; (b) média temporal da diferença relativa de umidade absoluta do solo; (c) módulo da média temporal da diferença de umidade absoluta do solo; (d) módulo da média temporal da diferença relativa de umidade absoluta do solo	88
Figura 67 – Rankings de estabilidade de: (a) valores absolutos da média temporal e (b) média temporal dos valores absolutos das diferenças das anomalias com seus respectivos desvios padrões para mais e menos	89
Figura 68 – (a) Ranking dos valores absolutos da média temporal das diferenças da umidade do solo absoluta <i>versus</i> ranking dos valores absolutos da média temporal e (b) ranking dos valores absolutos da média temporal das diferenças da umidade do solo absoluta <i>versus</i> ranking da média temporal dos valores absolutos das diferenças das anomalias.	89
Figura 69 – Granulometria do solo da estação 01	101
Figura 70 – Granulometria do solo da estação 02	102
Figura 71 – Granulometria do solo da estação 03	102
Figura 72 – Granulometria do solo da estação 04	103
Figura 73 – Granulometria do solo da estação 05	103
Figura 74 – Massa específica aparente do solo média por local de coleta.....	107
Figura 75 – Massa específica aparente do solo média por profundidade	107
Figura 76 – Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 01	108
Figura 77 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 02.....	108
Figura 78 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 03.....	109
Figura 79 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 04.....	109
Figura 80 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 05.....	110
Figura 81 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 5cm de profundidade	110
Figura 82 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 15cm de profundidade	111
Figura 83 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 30cm de profundidade	112
Figura 84 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 50cm de profundidade	113
Figura 85 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 01	114
Figura 86 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 02	114
Figura 87 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 03	115
Figura 88 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 04	115

Figura 89 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 05	116
Figura 90 – VWC espaço-temporal à 5cm de profundidade	117
Figura 91 - VWC espaço-temporal à 15cm de profundidade.....	118
Figura 92 - VWC espaço-temporal à 30cm de profundidade.....	119
Figura 93 - VWC espaço-temporal à 50cm de profundidade.....	120
Figura 94 – Precipitação Diária Est. Pluv. 01	122
Figura 95 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 01.....	122
Figura 96 – Precipitação Diária Est. Pluv. 02	123
Figura 97 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 02.....	123
Figura 98 – Precipitação Diária Est. Pluv. 04	124
Figura 99 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 04.....	124
Figura 100 – Precipitação Diária Est. Clim. 05	125
Figura 101 – Precipitação Mensal Est. Clim.05	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das estações pluviográficas e climatológica da bacia experimental do riacho Guaraíra	31
Tabela 2 – Informações das coletas de solo manuais	39
Tabela 3 – Informações das coletas das sondas TDR	46
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos da massa específica aparente do solo (em g.cm ⁻¹) com dados a 15 e 30 cm de profundidade	66
Tabela 5 – Resultados do ensaio de granulometria da estação 01 - média da coleta em duplicata.....	73
Tabela 6 - Resultados do ensaio de granulometria da estação 02 - média da coleta em duplicata.....	74
Tabela 7 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 03 - média da coleta em duplicata.....	74
Tabela 8 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 04 - média da coleta em duplicata.....	74
Tabela 9 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 05 - média da coleta em duplicata.....	75
Tabela 10 – Resultados do ensaio de granulometria da bacia experimental do Guaraíra....	76
Tabela 11 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 01	98
Tabela 12 - Granulometria da amostra 2 do solo da estação 01	98
Tabela 13 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 02	98
Tabela 14 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 02	99
Tabela 15 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 03	99
Tabela 16 – Granulometria da amostra 2 da estação 03.....	99
Tabela 17 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 04	100
Tabela 18 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 04	100
Tabela 19 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 05	100
Tabela 20 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 05	101
Tabela 21 – Dados de umidade volumétrica do solo coletados manualmente	105
Tabela 22 – Dados de massa específica aparente do solo	106

1 INTRODUÇÃO

O estudo das características hidromorfológicas é de fundamental importância para o planejamento e gerenciamento das bacias hidrográficas. Dentre as variáveis do ciclo hidrológico de bacias hidrográficas, a umidade do solo é uma variável chave nos processos hidrológicos, biológicos e biogeoquímicos (ROSSATO *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2010). A umidade do solo é um fator preponderante da bacia hidrográfica e influí direta e indiretamente na resistência do solo, geração de escoamento, infiltração, desenvolvimento ambiental da região (tanto flora como fauna), formação de redes de drenagem e até mesmo modificações morfológicas e topográficas da região (MITTELBACH & SENEVIRATNE, 2012).

Tanto para efeito global ou de pequena escala, os produtos resultantes da umidade do solo, tais quais escoamento, infiltração e relações com a vegetação local por exemplo, são de grande interesse para os mais variados setores, atuantes em toda parte do globo, como desenvolvimento, agricultura, gerenciamento de recursos e abastecimento de água (BOLTEN *et al.*, 2010).

Então, durante as últimas décadas um número cada vez maior de estudos focou na estimativa da umidade do solo utilizando diferentes abordagens, considerando explicitamente as variações espaço-temporais da umidade do solo. (ROBINSON *et al.*, 2008; VEREECKEN *et al.*, 2008).

O relatório do projeto IBESA (2002), que realiza pesquisas em bacias experimentais nas regiões de clima semi-árido, afirma que avanços alcançados devido à lei federal de número 9.433, de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, não foram seguidos por avanços na área da hidrologia experimental. Embora a obtenção de séries longas de dados hidroclimatológicos seja necessária para as tomadas de decisão sobre os recursos hídricos, muitos desses dados são inexistentes ou incompletos, e a dependência de uma base de dados sintética deixa as tomadas de decisão fragilizadas, pois os dados gerados através de modelações, por exemplo, podem estar embutidos de erros.

Assim muitos projetos vêm sendo realizados nos últimos anos no Brasil, com enfoque na região Nordeste, devido à preocupação com os aspectos quali-quantitativos do meio ambiente, principalmente dos recursos hídricos e suas interações com o solo da bacia. Então, com o intuito de facilitar as pesquisas e estudos de determinadas áreas, utilizam-se as chamadas bacias experimentais e representativas. Desta forma, pode-se estudar pequenas e

grandes áreas com o intuito de extrapolar seus resultados para outras regiões com propriedades semelhantes.

Na bacia experimental do riacho Guaraíra funcionam atualmente quatro estações pluviográficas e uma estação climatológica, além de três estações fluviométricas instaladas no começo de 2013. Cada estação pluviográfica e climatológica dispõe de uma sonda do tipo TDR (*Time Domain Reflectometry*) que mede de forma indireta a umidade do solo, necessitando os seus resultados de serem validados através da calibração destas sondas a partir de uma série de dados históricos de medição de umidade do solo in loco.

Coppola *et al.* (2011) afirmam que em escala local a variabilidade espaço-temporal de umidade volumétrica no solo possui grande impacto em processos hidrológicos tais quais como: recarga de aquíferos, infiltração e escoamento superficial. Com isso em vista, há necessidade de maiores estudos e necessidade da criação de bancos com séries de dados longas e sólidas da umidade do solo nas bacias hidrográficas, a fim de poder compreender melhor os processos interativos que contribuem para suas alterações ao longo do tempo, bem como suas repercussões gerais na bacia hidrográfica e também socioambientais.

Com o estudo e análises espaço-temporais destas variáveis, torna-se então possível de se entender a forma como estes influenciam as outras variáveis hidromorfológicas, podendo-se estender esses resultados a simulações de cenários para implantação ou remoção de áreas que estejam sendo super ou sub utilizadas dos pontos de vista econômico e sócio ambientais.

É impreterível então que as estimativas e previsões de comportamentos destas variáveis sejam cada vez mais precisas, a fim de melhorar os estudos ambientais das regiões, para se adequar as soluções mais eficazes de se aplicarem em variadas circunstâncias.

Para isto, faz-se necessário o acompanhamento constante para se realizar a amostragem dos solos da bacia que se pretende estudar, em conjunto com os demais dados pluviográficos e climatológicos da mesma. A construção do banco de dados é de importância ímpar, tendo-se em vista que os estudos hidrológicos necessitam de séries de dados longas e consistentes.

Portanto, com o propósito de contribuir para o melhoramento dos estudos que vêm sendo realizados pelo grupo de pesquisadores de recursos hídricos do LARHENA/UFPB (Laboratório de Recursos Hídricos e Eng.^a Ambiental da Universidade Federal da Paraíba), ao longo dos projetos de pesquisa IBESA (Instalação de Bacias Experimentais no Semi-Árido) e BEER (Bacias Experimental e Representativa da Rede de Hidrologia do

Semiárido), pretende-se realizar análises espaço-temporais da variabilidade da umidade do solo por toda a área da bacia experimental do riacho Guaraíra, que se localiza dentro da bacia representativa do rio Gramame, na Paraíba.

Objetivo Geral

- Verificar as hipóteses do solo e vegetação de cada estação influenciarem na resposta da umidade do solo;
- Analisar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo na bacia experimental do riacho Guaraíra.

Objetivos Específicos

- Calibrar as sondas de umidade do solo nas estações da bacia experimental para posterior uso dos dados antigos e futuros em outros estudos;
- Avaliar a granulometria dos solos de cada estação da bacia experimental;
- Observar as diferenças e o que as ocasionam entre os dados de umidade dos postos na bacia experimental;
- Realizar análises estatísticas dos dados coletados ao longo do ano hidrológico 2013-2014;
- Avaliar a resolução temporal adequada a ser trabalhada;
- Comparação entre resultados de dados manuais e da TDR.

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*) são apresentados conceitos a respeito do papel da umidade do solo no ambiente, formas de medição, fatores e variáveis determinantes para suas mudanças e estudos prévios que subsidiaram esta dissertação. As características da área de estudo são enfocadas no capítulo 3 (*Caracterização da Área de Estudo*). No quarto capítulo (*Materiais e Métodos*) estão descritas as etapas metodológicas utilizadas para atingir os objetivos propostos no capítulo 1. O capítulo 5 (*Resultados e Discussões*) constitui os resultados e discussões a respeito das análises de umidade do solo pelas formas manual e automática, bem como a calibração das sondas, análise do tipo de solo e então a análise de variabilidade espaço-temporal. No último capítulo (*Conclusões e Recomendações*) são apresentadas as

considerações finais acerca dos resultados obtidos durante a pesquisa, evidenciando a importância da realização do trabalho e deixando algumas recomendações para estudos futuros. Por fim, foram listadas as referências que serviram de apporte para a elaboração da dissertação, e os apêndices, nos quais constam os demais gráficos e tabelas resultantes desta pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo está compartimentado em seis partes, de acordo com os elementos que foram empregados na metodologia da pesquisa para alcançar os resultados desejados. Na primeira parte foi realizada uma conceituação sobre bacias experimentais e representativas, dando ênfase à bacia utilizada na pesquisa. A segunda parte apresenta de forma geral a umidade do solo de acordo com estudos por diferentes autores, de diferentes épocas e locais. Na terceira parte do referencial teórico são abordados os fatores que regem e são regidos pela umidade do solo. O quarto tópico mostra variadas formas de medição de umidade do solo e justifica a escolha do autor. A quinta parte trata das análises de variabilidade espaço-temporal da umidade do solo, com seus estudos estatísticos.

2.1 Bacias experimentais

Toebes & Ouryvaev (1973) em seu trabalho na UNESCO sobre bacias representativas e experimentais comentaram que os estudos hidrológicos sofrem de falta de dados e padronização de estudos, além de técnicas de pesquisas. Comentam também que os métodos estatísticos clássicos nem sempre podem ser aplicados a dados hidrológicos, bem como estes estudos não se resumem apenas a coleta de tais dados, mas também de sua interpretação visando a solução de problemas. Ainda, os principais objetivos elencados pelos pesquisadores nas pesquisas hidrológicas destas bacias são a previsão e estimativa qualitativa e quantitativa das variadas características.

Estes autores então definiram bacias experimentais como bacias relativamente homogêneas em solo e vegetação, com características físicas uniformes. Ainda, nestas bacias ditas experimentais, uma ou mais de suas características são modificadas de forma proposital com o intuito de se estudar os efeitos destas modificações nas características hidrológicas. Como o detalhamento de tais são bastante necessários estas bacias normalmente possuem uma área que raramente excede os 4km². Ainda, bacias onde os estudos estão em andamento são também chamadas de experimentais.

A utilização de bacias experimentais é um instrumento eficiente para a estimativa do comportamento hidroclimatológico característico de bacias hidrográficas de qualquer região climática. Essas bacias experimentais podem subsidiar os processos de regionalização de informações, preenchendo a lacuna da falta de monitoramento das variáveis que são de suma importância para a gestão dos recursos hídricos (SILVA et al. 2006).

Quanto a bacias representativas, Toebe & Ouryvaev (1973) definiram bacias representativas como sendo bacias selecionadas tais quais sejam representativas de uma região hidrológica. Os autores informam que estas são utilizadas para investigações intensas de problemas específicos do ciclo hidrológico sobre condições relativamente estáveis e naturais. Ainda, de acordo com Silva *et al.* (2006), bacias representativas são bacias escolhidas como sendo representantes de uma área hidrologicamente homogênea; isto é, representativas de uma área onde se saiba que exista certa homogeneidade do ponto de vista fisiográfico e hidroclimatológico, que tenha mesmo regime pluviométrico e fluviométrico, tempo e clima com características semelhantes e, quando possível, características fisiográficas e geomorfológicas semelhantes também.

As bacias representativas são bacias escolhidas como sendo representantes de uma região hidrologicamente homogênea, onde características fisiográficas e hidrometeorológicas têm comportamentos semelhantes. Precisam ter o mesmo regime pluviométrico e fluviométrico, assim como tempo e clima, e, quando possível, semelhança nas características fisiográficas e geomorfológicas. Uma rede não muito densa de bacias representativas pode assim refletir no conhecimento das características hidrológicas gerais de uma região, por exemplo, a região semiárida ou de zonas litorâneas adjacentes (SILVA *et al.*, 2006). Ademais, Silans *et al.* (2004) e Toebe & Ouryvaev (1973) afirmam que bacias hidrográficas, ditas representativas, devem ser submetidas ao menor número possível de modificações durante o período de estudo, sejam elas por causas naturais ou antrópicas. Caso essas modificações ocorram, essas devem ser cuidadosamente registradas e analisadas.

Estes e outros estudos exaltando as vantagens de se trabalhar com bacias representativas e experimentais levaram à uma gama de pesquisas neste sentido, tais quais as pesquisas de Whitehead & Robinson (1993), que proveram em seu estudo um histórico sobre os estudos em bacias representativas e experimentais ao longo do tempo no mundo. Os autores citaram em seu trabalho os mais variados estudos desde o fim do século XIX, o qual classificaram como sendo o período inicial dos estudos hidrológicos mais pontuais e com o surgimento de técnicas e equipamentos que facilitaram a coleta e medição de dados. Estes autores concluíram que os estudos vieram evoluindo bastante, a ponto de pesquisas que eram consideradas sofisticadas e caras terem e irem se tornando mais rotineiras e aplicadas ao longo dos diversos estudos, com os estudos nestas bacias de pequeno porte sendo considerados como uma prioridade altíssima, sendo o indicador primário de mudanças no meio ambiente global. Ainda, os autores concluíram que estes estudos podem ser

completamente justificados e necessários de apoiar e serem apoiados pelos institutos governamentais e agências internacionais.

Monte-Mor *et al.* (2012), em seu trabalho de análise da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo numa bacia representativa no estado de Minas Gerais, durante os anos de 2009 até 2011, informam que a implantação de bacias representativas ou experimentais permite ampliar o conhecimento dos processos hidrológicos de biomas específicos. Os autores ainda comentam que a associação do aprimoramento dos métodos de modelagem, uma longa série de dados para serem utilizados e o maior conhecimento dos processos hidrológicos, em diferentes escalas, pode resultar em menores incertezas na predição de variáveis hidrológicas em bacias pouco monitoradas.

Na região Nordeste, foi implantada em parceria com a ABRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, a REHISA, Rede de Hidrologia do Semiárido, idealizada em 2000 com os objetivos de compartilhar experiências e informações dos estudos em bacias experimentais e representativas no semiárido brasileiro, numa formação de banco de dados, a rede é desenvolvida pelas instituições UFRPE, UFPE, UFAL, UNB, UFS, UFPB, UFC, FUNCEME, UFRN, UFCG e UEPB (REHISA, 2004). Tais estudos envolvem experimentos em campo e laboratório, uso de sensoriamento remoto e modelagem onde se pesquisam por exemplo: evapotranspiração, precipitação, hidrossedimentologia, lisimetria, umidade do solo, infiltração, dentre outros. A REHISA possui diversos trabalhos publicados em revistas nacionais e internacionais. Dentre estes, o trabalho de Araújo e Piedra (2009), em que uma das bacias analisadas, Aiuba, se encontra no semiárido, mostrou que a evapotranspiração foi uma das maiores responsáveis pela diferença de vazão gerada em relação à bacia de clima úmido mas também outros fatores podendo ampliar estas diferenças, encorajando mais estudos locais. Ainda, Oliveira *et al.* (2012), realizaram pesquisas em parâmetros biofísicos, envolvendo temperatura, vegetação e urbanização na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, em Pernambuco. Rocha (2008), elaborou sua dissertação de mestrado na bacia experimental de Santana do Ipanema, em Alagoas.

2.2 Umidade do solo

A umidade do solo é definida como a quantidade de água contida no solo em questão. Os processos que interagem com a umidade do solo são temas de pesquisas recentes em diversas disciplinas, tais quais: agricultura, biogeoquímica, ecologia e hidrologia (Lawrence & Hornberger, 2007).

Acerca da variável umidade do solo, Mittelbach *et al.* (2012) afirmam que suas interações junto a atmosfera receberam gradativa atenção nas pesquisas climáticas recentes. Bouten *et al.* (1992) descobriram que a umidade do solo é primariamente dependente das propriedades físicas do solo em questão. Ainda, Ritsema e Dekker (1994) informam que a umidade do solo pode variar bastante de local a local sondado, devido à heterogeneidade das propriedades hidráulicas do solo.

Rossato *et al.* (2013) e Liu *et al.* (2010) afirmam que a umidade do solo é uma variável chave nos processos hidrológicos, biológicos e biogeoquímicos, os quais são responsáveis pelas trocas de água e de energia na interface solo atmosfera e sua representação e medição precisas são requeridas para estimativa e previsão de infiltração, evapotranspiração, escoamento e fluxos de calor no solo, latentes e sensíveis. Além disso, Qiu *et al.* (2001) investigaram entre 1998 e 1999 numa bacia de 3,5 km² na China as relações que os índices ambientais, tais quais uso da terra, topografia, vegetação, precipitação e outros têm por objetivo representar os processos hidrológicos chaves através da variável umidade do solo, controlando a distribuição espacial da umidade do solo de um modo simplista, entretanto realística. Abelen e Seitz (2013), em seu trabalho no qual compararam os resultados de umidade do solo definidos por satélites para mapear a umidade do solo identificam alguns objetivos para criar ou melhorar conjuntos de dados globais sobre umidade do solo, como por exemplo: a necessidade de entender a natureza da umidade do solo e seus processos associados e o desenvolvimento de métodos para a validação dos produtos gerados a partir da umidade do solo.

2.3 Fatores que influenciam na umidade do solo

Qiu *et al.* (2001) utilizando pluviógrafos para medir a precipitação e uma sonda do tipo TDR, calibrada a partir de amostras manuais de 0 a 75 centímetros de profundidade, confirmaram suas hipóteses de que atributos ambientais, como uso do solo e topografia, executam funções importantes na distribuição espacial de média de tempo de umidade do solo e média da umidade do solo em suas diferentes camadas de profundidade. Ainda, Ruiz-Sinoga *et al.* (2011) estudaram a variabilidade da umidade do solo em algumas áreas no sul da Espanha de novembro de 2002 a novembro de 2004 mostram que a variabilidade espacial e temporal da umidade do solo possuem um papel importante na manutenção e restauração de cobertura vegetal e sua biodiversidade.

Num estudo sobre secas no estado norte-americano do Texas, Sullivan & Maidment (2012) afirmam que uma das formas de se considerar a seca é através da medição do estado

e vazão de rios importantes. Eles informam então que outro aspecto é a quantidade de água presente no solo, pois isto se relaciona diretamente a vegetação, que por sua vez preserva a qualidade do solo e evita processos erosivos. Assim, concluem que a seca pode ser melhor entendida quando vista por um panorama completo da umidade do solo no local. Qiu *et al.* (2001) ainda confirmaram que fatores como uso da terra e inclinação estão extremamente relacionados à umidade do solo, drenagem e escoamento das águas.

Segundo Tucci (2005), 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 do que 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.

Bracken e Croke (2007) argumentam, em seu estudo sobre conectividade hidrológica onde avaliaram cinco grandes componentes que influenciam no escoamento superficial, que faixas vegetadas contribuem para o aumento da infiltração devido ao aumento de matéria orgânica, da redução da massa específica do solo e pelo aumento da condutividade hidráulica.

Chen *et al.* (2007), ao estudarem o efeito de diferentes vegetações na dinâmica sazonal da umidade do solo em região semiárida da China, com coletas no mínimo bissemanais durante maio de 1986 até setembro de 1999 em profundidades de 0 a 100 centímetros espaçadas em 20 centímetros, verificaram que a parcela que estava coberta por uma espécie nativa da região apresentou os maiores valores médios de umidade do solo.

O aumento da média de umidade nos primeiros dias após a precipitação pode ser devido à interceptação vegetal que, após reter parte da precipitação, começa a liberar água para o solo, por outro lado, o fato da umidade do solo, sob esta condição, decair após o terceiro dia pode ser devido à evapotranspiração ser mais acentuada na primeira condição (SANTOS *et al.*, 2010).

A manutenção da umidade volumétrica do solo é uma resposta adaptativa da vegetação como forma de manter o estoque de água por mais tempo (COSTA, 2012).

2.4 Formas de medição da umidade do solo

Segundo Vereecken *et al.* (2013), que realizaram uma revisão do estado da arte sobre as dinâmicas espaço-temporais da umidade do solo, existem diversas formas de se quantificar a umidade do solo, tais quais: Sondas de Reflectometria Temporal (*Time Domain*

Reflectometry, ou TDR), Sensores de Capacitância e TDT (*Time Domain Transmission*) e a recente *Cosmic-Ray Probe*. Existem também formas não invasivas de se medir a umidade do solo, como por exemplo: Radar Penetrante no Solo (*Ground Penetrating Radar*, ou GPR), Indução Eletromagnética (*Electromagnetic Induction*) e Tomografia de Resistividade Elétrica (*Electric Resistivity Tomography* ou ERT). Por fim, os métodos de medição remota *Passive Microwave Remote Sensing* e (*Airborne and spaceborne active microwave remote sensing*.

Rossato *et al.* (2013), que estudaram os impactos das características de superfície terrestre para a umidade do solo ainda utilizaram por exemplo, métodos de medição envolvendo estimativas a partir de satélites e algoritmos para quantificar a umidade do solo no Brasil. Estes autores se utilizaram ainda de dados de precipitação, temperatura e umidade do solo obtida por satélites para o Brasil e América do Sul, pois tendo em vista que o algoritmo utilizado foi desenvolvido na América do Norte, os autores precisaram então realizar as calibrações e validações necessárias para o uso do algoritmo.

Pastuszka *et al.* (2013) estudaram e realizaram experimentos com sondas TDR durante o outono de 2012 na Polônia. Os autores informam que enquanto os métodos convencionais de amostragem de solos para avaliação da umidade são métodos destrutivos, visto que se deixam buracos no local de coleta, as sondas realizam o método de forma indireta, com menos interferência no local e ainda por cima de forma automática. Eles descobriram que as sondas TDR posicionadas na vertical obtêm o valor da média aritmética da umidade do solo amostrado, e que isto significa que esta umidade medida é representativa de toda esta amostra, mesmo ocorrendo mudanças rápidas na umidade do solo, assim as sondas podem ser utilizadas em ambiente dinâmicos. Estes autores ainda comentam que técnicas de medição de umidade do solo vêm sendo desenvolvidas há 70 anos, sendo o mais básico o método gravimétrico, que também foi utilizado neste estudo na bacia experimental do Guaraíra, em vista de se obter os resultados de umidade do solo para calibração junto às sondas instaladas na bacia experimental.

Para análise gravimétrica de amostras de solo, há as desvantagens de deformação do solo durante a amostragem, seu transporte e custos das expedições. (VIENKEN *et al.* 2013). Isto reforça o uso de métodos de medição da umidade como por exemplo o uso das sondas tipo TDR. Vereecken *et al.* (2013) avaliam que as sondas TDR, introduzidas na década de 80, medem a permissividade dielétrica do solo, que é conhecido por ser fortemente relacionado a umidade do solo devido ao grande contraste entre a permissividade dielétrica da água e a dos variados elementos constituintes dos solos. Santos (2010) e Brocca *et al.*

(2012) utilizaram sondas TDR em seus estudos sobre a umidade do solo em região semiárida de Pernambuco e em duas regiões centrais da Itália, respectivamente. Qiu *et al.* (2001), Coppola *et al.* (2011), Ruiz-Sinoga *et al.* (2011), Cho & Choi (2014), Monte-Mor *et al.* (2012) e Costa (2012) também utilizaram sondas TDR em suas pesquisas.

2.5 Análise Espaço-Temporal da umidade do solo

Coppola *et al.* (2011) afirmam que a umidade volumétrica no solo varia de acordo com o local e o tempo. Além disso, os autores afirmam que nos últimos trinta anos, muitas pesquisas têm sido direcionadas para estudar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo, isto mostra como as pesquisas direcionadas a umidade do solo são relativamente novas.

Vachaud *et al.* (1985) introduziram o conceito de estabilidade temporal em seu trabalho que estudou a estabilidade temporal da função massa específica de probabilidade da umidade do solo medida espacialmente. Para tanto, aplicaram a técnica de análise temporal das diferenças entre valores médio individuais e espaciais e a técnica do *ranking* de correlação de Spearman com o intuito de inferir se propriedades estatísticas das características invariáveis no tempo podem ser atribuídas a locais individuais. Os autores tiveram como objetivo no estudo introduzir um método de reduzir o número de observações necessárias para a caracterização do comportamento de um campo de solo. Para isto, inferiram a pesquisa em três localidades. Um campo gramado em Grenoble, na França em 1985, foi equipado com 17 tubos de nêutron inspecionados 24 vezes durante 2 anos e meio. Em outro campo plantado com oliveiras em Sevilha, na Espanha em 1984, foram instalados nove tubos de nêutrons e foram realizadas medições trimestrais durante 2 anos. Por fim, num campo cultivado com trigo em Mornag, na Tunísia em 1983, utilizou-se o método gravimétrico por cinco vezes e examinado durante um ano em quatro pontos utilizando um medidor de umidade de nêutrons.

Todos os dados do estudo de Vachaud *et al.* (1985) mostraram a existência de uma estabilidade temporal muito significante de determinados locais individuais caracterizados pelo mesmo parâmetro na distribuição estatística das observações de campo. Foi mostrado que alguns locais conservam a propriedade de representar a média e os valores extremos da umidade do solo em qualquer época ao longo do ano. Esta estabilidade parece ser explicada por uma grande extensão por relações entre a textura do solo e umidade volumétrica. Propriedades de retenção do solo, bem como condutividade hidráulica, em qualquer profundidade são altamente correlacionadas com a textura do solo nesta mesma

profundidade. Por fim, os autores encorajaram estudos semelhantes em outras condições de solo, clima, vegetação e topografia.

Cho & Choi (2014) estudaram as relações entre variabilidade espaço-temporal da umidade do solo e fatores meteorológicos na península sul-coreana com o conceito de estabilidade temporal proposto por Vachaud *et al.* (1985) para determinar a estabilidade de padrões temporais para o espaço, visto que o entendimento das dinâmicas espaço-temporais da umidade do solo pode ser útil para sensoriamento remoto e aplicação de modelagem e para estudos de mudanças climáticas. Eles ainda concluíram que além da validação de seus sensores remotos, pode-se escolher melhor os pontos a serem aferidos, que representam melhor determinadas regiões.

Brocca *et al.* (2012) estudaram variabilidade espaço-temporal da umidade do solo em duas bacias hidrográficas de grande porte na região central da Itália com o objetivo de expandir os resultados obtidos em bacias de pequeno e médio portes com foco no aumento da variabilidade espacial da umidade do solo com o aumento da área de estudo e o número ideal de pontos para medição que estime o padrão temporal da média de umidade do solo de toda a área. A campanha teve lugar em 2 áreas de 178 e 242 km² da região central da Itália, e para cada área foram selecionados 46 lugares de amostragem com 3 pontos de coleta cada desde janeiro de 2008 até fevereiro de 2009, com exceção dos meses de verão devido a dureza do solo da região investigada. Estes pesquisadores utilizaram métodos estatísticos para se analisar a variabilidade da umidade do solo tanto no espaço quanto no tempo. Com isto, estes pesquisadores descobriram através da análise estatística que a umidade do solo nos dois locais é bastante semelhante em ambos termos de valores e variabilidade, devido à pluviosidade e características do solo e terreno semelhantes. Os resultados da pesquisa confirmaram que a variabilidade temporal da umidade do solo é mais significante que a espacial e a estimativa de um padrão espacial de umidade do solo durante períodos de transição é mais difícil e, portanto, sujeito a maiores incertezas. Ainda, para o número de amostras requeridas, se a precisão requerida é de 2% vol/vol, apenas dois locais por 100km² são necessários; e no caso de mais que cinco locais o aumento de precisão se torna desprezível, já que tantos locais a mais de coleta não fariam uma diferença significativa na qualidade de dados coletados, o que dá um número ótimo de uma estação de monitoramento por cada 50km² para o local estudado.

Mittelbach & Seneviratne (2012) também estudaram a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo. Sua pesquisa investigou a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo distinguindo as contribuições dos termos variáveis e invariáveis no tempo em 14

pontos da rede de umidade do solo da rede do projeto SwissSMEX entre maio de 2010 a julho de 2011 baseando-se no fato de que existem diversos estudos sobre a variabilidade espacial e estabilidade temporal da umidade do solo com pouco tempo de amostragem de dados, enquanto que pouco se sabe sobre a influência dos termos variáveis e invariáveis no tempo. Os autores tiveram como objetivo observar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo num período de tempo maior que o usual e através de suas contribuições variáveis e invariáveis no tempo de forma separada e detalhada. Estes autores coletaram dados em 14 pontos na área do projeto SwissSMEX durante 15 meses. No intuito de distinguir as contribuições decompondo-se a umidade do solo de cada ponto em sua média temporal e sua anomalia temporal, e com isto estenderam o método proposto por Vachaud *et al.* (1985) de identificar os pontos mais representativos para se observar a estabilidade temporal e realizar as classificações de cada ponto de coleta. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que os principais fatores contribuintes para o componente estático são a textura do solo e a topografia enquanto que para o componente dinâmico as condições meteorológicas e climáticas, onde estas últimas ainda induzem variações espaciais nestas dinâmicas. Os resultados da referente pesquisa ainda mostraram que os pontos de coleta mais representativos para a média espacial não corresponderam com os pontos de coleta mais representativos para a média das dinâmicas da umidade do solo. Assim, os autores concluíram que o frequente uso de avaliações das características do quadro espaço-temporal da umidade do solo não se aplica a anomalias temporais da umidade do solo, tendo em vista que a análise da umidade do solo decomposta revela uma pequena contribuição das dinâmicas em relação ao total da variabilidade da umidade do solo.

3 ÁREA DE ESTUDO E REDE DE MONITORAMENTO

A bacia experimental do riacho Guaraíra, área de estudo desta pesquisa, possui uma área aproximada de 5,84 km², localizada no município de Pedras de Fogo, no estado da Paraíba no Nordeste Brasileiro, pertencente a GIASA sob administração do grupo BioSev. Está localizada entre as coordenadas N 9.190,80 km e 9.195,25 km e E 274,50 km e 277,00, Zona 25 Sul no sistema Universal Transverse Mercator (UTM). A bacia experimental está inserida na bacia hidrográfica do rio Gramame, onde se localiza a barragem Gramame-Mamuaba, responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana da capital paraibana.

Já 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 a capital do Estado, João Pessoa, abrangendo importantes centros urbanos e industriais, bem como atividades agro-pecuárias. Esta bacia representativa é situada parte no município de Alhandra e parte no de Pedras de Fogo entre as coordenadas UTM Norte 9.190,80 km e 9.195,25 km, e Leste 274,50 km e 277,00 km (*Datum SAD 69*), distante 40 km de João Pessoa, capital do estado da Paraíba. A bacia hidrográfica representativa do rio Gramame é considerada de grande importância para a região metropolitana de João Pessoa, devido à sua contribuição para o abastecimento d'água de cerca de um quarto da população do Estado da Paraíba, inseridos, além da capital, nos municípios de Cabedelo, Santa Rita, Bayeux e Conde (PDRH, 2000). A Figura 1 mostra as bacias hidrográficas citadas.

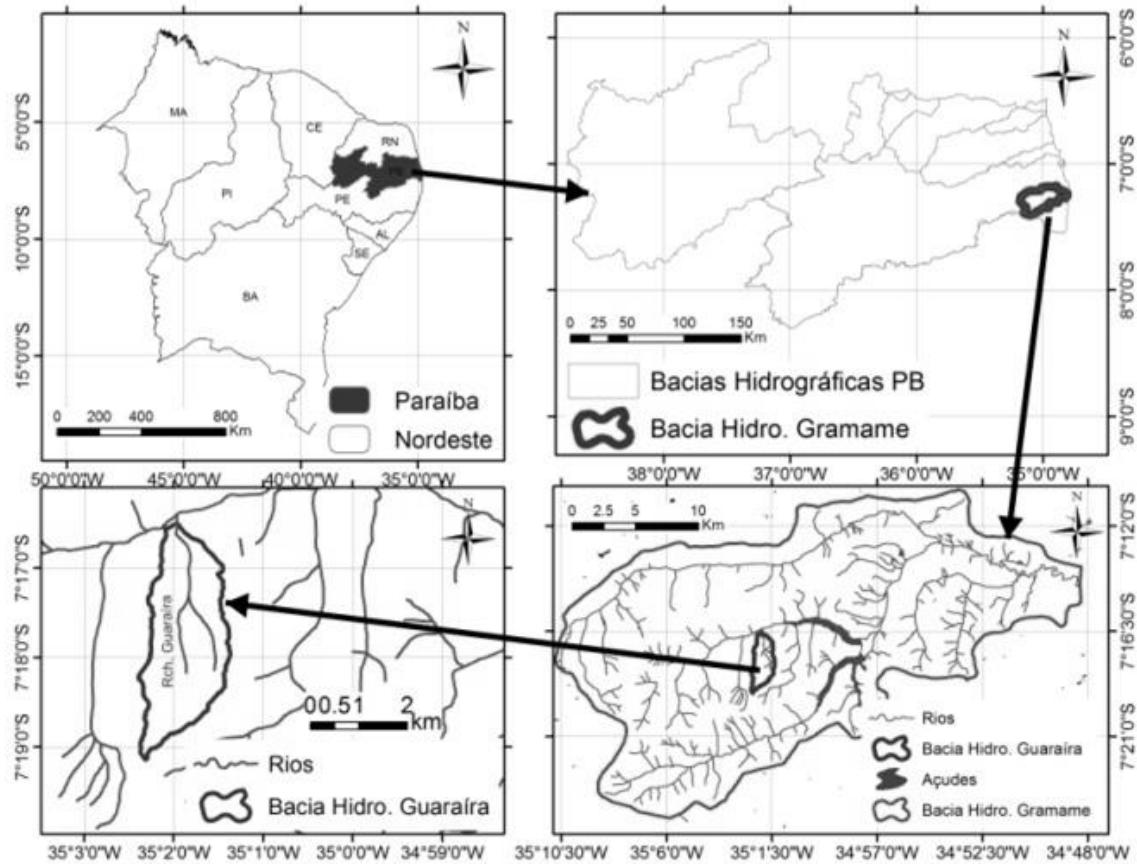


Figura 1 - Localização da bacia experimental do riacho Guaraíra inserida na bacia hidrográfica representativa do rio Gramame

Detalhando a bacia hidrográfica experimental do riacho Guaraíra, a Figura 2 mostra o mapa com a hidrografia, relevo e localização das estações de monitoramento, sendo estas quatro estações pluviográficas, uma estação climatológica e três estações limimétricas, cujas coordenadas se encontram na Tabela 1, exceto das estações limimétricas, que não foram utilizadas nesta dissertação.

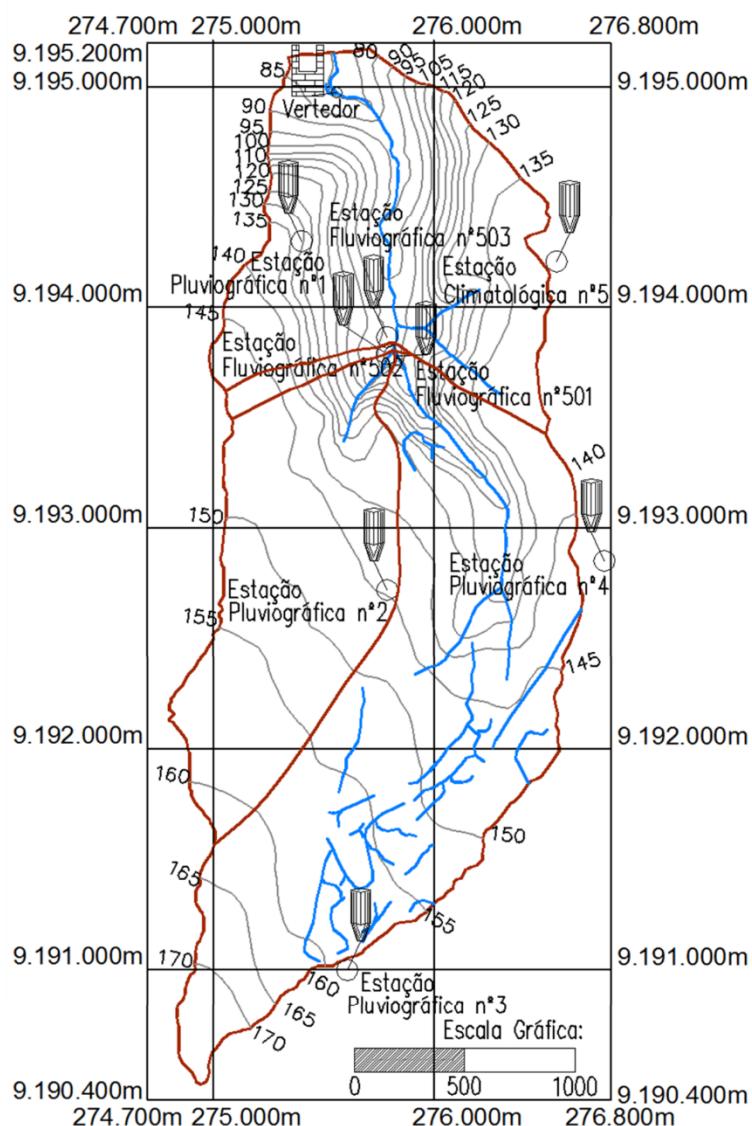


Figura 2 – Relevo, hidrografia e localização das estações de monitoramento da bacia do riacho Guaraíra

Tabela 1 - Características das estações pluviográficas e climatológica da bacia experimental do riacho Guaraíra

Identificação	Tipologia	Longitude (m)	Latitude (m)	Vegetação	Solo
Est. Pluv. 01	Estação Pluviográfica	275.401,85 L	9.194.297,56 S	Mata atlântica	Arenoso
Est. Pluv. 02	Estação Pluviográfica	275.788,91 L	9.192.719,43 S	Poucas árvores	Arenoso
Est. Pluv. 03	Estação Pluviográfica	275.608,07 L	9.190.997,32 S	Poucas árvores	Arenoso
Est. Pluv. 04	Estação Pluviográfica	276.824,75 L	9.192.848,39 S	Quase sem vegetação	Arenoso
Est. Clim. 05	Estação Climatológica	276.555,55 L	9.194.206,26 S	Gramíneas	Arenoso

É sabido que o relevo de uma bacia hidrográfica pode modificar os fatores meteorológicos e hidrológicos, tendo em vista que a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno, enquanto que a temperatura, precipitação e evapotranspiração, são bastante influenciados pela altitude. Observa-se então pelas curvas de nível que a altitude da bacia hidrográfica experimental do riacho Guaraíra varia de 170 metros em seus pontos mais altos até 80 metros em seu exutório.

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. Além disso, a bacia do rio Gramame apresenta características de clima tropical chuvoso, segundo a classificação de Köeppen e seu clima é do tipo tropical úmido e temperatura média anual de 26° C. (PDRH, 2000). A classificação climática para a região, de acordo com Köeppen, indica para um clima tropical chuvoso do tipo As', quente e úmido, sem períodos frios e com chuva predominante de outono-inverno. A proximidade da região com a linha do Equador determina as altas temperaturas durante o ano inteiro, com média superior aos 26°C, sendo que a média das máximas atinge 30°C (Janeiro-Abril) e a média das mínimas é de 23°C (junho-agosto) (Paraíba, 1985).

De acordo com Lira et al. (2003), o uso do solo da bacia é concentrado principalmente na monocultura da cana-de-açúcar. No entanto, existem alguns remanescentes de vegetações de Capoeira e de Mata Atlântica (IBESA, 2002). As Figura 4, Figura 5 e Figura 6 mostram a cobertura vegetal da bacia experimental.

A bacia experimental do riacho Guaraíra é composta principalmente por vegetação e mata do tipo mata atlântica, enquanto que o uso antrópico do solo é majoritariamente cana de açúcar, com uma pequena área de plantações de abacaxi, ainda com pequenas e poucas estradas de terra. A Figura 3 ilustra o uso do solo na bacia.

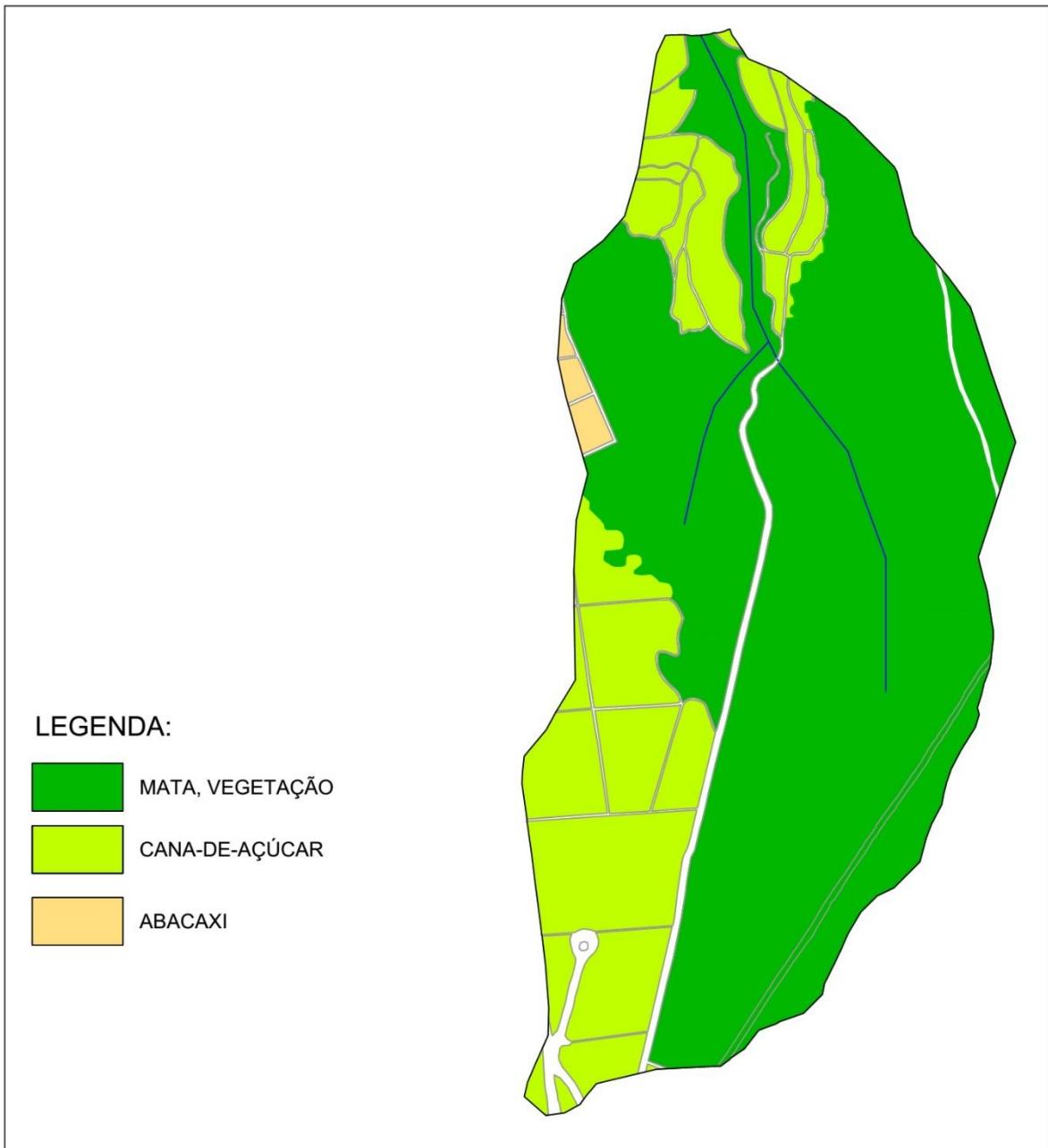


Figura 3 – Uso do solo na bacia experimental

Ainda, as Figura 4, Figura 5 e Figura 6 ilustram as bacias através de fotos tiradas no campo durante as visitas para coletas e manutenção.



Figura 4 – Vegetação da área de estudo



Figura 5 – Vegetação da área de estudo



Figura 6 – Vegetação da área de estudo

Goldfarb *et al.* (2002) descreveram com mais detalhes as características desta bacia hidrográfica experimental.

Com relação à rede de monitoramento apresentada na Tabela 1, as estações pluviográficas são compostas por sensores de medição da precipitação do tipo báscula (modelo TB4) e sensor de umidade do solo do tipo TDR (*Time Domain Refletometry*) (modelo CS616). A precipitação é medida e armazenada num *datalogger* a cada minuto de sua ocorrência, e acumulada a cada 6 minutos, enquanto que a variável da sonda TDR é armazenada a cada 60 minutos. As sondas TDR foram instaladas verticalmente no solo, de modo a representar a umidade na camada superficial do solo de 30 cm. A estação climatológica além desses mesmos sensores têm sensores para medição de: velocidade e direção do vento, temperatura e umidade do ar, insolação, pressão barométrica e temperatura do solo a três profundidades, sendo que o passo de tempo para armazenamento dessas

variáveis é de 15 minutos. Todas as quatro estações de monitoramento da bacia experimental contam ainda com abrigo, *datalogger*, painel solar, bateria e regulador de voltagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Recuperação e manutenção dos equipamentos

Esta é uma pesquisa em que se faz necessária a obtenção dos dados *in loco*, tendo em vista que não haviam dados sobre umidade do solo gravimétrica na bacia experimental do riacho Guaraíra, e os dados existentes obtidos através das sondas TDR ainda não podiam ser utilizados devido à necessidade de calibração da curva, tornando-se possível apenas após realizadas as coletas manuais em campo. Assim, foram necessárias visitas à campo com frequência quinzenal, o que demandou várias pessoas envolvidas nesta e em outras pesquisa, tempo e equipamentos que devem estar sempre em plena condição de uso.

Desta forma, desenvolveu-se desde o fim do ano de 2012 um trabalho de recuperação e manutenção das estações de monitoramento presentes na bacia experimental. Troca de baterias e *dataloggers*, limpeza de painéis solares, pluviógrafos e abrigos foram e continuam sendo executadas à rigor, com testes e calibrações em laboratório e em campo. Essas manutenções foram e continuam sendo feitas regularmente, com as verificações ocorrendo nas idas à campo para baixar os dados ou instalar novos equipamentos, de forma que se perca o mínimo possível de dados que vêm sendo monitorados na bacia experimental. Entretanto, devido à problemas que não puderam ser solucionados à época da coleta dos dados, a estação pluviométrica 03 foi retirada deste estudo, podendo ser inserida nos próximos, visto que o problema com esta já foi solucionado. As Figura 7 e Figura 8 mostram a manutenção dos aparelhos.



Figura 7 – Equipamentos para manutenção das estações de estudo



Figura 8 – Manutenção das estações de estudo

Mesmo com todos os cuidados e manutenções, há ainda o problema do vandalismo nas estações. Algumas delas já foram arrombadas e assaltadas anteriormente, mesmo se localizando escondidas até dentro das matas da bacia. Estas estações foram novamente fechadas com cadeados e espera-se que não ocorram mais incidentes do tipo.

4.2 Coleta das amostras indeformadas de solo

Para realizar as coletas de solo, procedeu-se primeiramente de um planejamento, tendo em vista transporte, pessoas e equipamentos a serem utilizados durante e posteriormente à ida a campo, como por exemplo o uso da estufa. Esta etapa foi particularmente importante devido à duração e por vezes dificuldades na coleta das amostras.

Definiram-se os locais de coleta como sendo os cinco pontos onde se localizam as estações pluviográficas e a climatológica, pela existência das sondas TDR. As amostras foram coletadas indeformadas em período mensal e/ou quinzenal, dependendo das precipitações, época na qual as coletas foram intensificadas, em profundidades de 5, 15, 30 e 50 centímetros, semelhante ao aplicado por Qiu et al. (2001). O processo de coleta é simples: escava-se um pequeno buraco no solo com um escavador até a profundidade desejada e então insere-se na lateral de cada profundidade, com auxílio de uma régua, o amostrador, que se trata de um cilindro de volume conhecido. Durante a coleta, as amostras foram devidamente catalogadas numa planilha padronizada e seus recipientes metálicos identificados, vedados e dispostos de forma regular no veículo, para evitar o escape qualquer conteúdo. As amostras foram realizadas em duplicata, isto é, duas amostras foram retiradas para cada profundidade de cada ponto estudado, a fim de se analisar o método praticado e poder proceder à calibração das sondas TDR, em conformidade com as recomendações prescritas pelo manual da Decagon Devices, Inc. escrito por Cobos & Chambers (2010). Para obter as coordenadas dos pontos de coleta, utilizou-se de um GPS do tipo GARMIM - GPSmap76CSx. A

Tabela 2 resume as coletas de amostras de solo, enquanto a Figura 9 ilustra o processo de coleta das amostras.

Tabela 2 – Informações das coletas de solo manuais

	Est. Pluv. 01	Est. Pluv. 02	Est. Pluv. 03	Est. Pluv. 04	Est. Clim. 05

Período (dias)	338				
Desde	02/10/2013				
Até	04/09/2014				
Campanhas	14				
Profundidades de Coleta	05, 15, 30 e 50 (cm)				
Tipo de amostragem	DUPLICATA				
Quantidade de Coletas	28	28	28	28	28
Total de Coletas	140				
Quantidade de Amostras	112	112	112	112	112
Total de Amostras	560				



Figura 9 – Coleta de amostras indeformadas de solo

4.2.1 Obtenção dos valores de umidade do solo e massa específica aparente das amostras em laboratório

Ao chegar do campo, procedeu-se imediatamente com a pesagem das amostras em seus recipientes destampados em uma balança de precisão. Os valores foram então anotados numa planilha eletrônica pré-formulada e as amostras de solo coletadas inseridas numa estufa, onde foram aquecidas a temperatura de 105° C durante 24 horas, de acordo com o método da EMBRAPA (1997). Após a secagem, as amostras foram então retiradas da estufa, pesadas e anotados os valores de suas massas secas na planilha. Por fim, o solo utilizado foi descartado. Com os dados organizados na planilha, procedem-se com cálculos de umidade volumétrica e massa específica aparente do solo, como descrito em Cobos & Chambers (2010) e os cálculos de umidade gravimétrica do solo (GWC), como demonstrado por Dorigo et. al (2009) e Sá et al. (2008) na forma da equação 1:

$$GWC = \frac{Massa_{água}}{Massa_{solo}} \quad (1)$$

Para se calcular a massa específica aparente do solo, ρ , o cálculo consistiu na divisão da massa seca da amostra dividido pelo volume do recipiente amostrador em cm³ como na equação 2:

$$\rho = \frac{Massa_{solo}}{Volume_{recipiente}} \quad (2)$$

A quantificação da umidade volumétrica de solo, VWC (*Volumetric Water Content*), foi feita como a massa de água em gramas dividido pelo volume do recipiente amostrador em cm³ ou simplesmente o valor de GWC vezes o valor de ρ como na equação 3:

$$VWC = GWC * \rho \quad (3)$$

E quando o solo estava saturado em alguma profundidade, a planilha não marca valores.

4.3 Coleta dos dados das sondas TDR nas estações

Cada estação possui sua própria sonda TDR, modelo CS-616, dotada de uma base em epóxi de 5cm e 2 hastes metálicas de comprimento de 30 centímetros. As sondas ficam enterradas no solo até a base e são ligadas à bateria de 12 Volts e a um *datalogger* que ficam no abrigo. As sondas, através das hastes metálicas emitem então pulsos eletromagnéticos de hora em hora, que medem a permissividade elétrica do solo em questão, sendo que quanto mais água este solo conter, maior sua permissividade elétrica. O registro horário da constante dielétrica para esse modelo de sonda pode oscilar na faixa de 15 a 35 µs (microssegundos). Coletaram-se então estes dados registrados pela sonda durante o ano hidrológico estudado, 2013 à 2014. A Figura 10 ilustra a coleta de dados.



Figura 10 – Coleta dos dados das estações

Entretanto, foi necessário efetuar a calibração das sondas para se chegar aos valores de umidade volumétrica, objeto principal da pesquisa.

4.4 Calibração das sondas TDR

Antes de proceder com a calibração das sondas TDR para cada estação de monitoramento foi realizada uma análise estatística dos dados obtidos em campo. Inicialmente, foram descartados os resultados obtidos para as profundidades de 5 e 50 cm, a primeira por conter muito material orgânico e por estar na parte superior da sonda TDR composta de epóxi, não interferindo portanto nas medições TDR, e a segunda por estar fora da camada de 30 cm, representativa do valor medido pelas sondas TDR quando inseridas verticalmente no solo. Foram então analisadas as massa específicas aparentes de cada estação, para definição de um valor médio por estação, mais uma faixa de variação possível dessa variável.

Com isso, adotou-se assim para cada ponto de coleta um valor médio de massa específica aparente dentro de um intervalo de confiança. Esse procedimento para definição do valor médio da massa específica aparente foi adotado, pois esse valor é utilizado para quantificar a umidade volumétrica do solo, conforme visto no cálculo do VWC.

As sondas TDR de medição de umidade volumétrica do solo utilizadas neste estudo foram o modelo CS616, da Campbell Scientific. O fabricante das sondas TDR fornece uma curva que relaciona a umidade volumétrica de solo (em fração) com o período de saída da sonda (em microsegundos). Porém, essa curva é válida apenas para as condições especificadas no manual do fabricante. Desta forma, o próprio fabricante recomenda a

calibração da sonda com dados obtidos em campo, que dependem, dentre outras variáveis, da massa específica aparente do solo.

De acordo com o manual da sonda TDR, modelo CS616, o método de medição da reflectometria do volume de água no solo é uma forma indireta de medição, que é sensível à permissividade dielétrica do material em torno das hastes dessa sonda. Assim, sendo a água um elemento com alto valor de permissividade dielétrica, ao misturar-se ao solo e ar, a permissividade dielétrica muda e é utilizada para estimar a umidade volumétrica do solo. O princípio fundamental de operação da sonda TDR é então a medição do tempo de deslocamento (em microssegundos - μ s), também denominado período de retorno, de um pulso eletromagnético ao longo de suas hastes. Este tempo de deslocamento é dependente da permissividade dielétrica do meio, que por sua vez é dependente da concentração de água no solo (Campbell, 2002).

Sabendo-se que o período de retorno depende da concentração de água no solo, que varia, e das características meio (solo), que espacialmente, num espaço pequeno, deveria variar pouco, e que amostras de solo foram coletadas no entorno do local onde as sondas foram instaladas, decidiu-se determinar um valor médio de massa específica aparente único para cada estação de monitoramento.

Desta forma, para cada estação de monitoramento foi determinado um conjunto de pontos (período de saída da sonda TDR e umidade volumétrica do solo), que foram plotados em gráficos, a fim de determinar a melhor equação de ajuste desses pontos.

O ajuste desses conjuntos de pontos, segundo o fabricante da sonda, pode ser realizado por meio de uma equação linear ou quadrática. Se a faixa de variação da umidade do solo for pequena, pode ser utilizada uma ou outra equação, se for maior a quadrática se adéqua melhor. Assim, para cada estação de monitoramento, diferentes equações foram testadas, em função da faixa de variação da umidade do solo. Então, para definição da curva de cada estação foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) e verificada se aplicação da curva poderia gerar valores fisicamente impossíveis, como valores negativos de umidade volumétrica do solo.

4.5 Definição da resolução temporal a ser utilizada

As sondas TDR instaladas nas estações da área de estudo medem a constante dielétrica a cada hora. Isto resulta numa resolução temporal bastante alta e por vezes até difícil de se trabalhar, dependendo da escala de tempo desejada para o estudo. Desta forma, optou-se por realizar uma análise gráfica da resolução temporal dos dados em um passo de 1 hora, 2 horas,

4 horas, 8 horas, 12 horas, 24 horas, 2 dias, 4 dias, 7 dias e por fim 14 dias, tal como realizado por Molina *et al.* (2014).

4.6 Caracterização dos solos da bacia experimental

Sendo as características do solo importantes para o entendimento da umidade do solo, estudaram-se os solos no entorno de cada estação. Estes estudos consistiram na realização do ensaio de granulometria dos solos bem como sua caracterização textural.

O ensaio de granulometria consiste em se retirar amostras do solo desejado, retirando suas impurezas, tais quais restos de vegetação, fungos, animais, e passando este solo em sucessivas peneiras. Visando verificar a homogeneidade das amostras, o ensaio foi realizado em duplicata. Procedeu-se então a criação de tabelas e gráficos representando o resultado de cada amostra, a média das amostras por estação e por fim a média das estações representando a bacia experimental do riacho Guaraíra.

Assim, procedeu-se uma ida à campo no final do ano de 2014 com a intenção de coletar as amostras de solo de cada estação. Foram coletados aproximadamente 2 quilogramas de solo por amostra. Utilizou-se pá para a escavação do solo, que foi armazenado em sacolas previamente identificadas para cada estação.

Ao chegar do campo, retirou-se as impurezas e secou-se as amostras em estufa. Então, pesou-se 1 quilograma de cada estação e iniciou-se o processo de destorramento do solo utilizando-se almofariz e mão de gral no laboratório de solos da UFPB.

Com as amostras prontas, armou-se o conjunto de seis peneiras, da peneira nº 16 até a peneira nº 200, cujas aberturas vão de 1,200 a 0,074 milímetros. O solo então é depositado e peneirado, com as partículas mais finas passando da peneira mais grossa até a mais fina. Após o peneiramento, retirou-se e pesou-se o solo contido em cada peneira em balança de precisão de 0,1 grama. As massas retidas em cada peneira foram então anotadas numa planilha para cálculo das porcentagens de material retidas e que passam, simples e acumuladas. É calculada também a porcentagem do tipo de material da amostra. Pedregulho são as amostras com diâmetro acima de 2 milímetros, areia grossa de 2 a 0,42 milímetros, areia fina de 0,42 a 0,074 milímetros e por fim as partículas classificadas como silte são aquelas com diâmetro inferior a 0,074 milímetros, ou seja, as que passaram na peneira de nº 200. As Figura 11, Figura 12 e Figura 13 ilustram o processo do ensaio de granulometria.



Figura 11 – Ensaio de granulometria do solo - preparação das peneiras



Figura 12 – Ensaio de granulometria do solo - pesagem de amostra



Figura 13 – Ensaio de granulometria – solo retirado da estufa

A textura dos solos foi caracterizada através da técnica manual bem como do uso do triangulo de grupamento textural, que classifica o solo de acordo com sua quantidade de areia, argila e silte.

4.7 Tratamento e análise estatística dos dados

Ao se estudar os dados obtidos, além de identificar suas possíveis falhas, realizou-se um tratamento destes dados antes de se efetuar as análises. O tratamento consistiu em corrigir e/ou apagar falhas que por ventura tenham vindo a ocorrer nos dados coletados e também em se definir um passo de tempo único para as estações. A estação pluviográfica 3 foi excluída deste estudo devido à alta quantidade de falhas para o período.

Para isto, com os dados brutos já em planilha, organizaram-se estas de forma a verificar a quantidade de falhas e em que período do tempo cada uma delas se encontram. Desta forma, visando obter um ano hidrológico com a menor quantidade de falhas possível com um período idêntico em todas as estações, optou-se por utilizar os dados para o estudo de 21/04/2013 até 13/04/2014, o que define o ano hidrológico de 2013-2014 bem como é um período com pouca falha de dados. A Tabela 3 resume os dados coletados das sondas utilizadas neste estudo.

Tabela 3 – Informações das coletas das sondas TDR

INFORMAÇÕES DAS SONDAS TDR COM AS MESMAS DATAS NO ANO HIDROLÓGICO 2013-2014				
	Est Pluv 01	Est Pluv 02	Est Pluv 04	Est Clim 05
Período (dias)			358	

Desde	21/04/2013			
Até	13/04/2014			
Dados Medidos (horário)	8305	8567	8592	7862
Dados Perdidos (horário)	287	25	0	730
% Dados Medidos	96,66%	99,71%	100,00%	91,50%
% Dados Perdidos	3,37%	0,29%	0,00%	8,50%
Total dados medidos	8592			

Também, foram efetuados cálculos estatísticos sobre estes dados, que permitiram uma avaliação de sua continuidade, quantidade e qualidade. Foram então calculados média, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação para cada visita, amostra e profundidades diferentes, bem como seus resultados para toda a bacia experimental.

A partir disto, pôde-se representar graficamente estes dados através de gráficos de barras, histogramas e *box-plot*, também para cada visita, amostra, profundidade e para a bacia experimental.

4.8 Dados pluviométricos

De acordo com 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.

Desta forma, de posse dos dados de pluviometria das cinco estações, foi realizada uma verificação em cada posto para o período estudado (21 de abril de 2013 a 13 de abril de 2014), para se proceder com a escolha da estação mais representativa para a precipitação na bacia experimental. Essa verificação consistiu em se observar qual das estações possui a maior consistência de dados para o período estudado, ou seja, menos falhas. Assim, optou-se por utilizar a estação pluviométrica 04 para representar a precipitação na bacia hidrográfica experimental do riacho Guaraíra no período estudado.

4.9 Variabilidade espaço-temporal da umidade do solo

4.9.1 Análises de distinção dos termos variáveis e invariáveis no tempo para a variabilidade espacial

Para se analisar a variabilidade espaço-temporal dos dados de umidade do solo da bacia experimental, utilizaram-se as metodologias propostas por Vachaud *et al.* (1985), Brocca *et al.* (2012) e Mittelbach & Seneviratne (2012). Estas metodologias combinam as abordagens da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo clássica, caracterizadas pelas análises estatísticas espaciais e temporais da umidade do solo, acrescidas dos fatores

contribuintes dos termos variáveis e invariáveis no tempo, para a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo em qualquer ponto no tempo.

Desta forma, visando uma maior clareza nos cálculos e interpretação dos dados, definiram-se as variáveis média pelo símbolo μ , variância como sendo σ^2 e desvio padrão como σ . A umidade do solo é representada por S , enquanto o tempo é representado por t e o espaço (ponto de coleta) por n , com T representando o tempo total e N o total de locais, com \hat{t} representando as estatísticas temporais e \hat{n} as espaciais. Desta forma, temos S_{tn} como sendo a umidade do solo no tempo t e ponto n , as equações 4 e 5 mostram respectivamente a média espacial e a variância espacial como $\mu_{\hat{n}}(S_{tn})$ e como $\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn})$ em qualquer instante t do tempo.

$$\mu_{\hat{n}}(S_{tn}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S_{tn}) \quad (4)$$

$$\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S_{tn} - \mu_{\hat{n}}(S_{tn}))^2 \quad (5)$$

Desta forma, a equação 6 define a média temporal da umidade do solo em qualquer ponto n .

$$\mu_{\hat{t}}(S_{tn}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (S_{tn}) \quad (6)$$

A fim de facilitar as equações, bem como seu entendimento, denotou-se a média temporal $\mu_{\hat{t}}(S_{tn})$ como M_{tn} .

A equação 7 representa o desmembramento da umidade do solo S_{tn} em sua média temporal M_{tn} , isto é, sua parcela invariável no tempo, e sua anomalia A_{tn} , parcela variável no tempo.

$$S_{tn} = M_{tn} + A_{tn} \quad (7)$$

A equação 8 mostra a correspondência de todos os pontos:

$$\mu_{\hat{n}}(S_{tn}) = \mu_{\hat{n}}(M_{tn}) + \mu_{\hat{n}}(A_{tn}) = M_{t\hat{n}} + A_{t\hat{n}} \quad (8)$$

Utilizando as equações 7 e 8 torna-se possível decompor a variância temporal $\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn})$ nos termos variáveis e invariáveis no tempo, substituindo estas equações nas equações 1 e 2, tem-se a equação 9:

$$\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(M_{tn} + A_{tn}) - (M_{t\hat{n}} + A_{t\hat{n}})]^2 \quad (9)$$

A equação 9 ainda pode ser reescrita como na forma da equação 10, que resulta na equação 11:

$$\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(M_{tn} - M_{t\hat{n}})^2 + 2(M_{tn} - M_{t\hat{n}}) + (A_{t\hat{n}} - A_{tn})]^2 \quad (10)$$

$$\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn}) = \sigma^2_{\hat{n}}(M_{tn}) + 2\text{cov}(M_{tn}, A_{tn}) + \sigma^2_{\hat{n}}(A_{tn}) \quad (11)$$

Onde $\sigma^2_{\hat{n}}(M_{tn})$ representa a variância espacial da média temporal da umidade do solo, $\sigma^2_{\hat{n}}(A_{tn})$ a variância espacial das anomalias e $2\text{cov}(M_{tn}, A_{tn})$ a covariância espacial entre a média temporal da umidade do solo e suas respectivas anomalias. A equação 11 permite a análise da variabilidade espaço-temporal da umidade do solo considerando sua média temporal M_{tn} e suas anomalias A_{tn} , onde $\sigma^2_{\hat{n}}(M_{tn})$ é o termo invariável no tempo enquanto os termos $2\text{cov}(M_{tn}, A_{tn})$ e $\sigma^2_{\hat{n}}(A_{tn})$ são os variáveis no tempo. A equação 11 ainda pode ser representada da forma da equação 12:

$$\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn}) = \sigma^2_{\hat{n}}(M_{tn}) + 2\rho(M_{tn}, A_{tn})\sigma(M_{tn})\sigma(A_{tn}) + \sigma^2_{\hat{n}}(A_{tn}) \quad (12)$$

Onde $\rho(M_{tn}, A_{tn})$ se refere à correlação entre os termos M_{tn} e A_{tn} .

4.9.2 A estabilidade temporal e os termos variáveis e invariáveis no tempo

Agora, denotando Δ como diferença absoluta e δ como diferença relativa, seguindo o conceito de estabilidade temporal proposto por Vachaud *et al.* (1985), define-se ΔS_{tn} como sendo a diferença entre a umidade do solo S_{tn} e a média espacial da umidade do solo $\mu_{\hat{n}}(S_{tn})$, como demonstrado na equação 13:

$$\Delta S_{tn} = S_{tn} - \mu_{\hat{n}}(S_{tn}) \quad (13)$$

Já sua diferença relativa δS_{tn} é definida como a razão da diferença absoluta da umidade do solo ΔS_{tn} sobre a média espacial da umidade do solo $\mu_{\hat{n}}(S_{tn})$, como demonstrado na equação 14:

$$\delta S_{tn} = \frac{\Delta S_{tn}}{\mu_{\hat{n}}(S_{tn})} \quad (14)$$

E sua média temporal, $\mu_{\hat{t}}(\delta S_{tn})$, e desvio padrão temporal, $\sigma_{\hat{t}}(\delta S_{tn})$, são estimados respectivamente pelas equações 15 e 16:

$$\mu_{\hat{t}}(\delta S_{tn}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\delta S_{tn}) \quad (15)$$

$$\sigma_{\hat{t}}(\delta S_{tn}) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\delta S_{tn} - \mu_{\hat{t}}(\delta S_{tn}))^2} \quad (16)$$

De forma que $\mu_{\hat{t}}(\delta S_{tn})$ e $\mu_{\hat{t}}(\Delta S_{tn})$, de cada local de coleta, são ordenados da menor para a maior diferença. Os pontos de coleta próximos a $\mu_{\hat{n}}(S_{tn})$, ou seja, locais de coleta com valores de $\mu_{\hat{t}}(\delta S_{tn})$ próximos a zero, são considerados os mais representativos do local estudado.

Usando a equação 7, as análises de estabilidade temporal (equações 13 a 16) podem ser estendidas incluindo-se os diferentes contribuintes da umidade do solo absoluta. Ainda, como A_{tn} pode ter valores negativos, são utilizados os valores absolutos das diferenças para A_{tn} e M_{tn} , demonstrados nas equações 17 e 18:

$$|A_{tn}| = |A_{tn} - \mu_{\hat{n}}(A_{tn})| \quad (17)$$

$$|M_{tn}| = |M_{tn} - \mu_{\hat{n}}(M_{tn})| \quad (18)$$

A média temporal das anomalias $\mu_{\hat{t}}(\Delta A_{tn})$ e seu desvio padrão $\sigma_{\hat{t}}(\Delta A_{tn})$ são analisadas a fim de prover um *ranking* dos locais de coleta de acordo com seu respectivo desvio em relação à média global. De forma semelhante, o desvio absoluto da média temporal ΔM_{tn} também resulta num *ranking*. A fim de relacionar o novo *ranking* ao *ranking* do total de umidade do solo, a estrutura proposta por Vachaud *et al.* (1985) é adaptada por Mittelbach & Seneviratne (2012) ao se considerar os termos absolutos $|\delta S_{tn}|$ e $|\Delta S_{tn}|$.

Para o estudo de caso aqui realizado, foi utilizada a umidade do solo em mm, considerada uma integração resultante do valor medido pela sonda, onde suas hastes medem 30cm. Ou seja, multiplicou-se o valor de umidade volumétrica, cuja unidade é cm^3/cm^3 pelo tamanho de 300mm, obtendo então a umidade volumétrica do solo em mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise das amostras de solo coletadas *in loco*

Os resultados das amostras de solo foram condensados nas

Tabela 21 e Tabela 22 no Anexo B desta dissertação, tanto para os de umidade volumétrica do solo, daqui para a frente denominada de VWC, do termo em inglês *Volumetric Water Content*, quanto para os de massa específica aparente do solo (ρ), respectivamente. Desta forma, pôde-se realizar as análises mais pontuais relativas às profundidades, locais e datas de coletas.

Isto propiciou os estudos estatísticos, tais quais os gráficos de histogramas e os *box-plots*, além da própria representação gráfica dos dados coletados durante o período estudado, que ajudam a entender e validar todos os dados estudados no espaço e no tempo.

5.1.1 Análise estatística

Primeiro, apresenta-se os gráficos da variação dos valores médios de VWC e ρ em todas as profundidades para toda a bacia experimental durante todo o período de coletas na forma das Figura 14 e Figura 15.

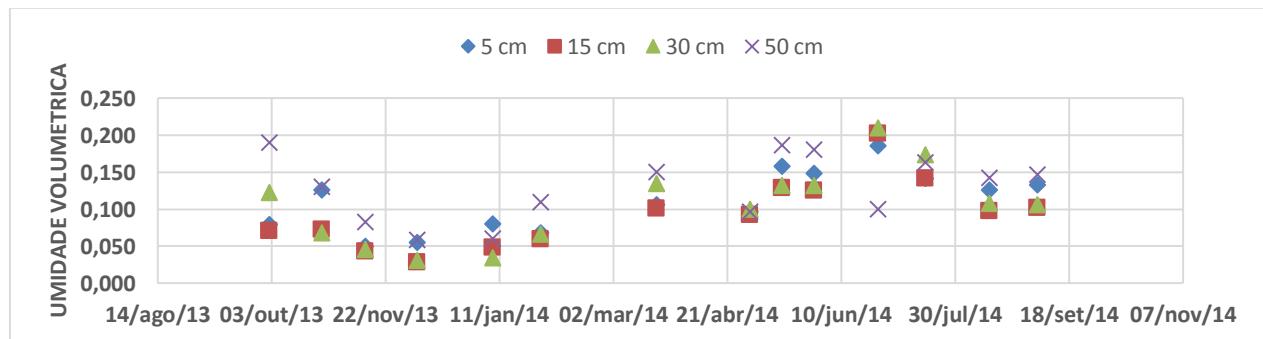


Figura 14 – Médias das umidades volumétricas das amostras de solo em diferentes profundidades de toda a bacia experimental para o período estudado

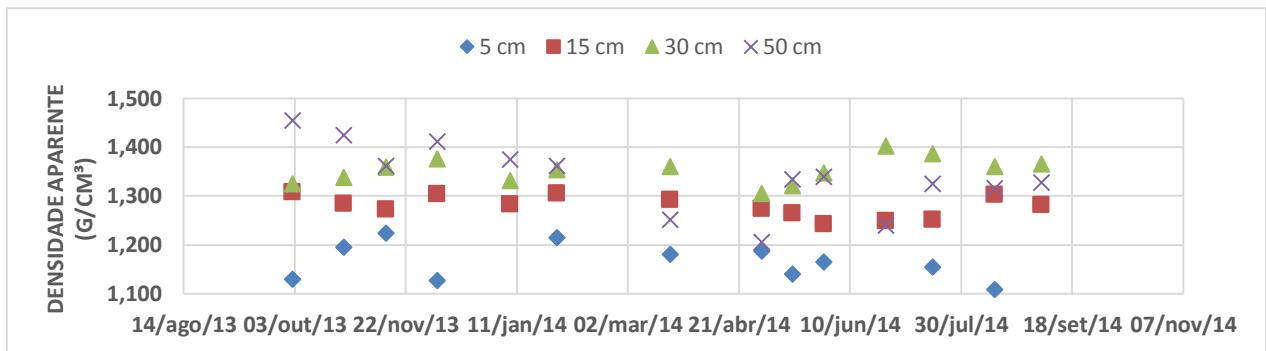


Figura 15 – Médias das massa específicas aparentes do solo das amostras por profundidade de toda a bacia experimental para o período de estudo

Pode-se perceber que enquanto os valores de umidade oscilam de acordo com o tempo, a massa específica aparente do solo apresenta-se de forma mais constante, com seus menores valores ocorrendo na sua camada mais superficial (5 cm), isso devido à quantidade de matéria orgânica presente nas amostras. Vê-se que de abril a outubro os valores de umidade são os mais altos, representando o comportamento do período chuvoso, se estendendo de março a agosto, apresentado na Figura 16.

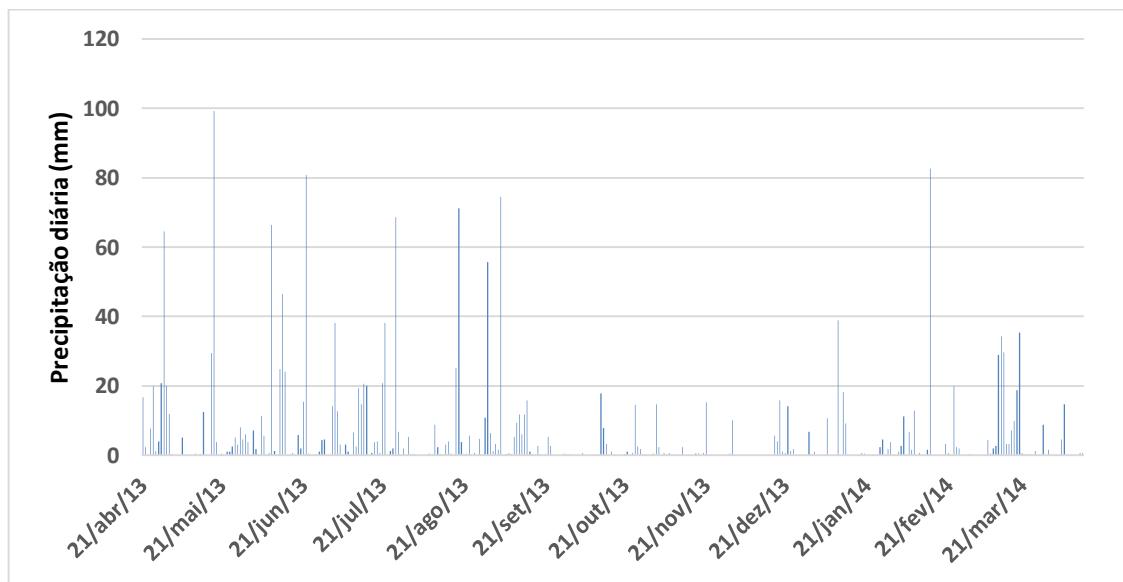


Figura 16 – Precipitação diária na bacia experimental do riacho Guaraíra - representada pela estação pluviográfica 04

Analizando em conjunto as Figura 14 e Figura 16, percebe-se que em outubro a precipitação já diminuiu bastante, com apenas alguns pequenos picos de precipitação, mas a umidade ainda está alta, porém, apenas nas camadas mais profundas da amostragem, que possuem uma reação mais lenta ao regime de precipitação do que as camadas superficiais, onde a água logo infiltra ou escoa.

A Figura 17 mostra o histograma dos dados de VWC da bacia experimental, enquanto as Figura 18 e Figura 19 mostram os histogramas do VWC por locais e profundidades de coleta respectivamente, excetuando-se os dados da TDR da estação 03, que não foram utilizados neste trabalho.

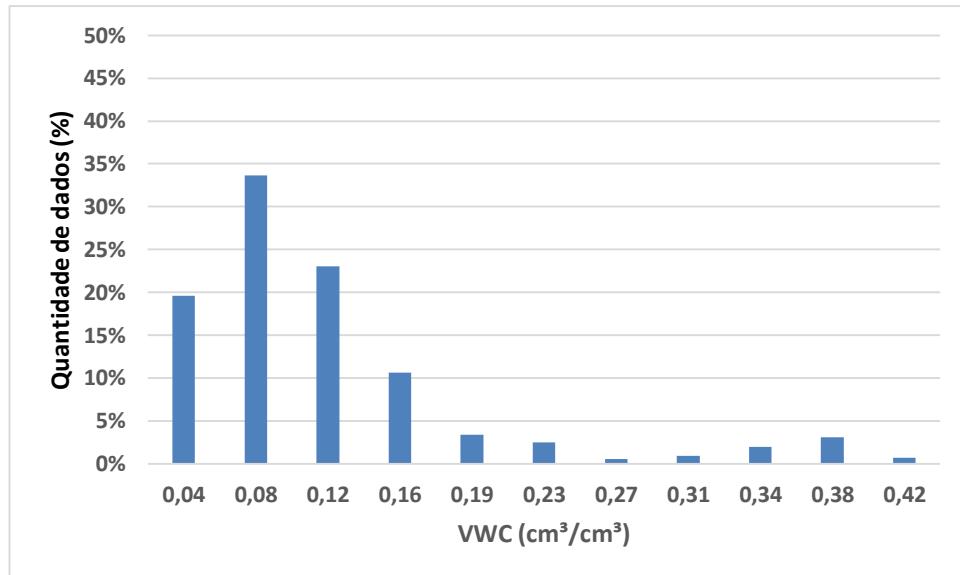


Figura 17 – Histograma do VWC da bacia experimental do riacho Guaraíra

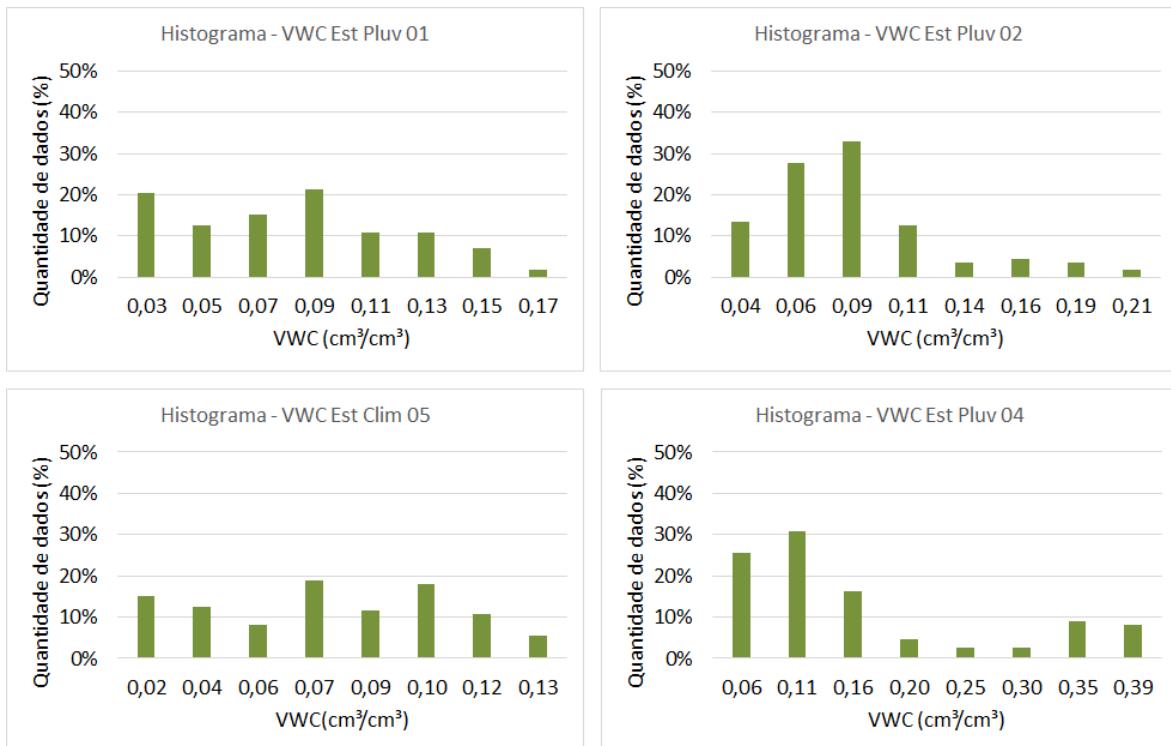


Figura 18 – Histogramas da umidades volumétricas nos locais de coleta

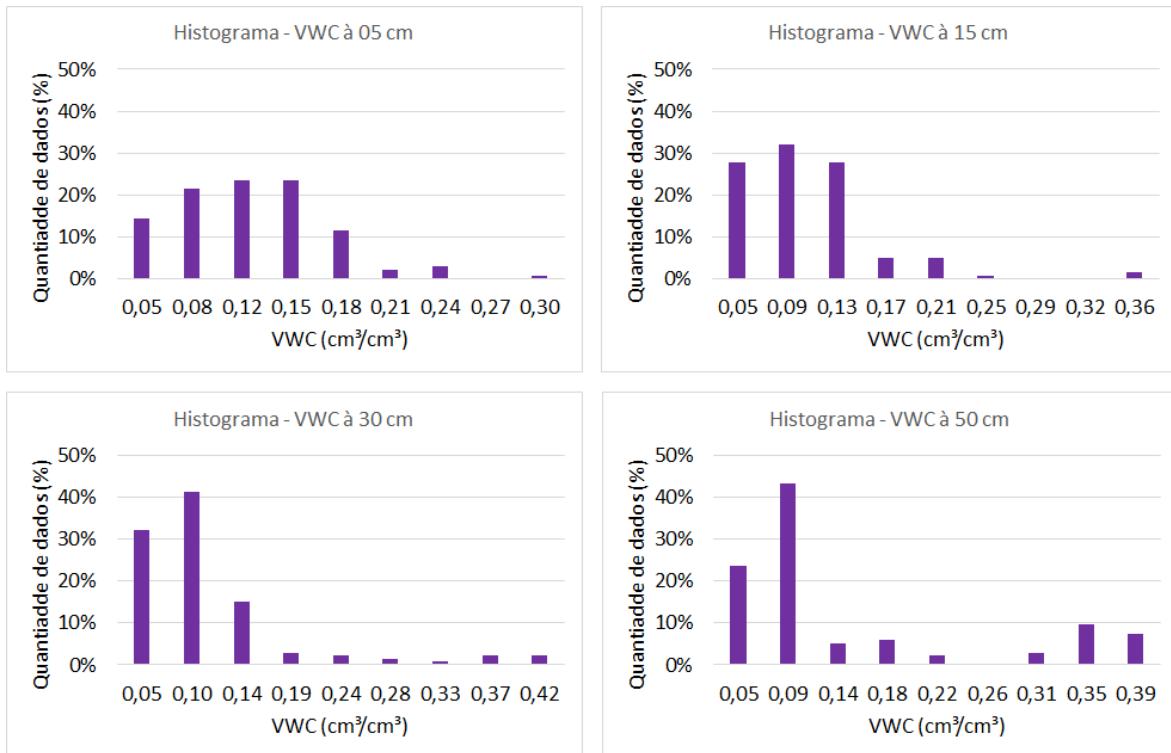


Figura 19 – Histogramas das umidades volumétricas nas profundidades estudadas

Os dados permitem observar as semelhanças entre os resultados das estações 01 e 05, com menores valores de umidade volumétrica, e das estações 02 e 04, com maiores valores de umidade volumétrica. Umidades mais altas podem ser observadas também nas profundidades de 30 e 50 centímetros.

De forma análoga, apresentam-se os gráficos das umidades aparentes nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22.

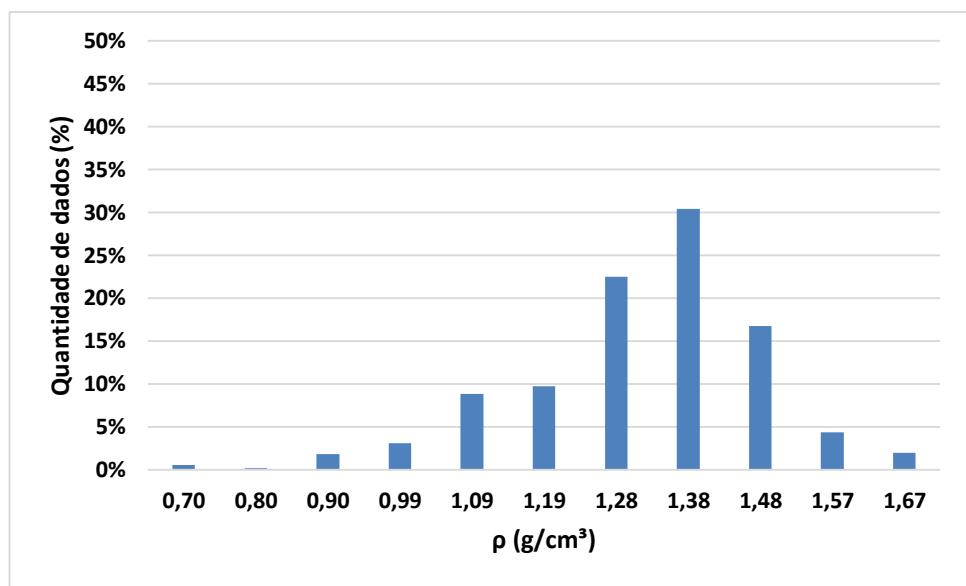


Figura 20 - Histograma da massa específica aparente da bacia experimental do riacho Guaraíra para as quatro profundidades de coleta

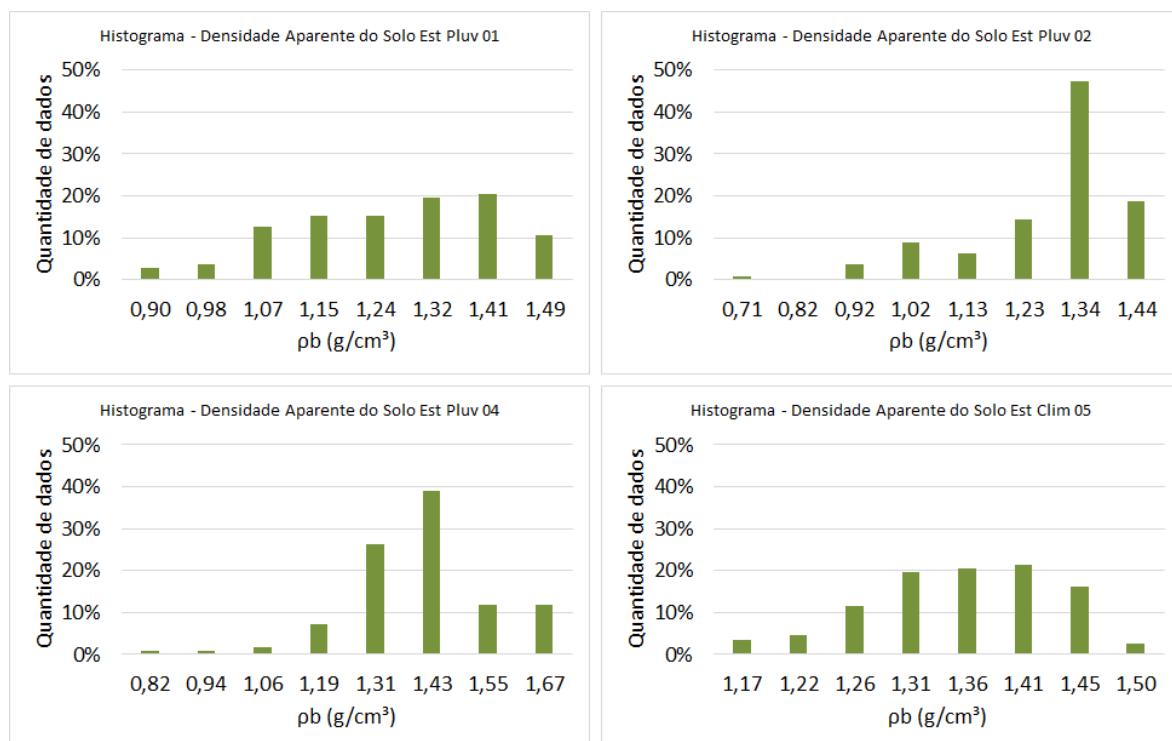


Figura 21 - Histogramas das massas específicas aparentes nos locais de coleta

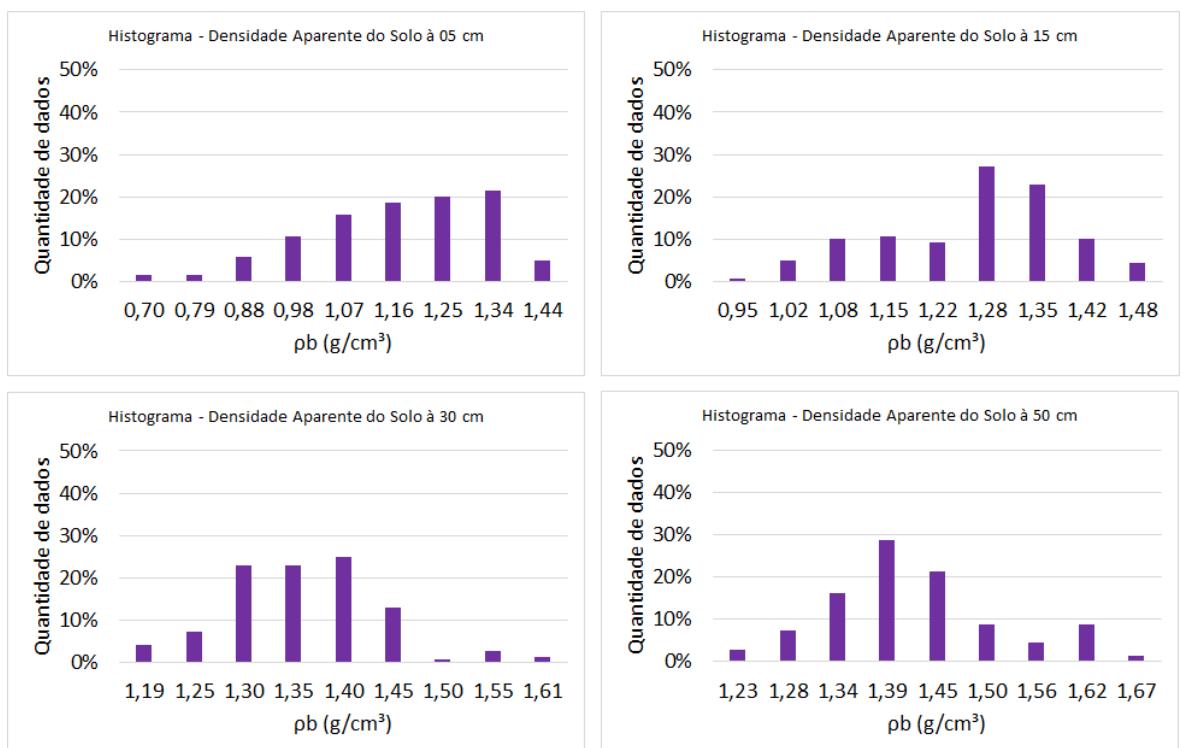


Figura 22 - Histogramas das massa específicas aparentes por profundidade estudada

Percebe-se que a massa específica aparente do solo tem seu valor geral por volta de 1,38 g/cm^3 , devido principalmente aos valores obtidos nas estações 02 e 04 e nas profundidades a partir de 15 centímetros.

Apresentam-se os gráficos com os resultados da umidade volumétrica do solo para a bacia experimental por local e por profundidade, durante o período de coleta, respectivamente nas Figura 23 e Figura 24.

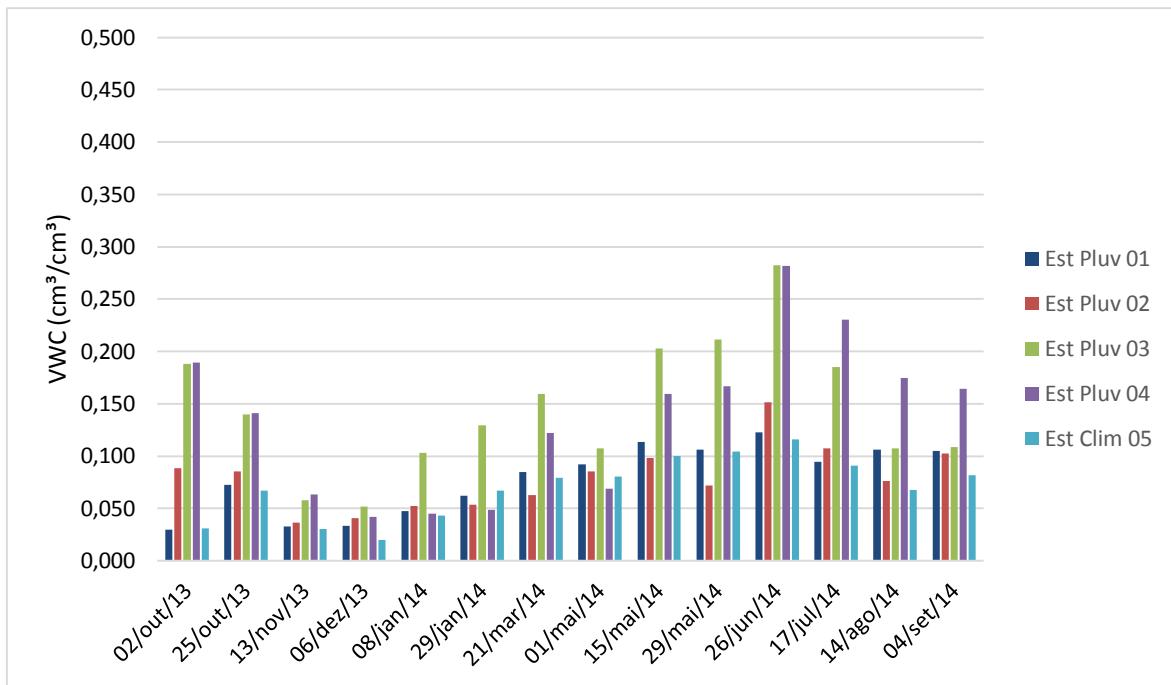


Figura 23 – Umidade volumétrica média da bacia experimental por local de coleta

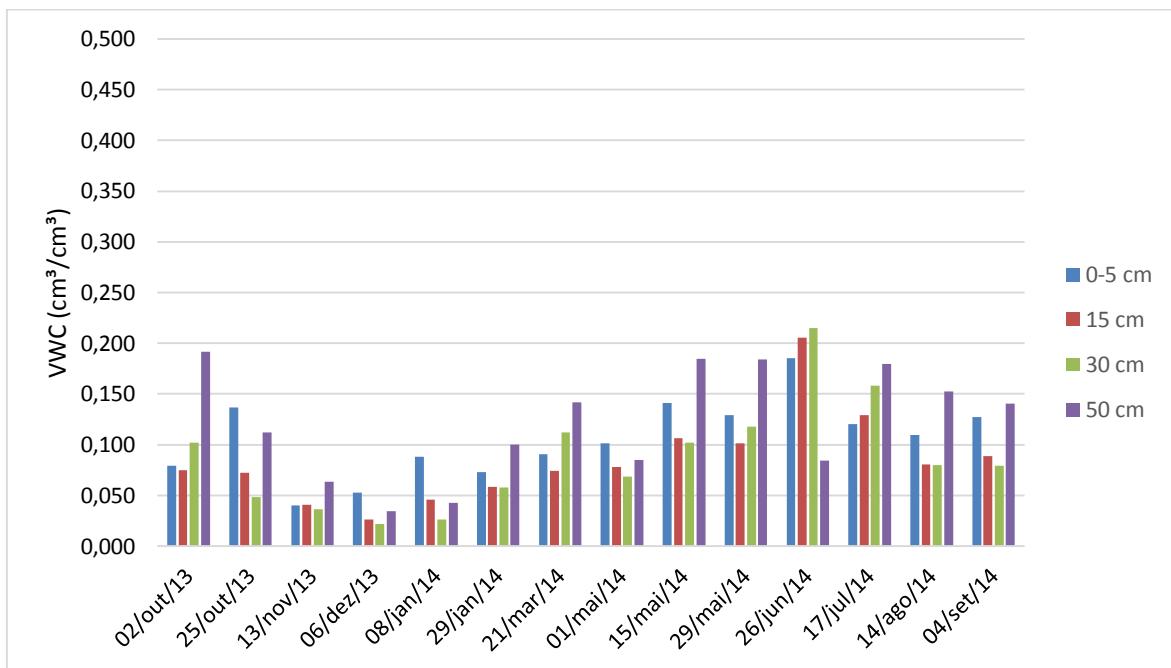


Figura 24 - Umidade volumétrica média do solo da bacia experimental por profundidade de coleta

Estes gráficos detalham o entendimento obtido nas figuras anteriores, ao mostrar como cada estação e profundidade têm suas mudanças na umidade do solo no período analisado. Como por exemplo as estações 03 e principalmente a 04 apresentando valores maiores e mais dispersos. Ainda, as maiores profundidades sempre com valores de umidade

mais altos que as camadas superficiais na época de menor precipitação. Os gráficos de cada estação com suas profundidades detalham com maior precisão as diferenças entre as estações, como mostrado a seguir nas Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 29.

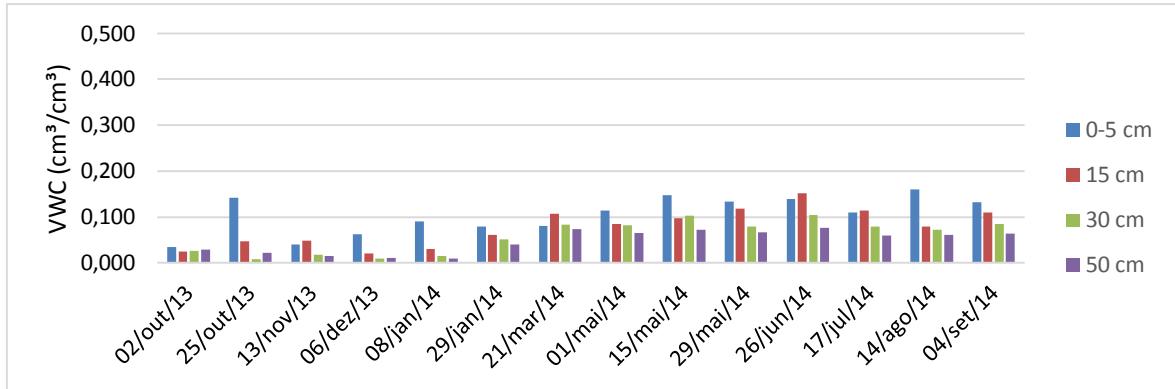


Figura 25 – Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 01

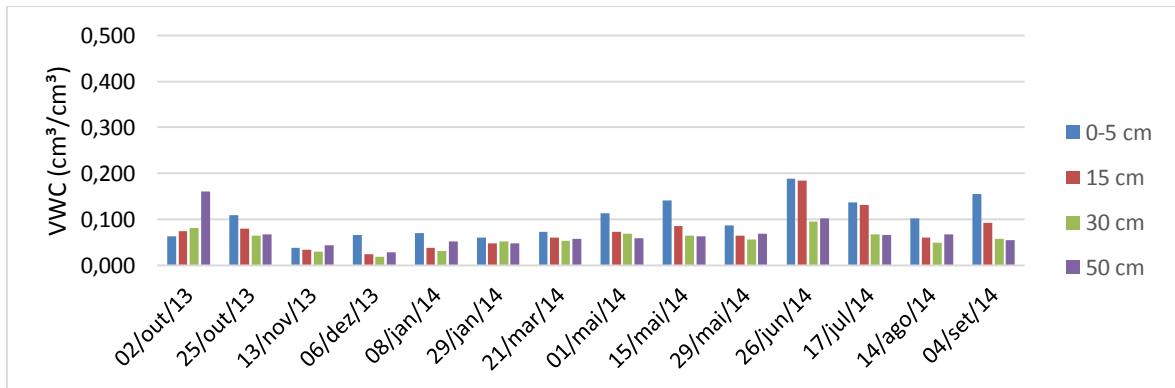


Figura 26 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 02

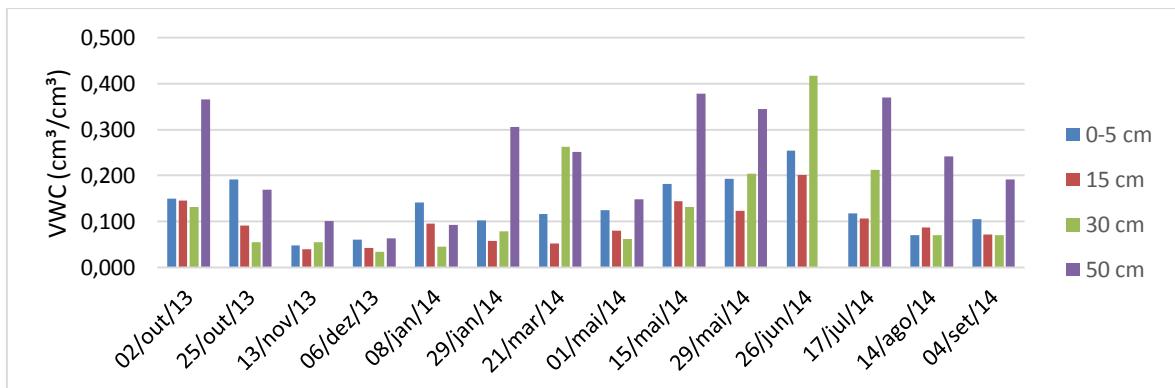


Figura 27 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 03

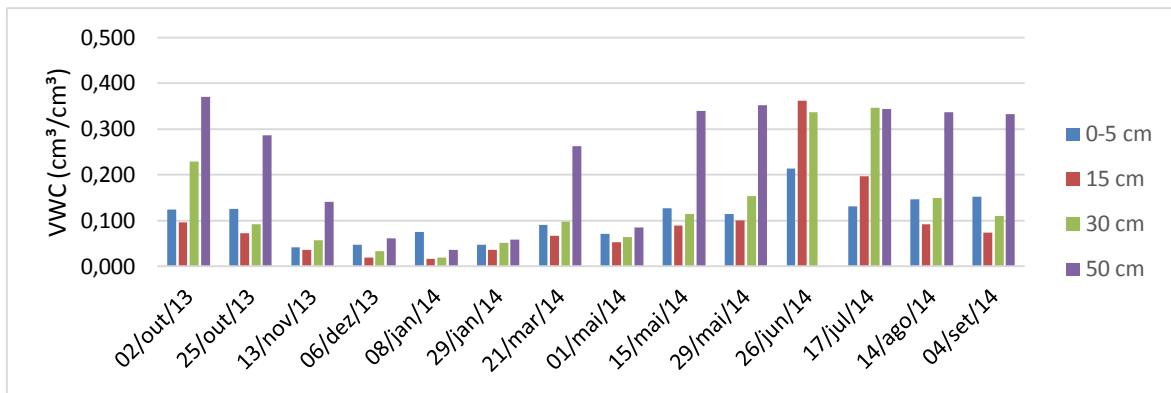


Figura 28 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 04

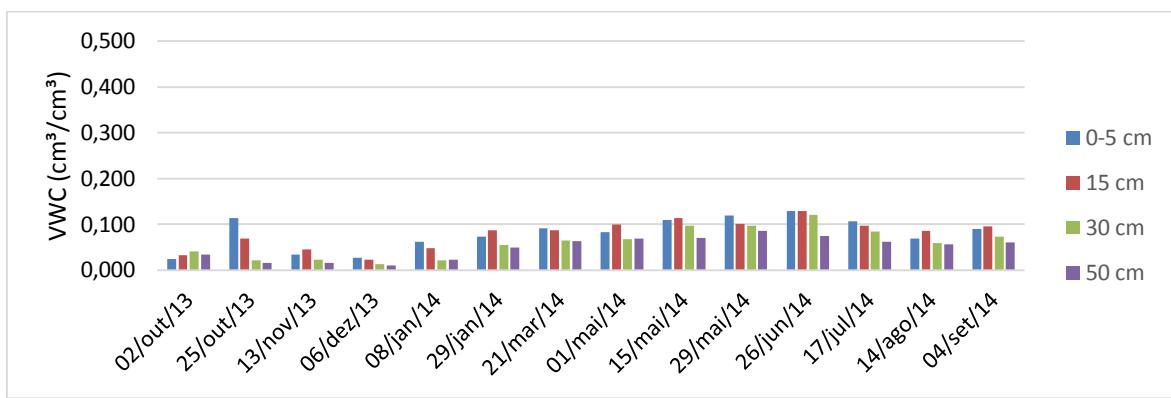


Figura 29 - Variação média da umidade volumétrica do solo por profundidade na estação 05

Pode-se perceber que as estações 01, 02 e 05 possuem um comportamento semelhante, com os maiores valores de umidade volumétrica do solo aparecendo nas camadas superiores (05 e 15 cm). As estações 03 e 04 apresentam um comportamento contrário, com os maiores valores de umidade volumétrica do solo sendo encontrados nas camadas de 30 e 50 cm. Isto ocorre pois as estações 01, 02 e 05 conseguem reter mais água na sua superfície, tendo um equilíbrio maior de umidade no perfil do solo do que as estações 03 e 04, onde a água infiltra mais rápido no solo, concentrando a maior parte da umidade nas camadas mais profundas. Estas diferenças na retenção da umidade é atribuída ao fato da presença de vegetação gramínea e árvores nas estações 01 e 02, e apenas gramínea na 05, enquanto que as estações 03 e principalmente a 04, possuem cobertura vegetal significativamente menores. Já que os processos de evapotranspiração dos vegetais ajudam a regular a água presente nos solos em questão.

Ainda, percebe-se também que as estações 01 e 05 possuem os menores valores de medidos, a estação 02 os valores mais próximos da média e as estações 03 e principalmente a 04, os maiores valores. É interessante notar que as estações 02, 03 e 04 apresentaram um alto valor de umidade volumétrica na profundidade de 50 cm na coleta de 02/out/13. Isto se deve ao tempo de resposta da umidade em relação as precipitações ocorridas no mês anterior e que este valor também traduz a umidade das camadas superficiais que foram atingindo maiores profundidades.

Para todas as estações, os menores valores foram medidos nos dias 13/nov/13 e 06/dez/13 e os maiores valores na coleta de 26/jun/13.

Os demais gráficos ilustrando a massa específica aparente do solo podem ser conferidos no apêndice B deste estudo, bem como as tabelas e gráficos com mais informações sobre os dados coletados de forma manual.

5.1.2 Análise da umidade do solo e massa específica aparente do solo coletados *in loco*

Apresentam-se então os gráficos tipo *box-plot* para os valores de umidade volumétrica do solo (VWC) e massa específica aparente (ρ), estes gráficos mostram a variação espacial e temporal destas variáveis através dos valores da mediana, mínimo, máximo e quartis inferiores e superiores. As Figura 31 e Figura 31 apresentam os resultados para VWC.

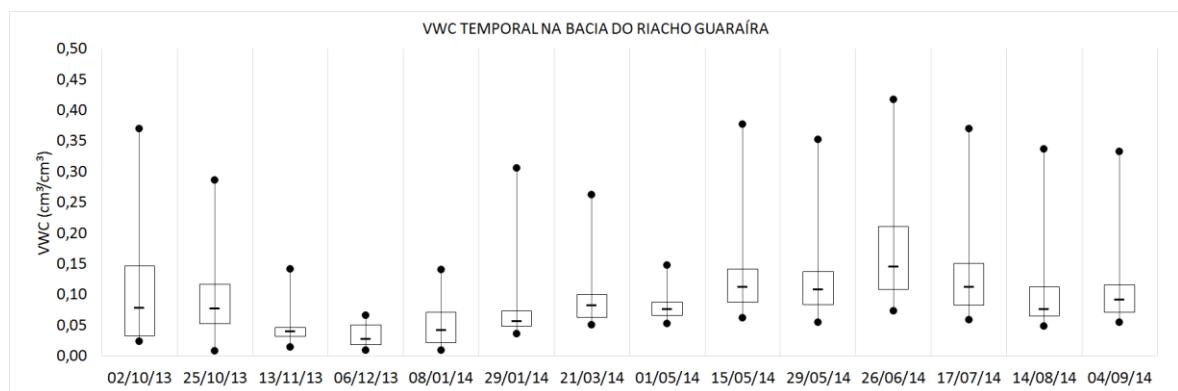


Figura 30 – Umidade volumétrica do solo - variação temporal na bacia experimental do riacho Guaraíra

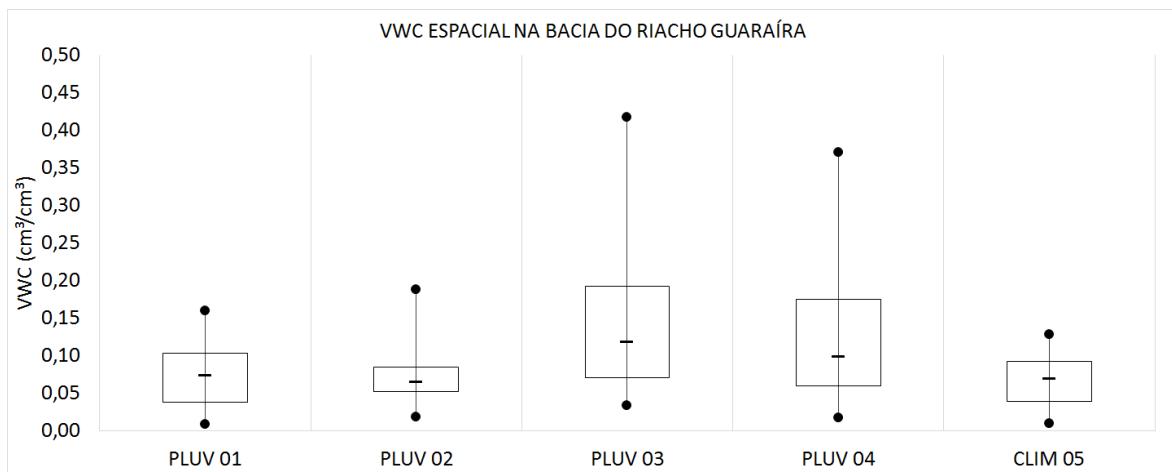


Figura 31 – Umidade volumétrica do solo - variação espacial da bacia experimental do riacho Guaraíra

Percebe-se novamente na Figura 30 como a umidade do solo na bacia acompanha as variações de precipitação apresentadas na Figura 16 na bacia experimental e como os resultados das estações 03 e 04 diferem das demais estações. Percebe-se ainda como o valor da mediana varia bem menos em relação ao valor máximo medido. Nota-se ainda os menores desvios-padrões para as épocas secas.

A Figura 31, onde se apresentam os resultados por estação de monitoramento permite observar mais uma vez a semelhança entre as estações 01 e 05, com praticamente os mesmos valores de mediana, desvio-padrão, máximo e mínimo. A estação 02 aparece como a que possui o menor desvio-padrão, confirmando sua constância de valores ao longo do tempo. Enquanto as estações 03 e 04, com maiores valores medidos de umidade volumétrica do solo, apresentam também os maiores desvios.

A massa específica aparente do solo é praticamente constante, tanto no tempo quanto no espaço, como pode-se observar nas Figura 33 e Figura 33.

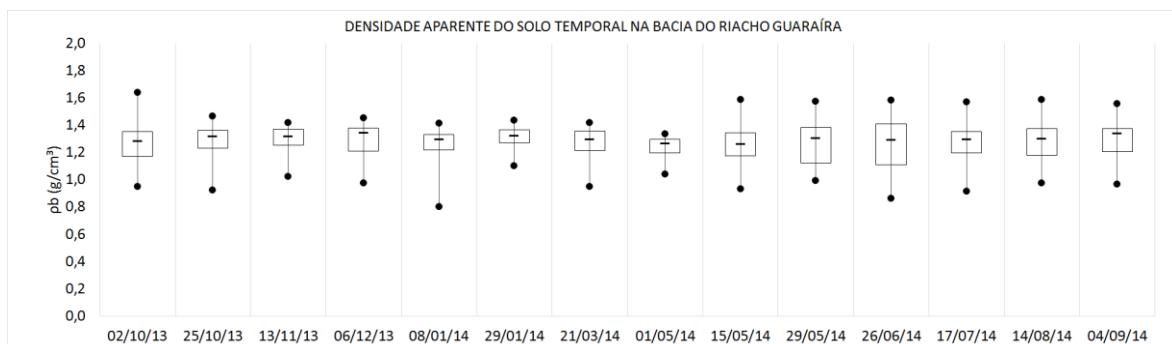


Figura 32 – Massa específica aparente do solo - variação temporal da bacia experimental do riacho Guaraíra

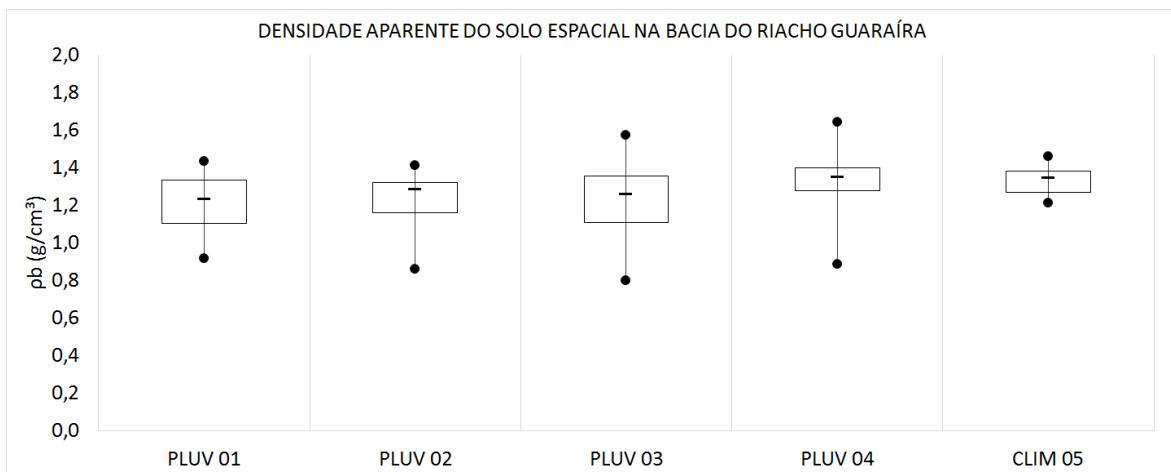


Figura 33 – Massa específica aparente do solo - variação espacial da bacia experimental do riacho Guaraíra

A massa específica aparente do solo é, como apresentada nas Figura 32 e Figura 33, praticamente constante tanto no espaço quanto no tempo. Este resultado já era esperado, pois notou-se essa semelhança já no momento da coleta, com as amostras muito semelhantes em textura e tamanho dos grãos, diferindo apenas em alguns casos na quantidade de matéria orgânica. Detalhando-se os pontos de coleta, apresentam-se os gráficos com as variações temporais e espaciais de cada uma das estações de monitoramento. Apresentam-se então as Figura 34, Figura 36,

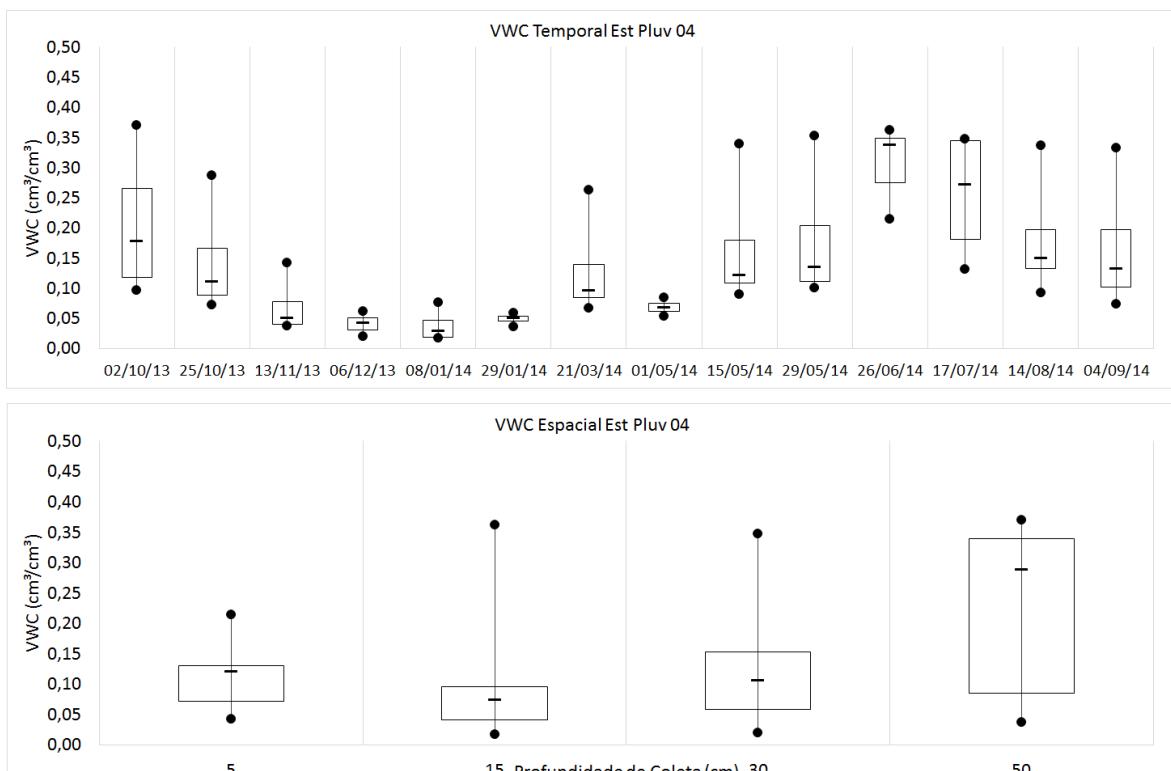


Figura 37,

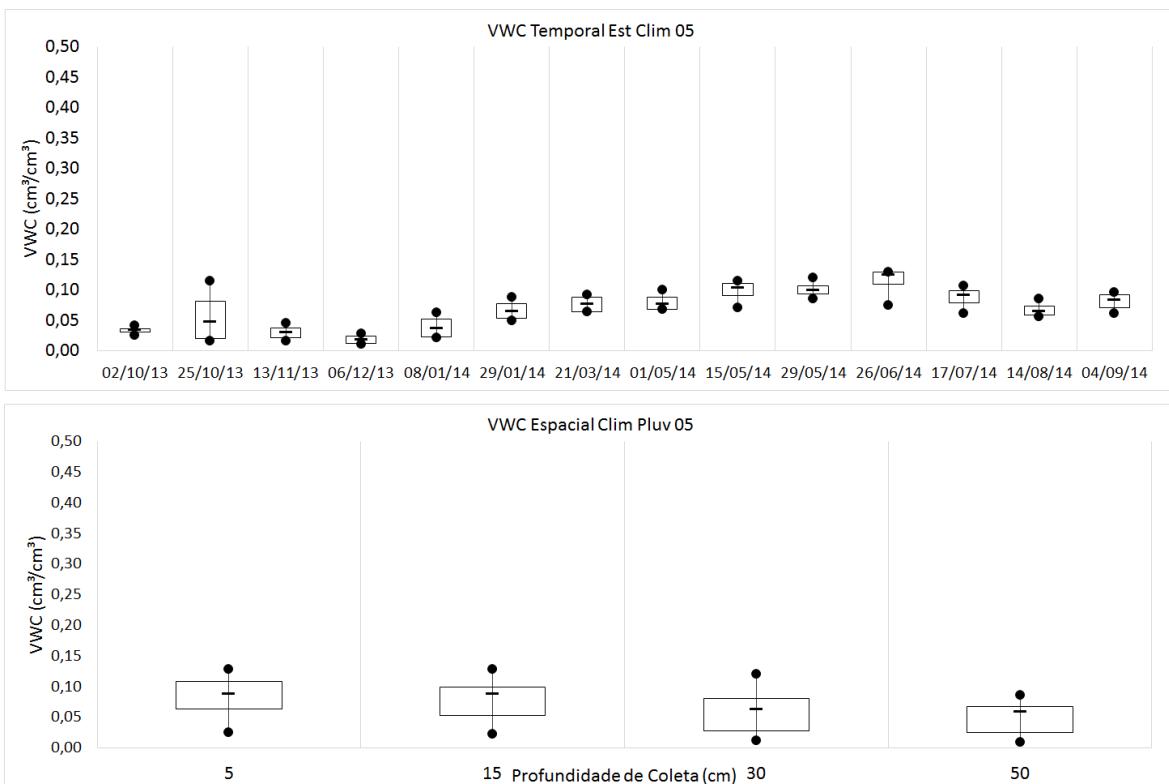


Figura 38 e Figura 38.

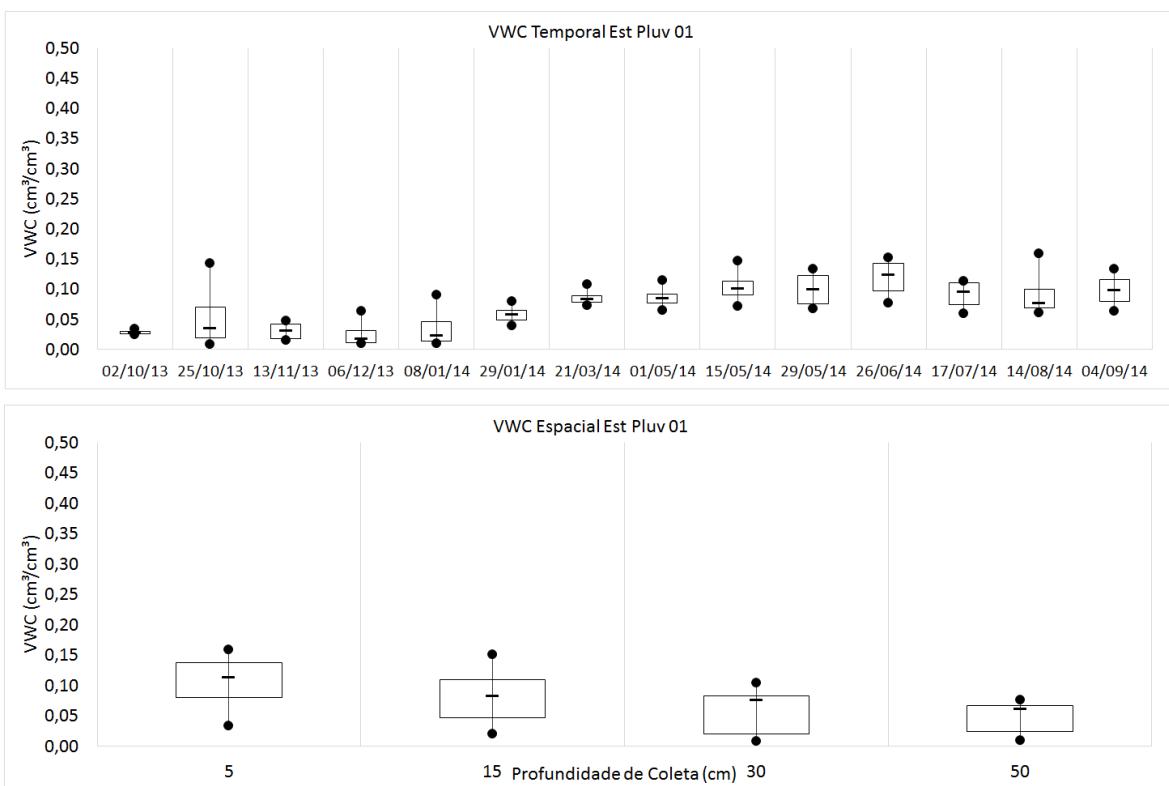


Figura 34 – Variações espaço-temporais do VWC da estação 01

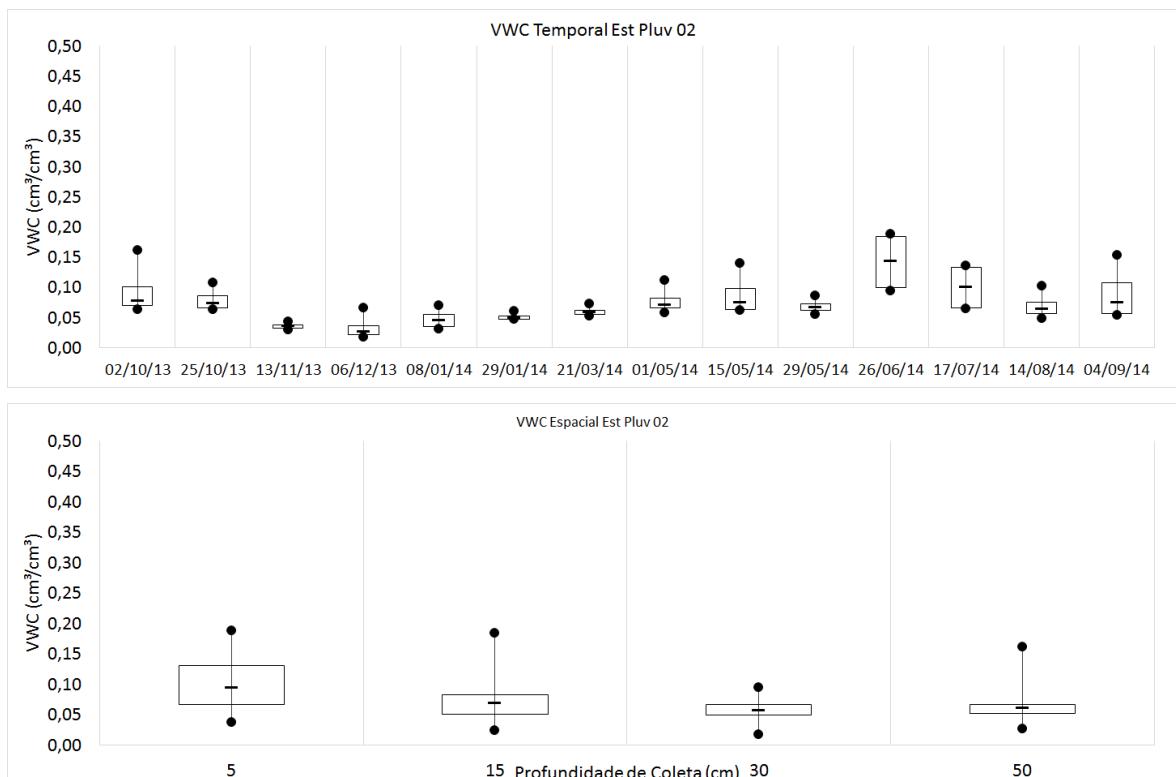


Figura 35 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 02

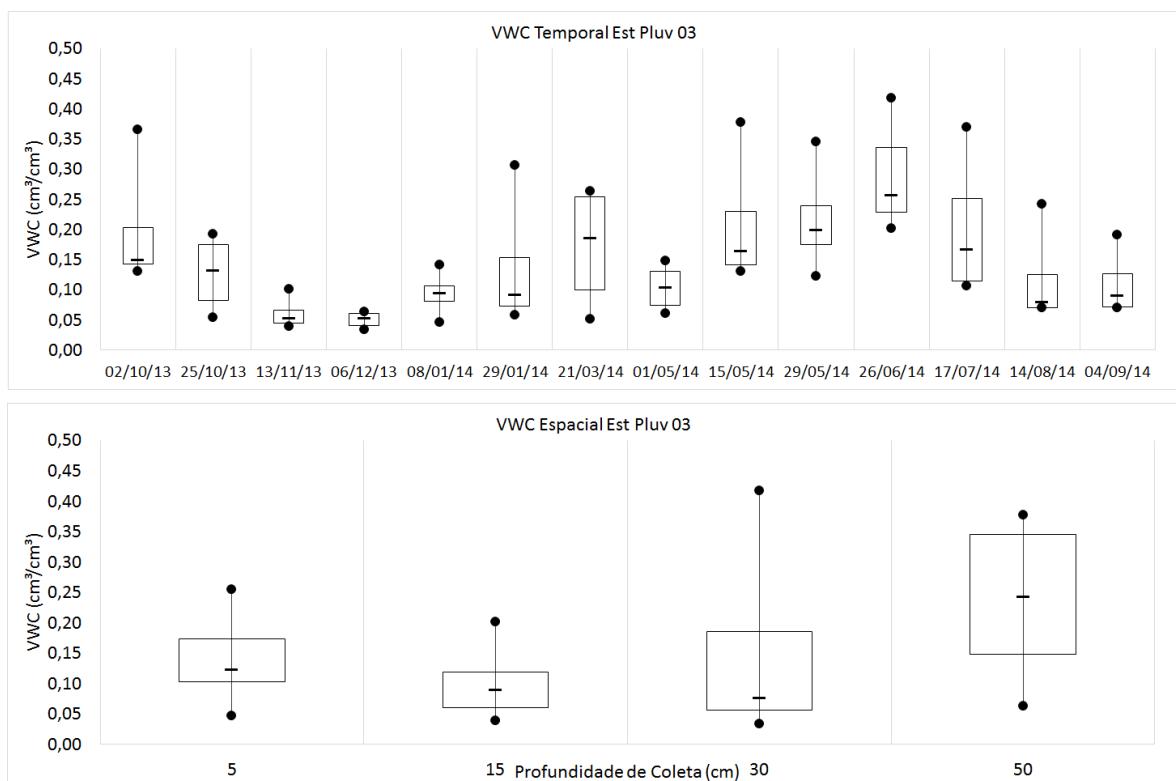


Figura 36 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 03

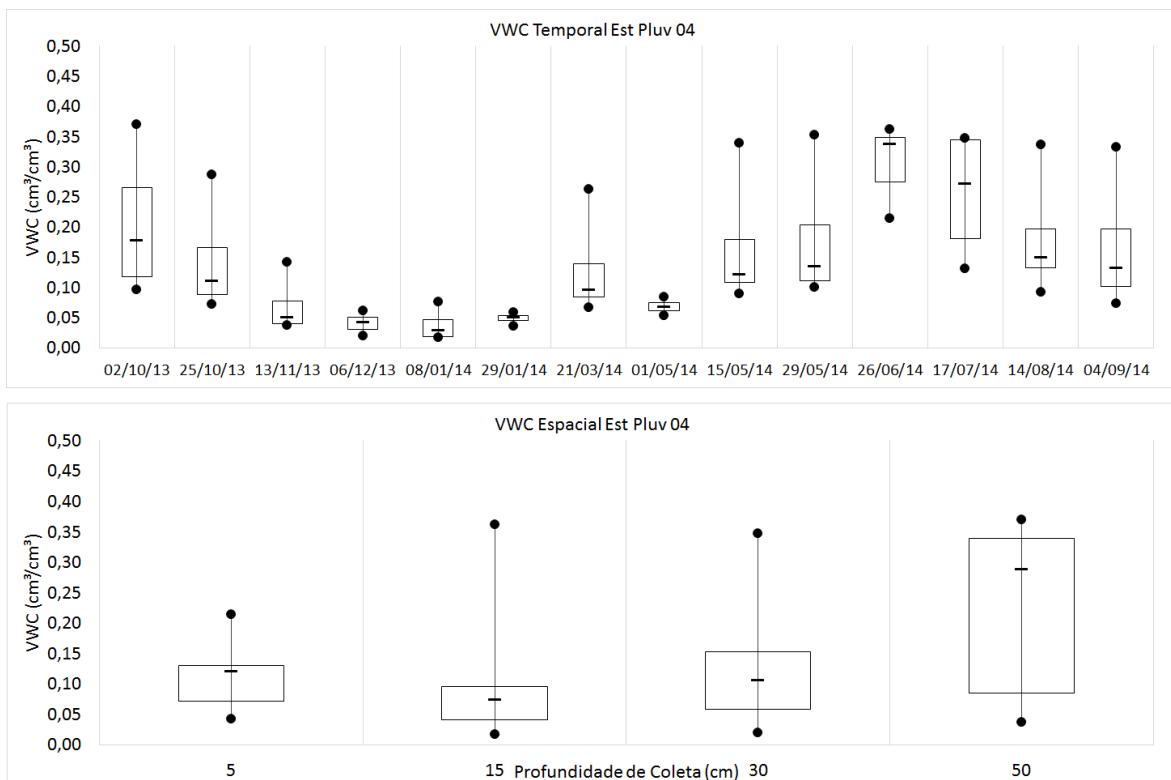


Figura 37 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 04

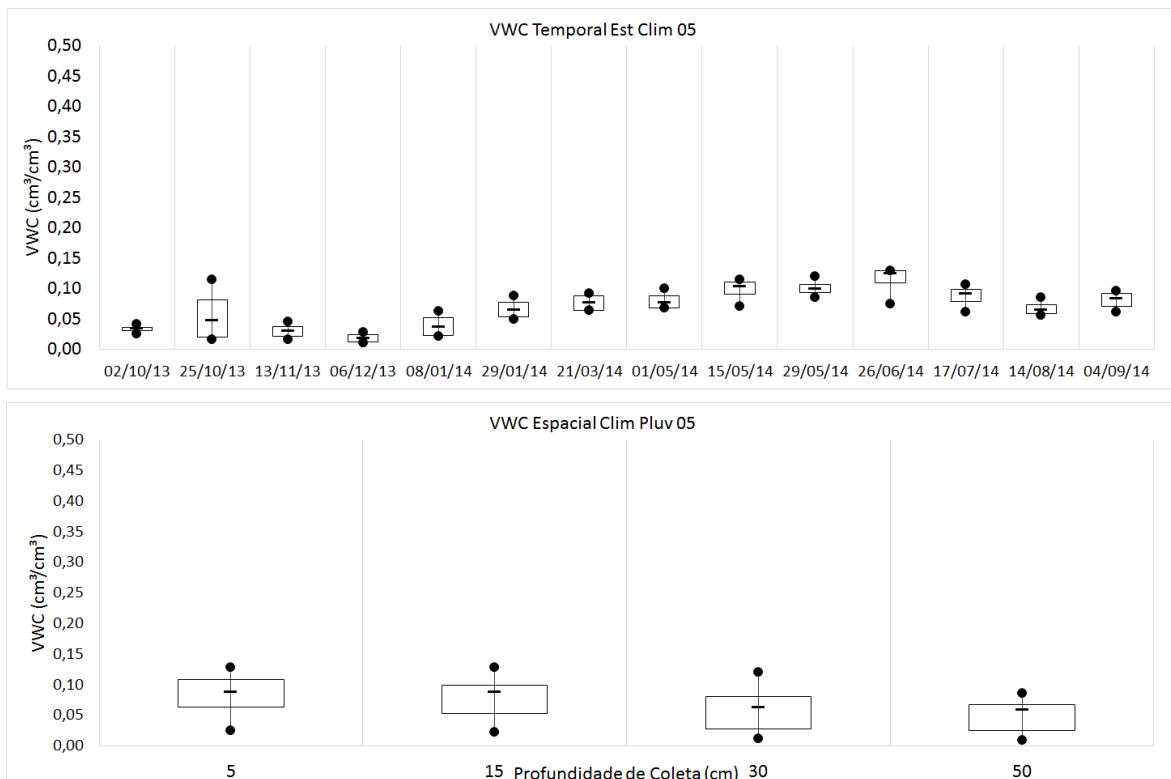


Figura 38 - Variações espaço-temporais do VWC da estação 05

Novamente é vista uma similaridade entre os resultados das estações 01 e 05, com a estação 05 com os desvios um pouco menores e seus valores máximos e mínimos um pouco

mais próximos à sua mediana. Estas estações possuem a umidade volumétrica constante nas profundidades analisadas. A estação 02 apresenta, dentre todas as estações, os menores desvios relativos às suas profundidades de coleta. As estações 03 e 04 aparecem novamente com os maiores valores, alternando um pouco entre si as datas das coletas e até mesmo as variações do desvio-padrão e valores máximos e mínimo em relação às medianas. Ainda, essas estações apresentam seus maiores valores de umidade nas camadas mais profundas.

As demais figuras representando as variações por profundidades e também as variações detalhadas da massa específica aparente do solo podem ser conferidas nos apêndices desta dissertação.

5.2 Dados coletados pelas sondas TDR

Nesta seção são abordados os dados de umidade do solo coletados pelas sondas TDR, de forma semelhante aos dados coletados manualmente, com o diferencial dos dados terem o intervalo de tempo de 1 hora e ainda de serem realizados os estudos para calibração e resolução temporal, como dito no capítulo de metodologia desta dissertação.

5.2.1 Calibração das sondas TDR

A análise estatística realizada é apresentada na Tabela 4, e diz respeito aos parâmetros estatísticos (mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação) da massa específica aparente do solo, para os pontos utilizados para os cinco pontos calibração. Em cada estação de monitoramento foi analisado um total de 56 amostras, visto que as amostras foram coletadas em 14 visitas ao campo e em duplicata, e que para a calibração só foram consideradas as amostradas coletadas às profundidades de 15 e 30 cm.

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos da massa específica aparente do solo (em g.cm⁻¹) com dados a 15 e 30 cm de profundidade

Estação de Monitoramento	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
01	0,980	1,429	1,225	0,116	9,47
02	0,885	1,430	1,256	0,111	8,83
03	1,022	1,549	1,258	0,126	10,05
04	1,219	1,606	1,362	0,084	6,13
05	1,123	1,440	1,320	0,076	5,77

Assim, pôde-se determinar uma curva específica para cada sonda TDR em cada estação analisada. Desta forma, as equações das curvas foram utilizadas para transformar os dados de constante dielétrica em umidade volumétrica do solo. As Figura 39, Figura 41, Figura 42 e Figura 42 mostram, respectivamente, as curvas de calibração e suas equações para as sondas TDR das estações 01, 02, 04 e 05.

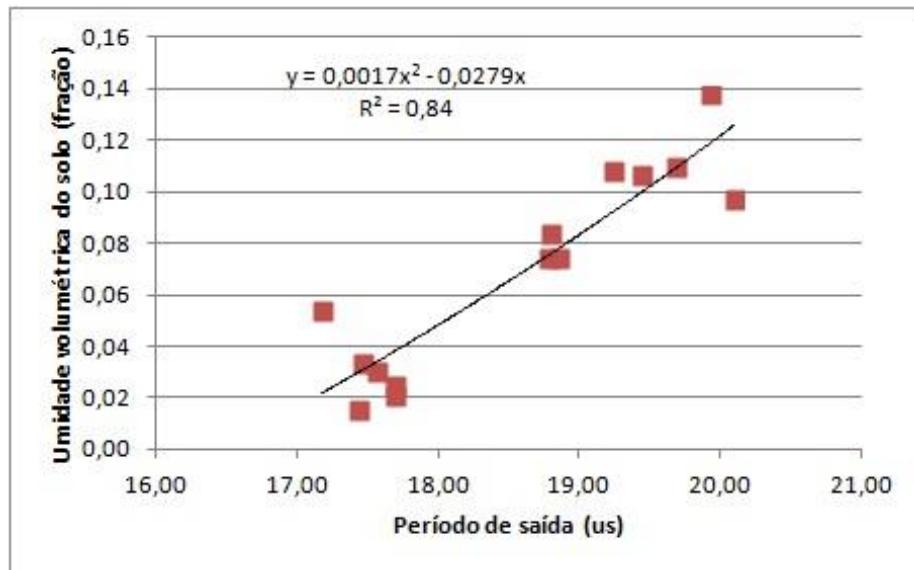


Figura 39 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 01

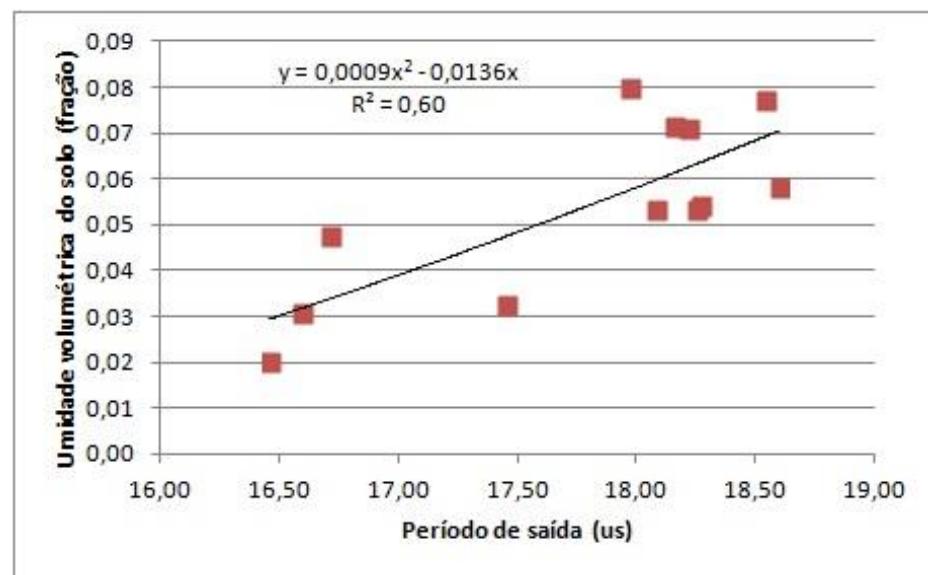


Figura 40 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 02

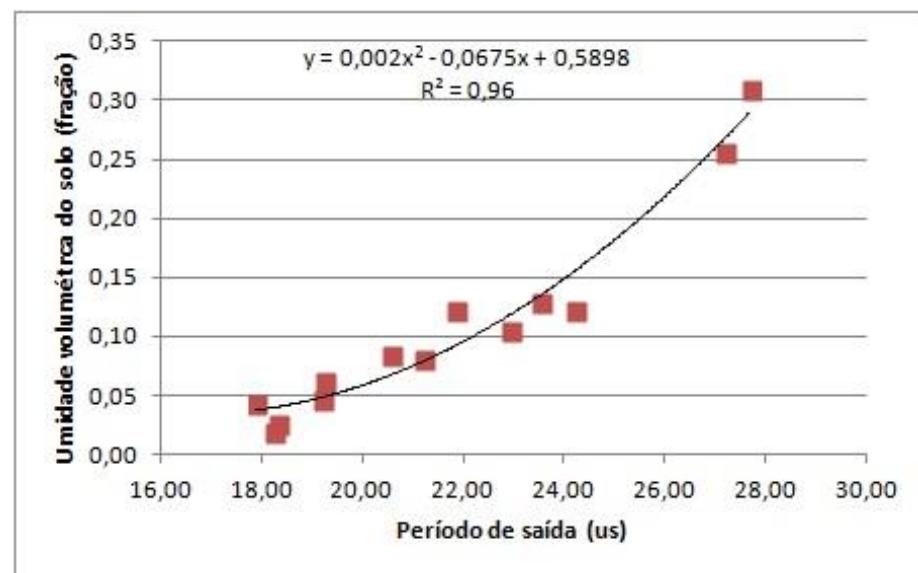


Figura 41 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 04

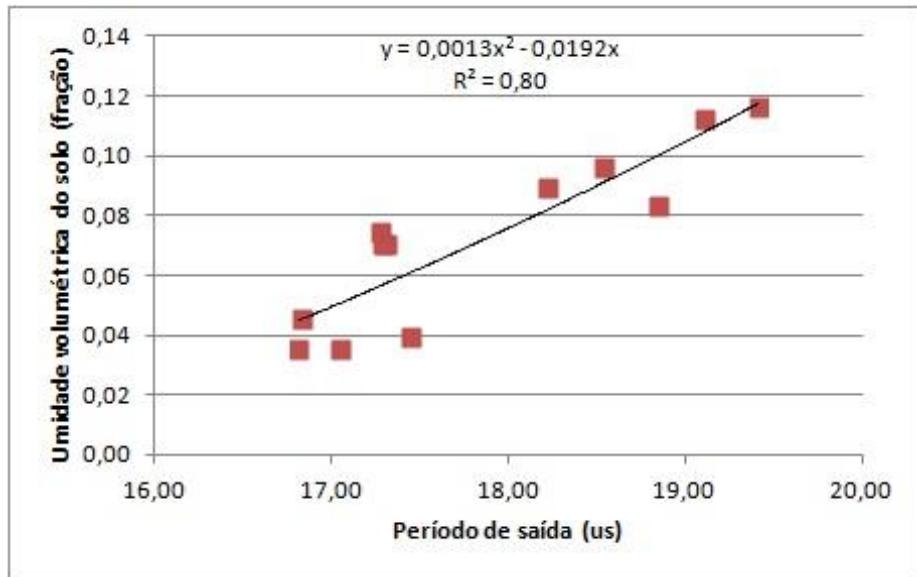


Figura 42 – Curva de calibração da sonda TDR da estação 05

As Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 mostram a curva de calibração da estação 04 como sendo a mais ajustada aos dados, com um valor de R^2 de 0,96, enquanto a estação 02 apresentou o menor valor de R^2 , 0,60, devido à falta de dados de umidade altos para melhor compor a curva e representar esta umidade. É interessante notar que a curva da estação 04 apresenta também a maior faixa de valores de umidade, indo de 0 até 0,35. Em seguida aparecem as estações 01, 05 e por fim 02, esta ordem é a mesma para os valores de R^2 , podendo significar que quanto maior a faixa de valores de umidades para a curva, melhor calibrada a sonda TDR fica, para a bacia experimental do riacho Guaraíra.

5.2.2 Escalas de resolução temporal

De forma a subsidiar a decisão de em qual escala de tempo se trabalhar com os dados das sondas, apresentam-se as Figura 43, Figura 44 e Figura 45 com os resultados das escalas de resolução temporal variando de 01 hora até 14 dias, para a estação de monitoramento 01.

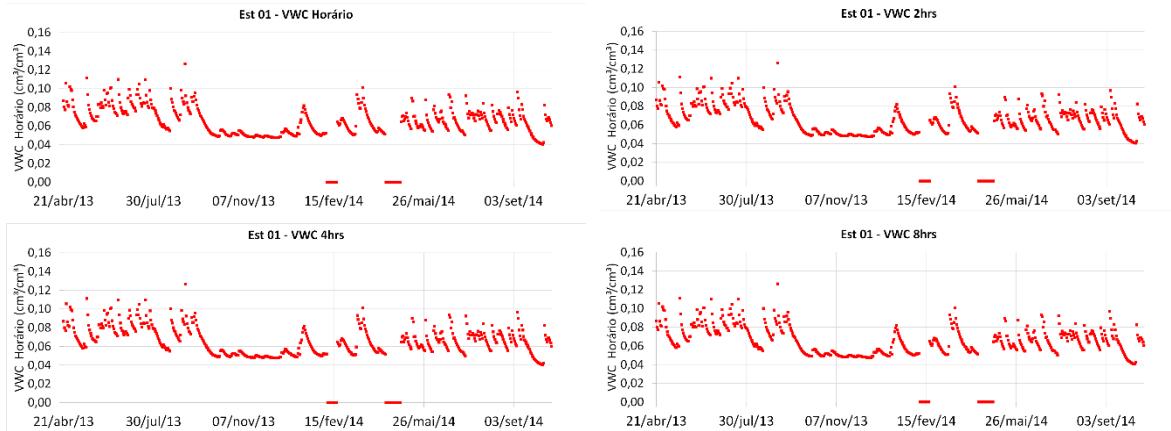


Figura 43 – Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 1, 2, 4 e 8 horas para a estação 01

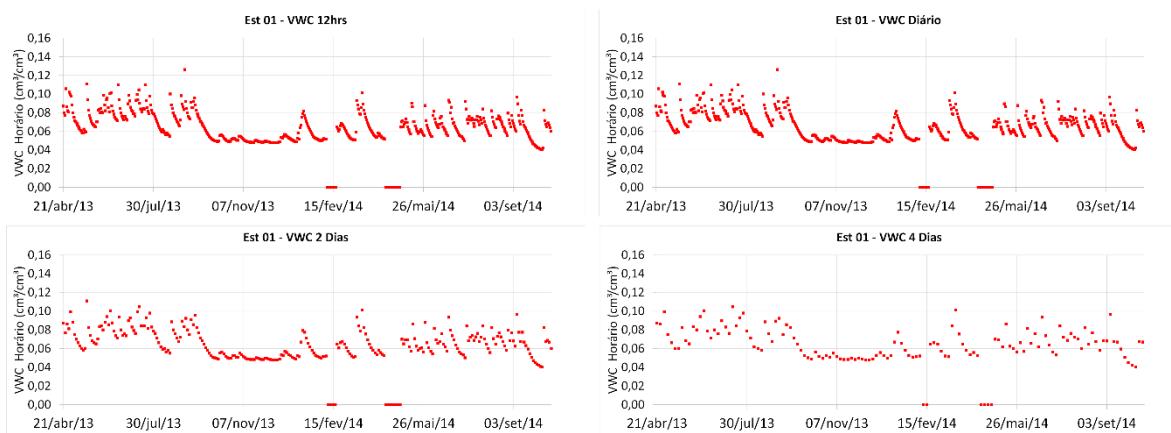


Figura 44 - Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 12 horas, 1 dia, 2 dias e 4 dias para a estação 01

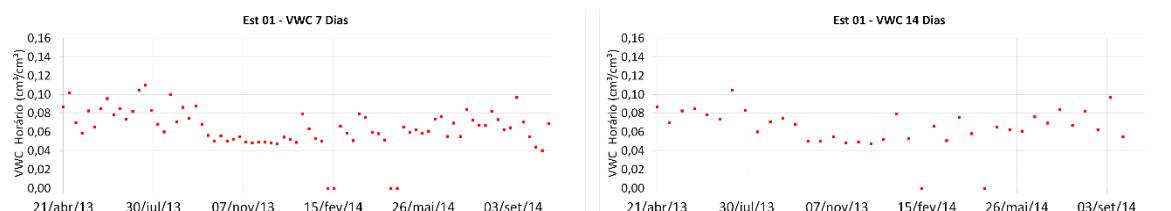


Figura 45 - Umidade volumétrica do solo com resolução temporal de 7 e 14 dias para a estação 01

Percebe-se que, a plotagem dos dados em até 48 horas, isto é, utilizando-se apenas um valor de umidade coletado a cada 48 horas, não há degradação tão significante da informação, enquanto que a partir de 4 dias de escala de resolução temporal é nítida a perda de informações sobre a umidade do solo, como a perda dos picos de alta e baixa umidade do solo, gerando a falsa sensação ao pesquisador de que a umidade do solo segue com uma

umidade constante, perdendo resultados bastante significativos de dias anteriores e posteriores.

Desta forma, esta análise auxiliou na tomada de decisão de se trabalhar com os dados em escala diária. Os dados foram trabalhados com valores diários pois isto simplifica o processo computacional dos cálculos das análises bem como facilita a interpretação gráfica dos mesmos. Ainda, como visto, os dados diários representam com alta resolução a variação da umidade do solo durante o período de tempo estudado.

5.3 Análise estatística dos dados coletados pelas sondas TDR

De forma semelhante ao aplicado aos dados coletados manuais, apresenta-se na Figura 46 os histogramas dos dados de diários de umidade volumétrica do solo - VWC para as estações 01, 02, 04 e 05.

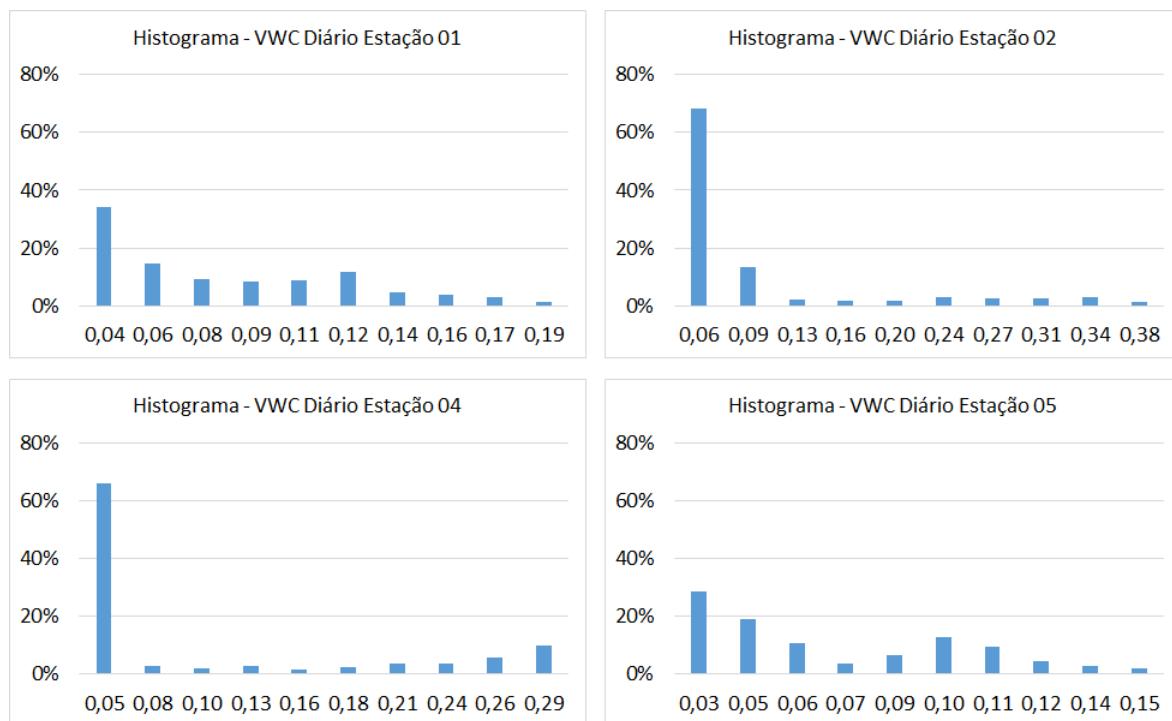


Figura 46 – Histogramas dados de umidade volumétrica do solo diária (VWC) das sondas TDR para cada estação

Percebe-se aqui novamente, com os dados coletados pelas sondas, as diferenças das umidades do solo entre as estações. As estações 01 e 05 aparecem com formato e escala bastante semelhantes, com valores baixos de umidade do solo quando comparados às estações 02 e 04. A estação 02 apresenta no início, maiores valores de umidade do solo do que a estação 04, isto porque ela retém mais a umidade na superfície, enquanto na estação

04 a água infiltra no solo de forma mais rápida. A estação 04 por sua vez, tem uma quantidade perceptivelmente maior de maiores valores de umidade do solo do que todas as estações. O histograma mostra ainda que todas as estações possuem a maioria de seus valores de umidade como sendo os seus menores, tendo as estações 01 e 05 com uma maior constância desses valores

Apresenta-se ainda o histograma dos dados de VWC para toda a área de estudo na Figura 47.

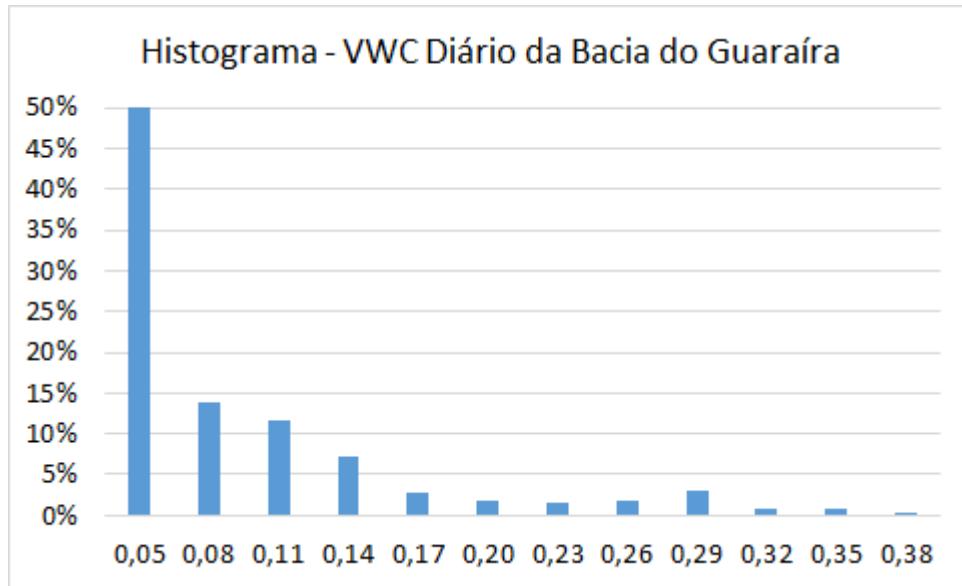


Figura 47 – Histograma de dados diários de umidade volumétrica do solo (VWC) da área de estudo - média das estações 01, 02, 04 e 05

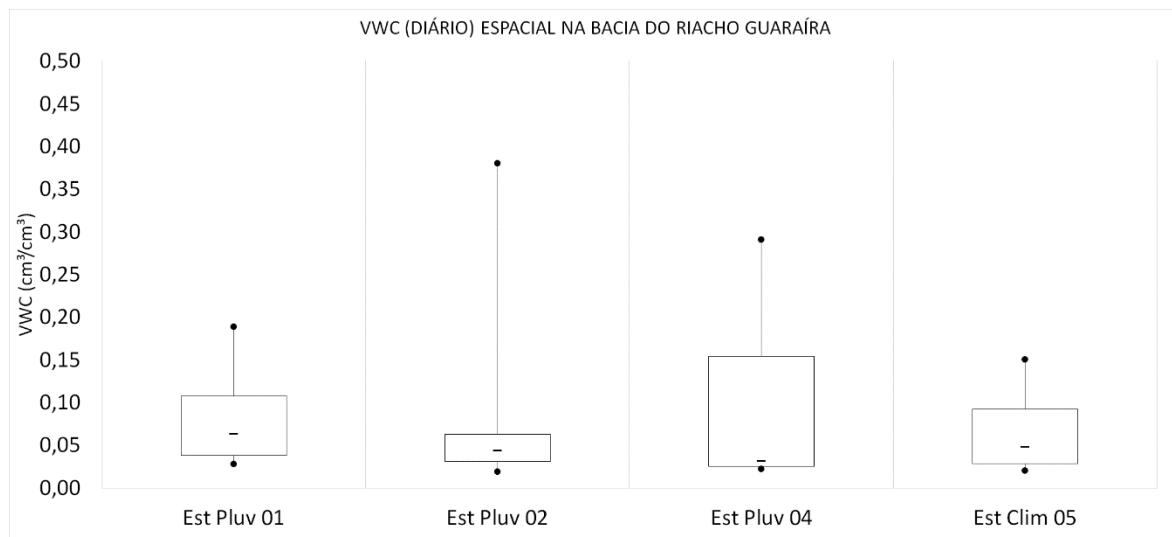


Figura 48 – Box-plot dos dados das sondas TDR em cada estação

Observa-se que, durante o período de coleta de dados, a estação 01 apresenta o maior valor de mediana da umidade volumétrica do solo, seguida da estação 05, depois a 02 e por

fim a 04. Ou seja, no balanço geral, a quantidade de umidade percebida nas estações para o ano hidrológico é muito semelhante, tendo em vista que a precipitação ocorre de forma homogênea entre as estações. O mesmo acontece em relação aos valores mínimos de cada estação. Já para os valores máximos, observam-se os maiores resultados nas estações 02 e 04, com o menor resultado na estação 05. Enquanto que os desvios são maiores na estação 04, menor na 02 e muito semelhantes nas estações 01 e 05.

Estes valores são interessantes de serem notados pois mostram que até a profundidade de 30cm, os valores de umidade volumétrica do solo anuais das estações 01 e 05 são os maiores, enquanto as estações 02 e 04, que chegam a ficar com o solo saturado nas épocas chuvosas, não conseguem manter a umidade elevada em tempos de seca.

5.4 Caracterização dos solos das estações de monitoramento da bacia experimental

São apresentados os resultados da granulometria para cada estação da área de estudo. Como os estudos foram realizados em duplicata e constatou-se a homogeneidade do solo em cada estação, apresenta-se então as médias para cada estação. As Tabela 5, 6, 7, 8 e 9 mostram os resultados do ensaio granulométrico.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de granulometria da estação 01 - média da coleta em duplicata

Estação 01 - Média					Tipo	massa (g)	%		
Peneira	Abertura (mm)	Material retido							
		massa (g)	%	% acum.	% passa				
n 16	1,200	17,45	1,74%	1,74%	98,26%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 30	0,600	147,44	14,74%	16,49%	83,51%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	415,99	41,60%	
n 40	0,420	251,10	25,11%	41,60%	58,40%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	563,48	56,35%	
n 50	0,300	264,22	26,42%	68,02%	31,98%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	20,54	2,05%	
n 100	0,150	252,55	25,26%	93,28%	6,72%				
n 200	0,074	46,71	4,67%	97,95%	2,05%				

Tabela 6 - Resultados do ensaio de granulometria da estação 02 - média da coleta em duplicata

Estação 02 - Média						Tipo	massa (g)	%
Peneira	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	14,21	1,42%	1,42%	98,58%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	195,23	19,52%	20,94%	79,06%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	502,94	50,29%
n 40	0,420	293,50	29,35%	50,29%	49,71%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	481,22	48,12%
n 50	0,300	255,31	25,53%	75,82%	24,18%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	15,85	1,58%
n 100	0,150	188,90	18,89%	94,71%	5,29%			
n 200	0,074	37,01	3,70%	98,42%	1,58%			

Tabela 7 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 03 - média da coleta em duplicata

Estação 03 - Média						Tipo	massa (g)	%
Peneira	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	7,86	0,79%	0,79%	99,21%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	295,55	29,55%	30,34%	69,66%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	695,91	69,59%
n 40	0,420	392,51	39,25%	69,59%	30,41%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	294,32	29,43%
n 50	0,300	184,62	18,46%	88,05%	11,95%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	9,77	0,98%
n 100	0,150	88,75	8,87%	96,93%	3,07%			
n 200	0,074	20,96	2,10%	99,02%	0,98%			

Tabela 8 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 04 - média da coleta em duplicata

Estação 4 - Média						Tipo	massa (g)	%
Peneira	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	11,81	1,18%	1,18%	98,82%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	157,26	15,73%	16,91%	83,09%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	502,73	50,27%
n 40	0,420	333,67	33,37%	50,27%	49,73%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	483,53	48,35%
n 50	0,300	267,30	26,73%	77,00%	23,00%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	13,75	1,37%
n 100	0,150	184,83	18,48%	95,49%	4,51%			
n 200	0,074	31,40	3,14%	98,63%	1,37%			

Tabela 9 - Resultados do ensaio de da granulometria da estação 05 - média da coleta em duplicata

Estação 05 - Média					Type	massa (g)	%	
Peneira	Abertura (mm)	Material retido				Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	24,44	2,44%	2,44%	97,56%			
n 30	0,600	144,92	14,49%	16,94%	83,07%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	400,23	40,02%
n 40	0,420	230,88	23,09%	40,02%	59,98%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	569,84	56,98%
n 50	0,300	237,83	23,78%	63,81%	36,19%			
n 100	0,150	274,39	27,44%	91,24%	8,76%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	29,93	2,99%
n 200	0,074	57,63	5,76%	97,01%	2,99%			

Através de avaliação textural em *in loco* e em laboratório, constatou-se que os finos são apenas silte, sem presença significativa de argila.

A Figura 49 ilustra a granulometria do solo de cada uma das estações, bem como sua média.

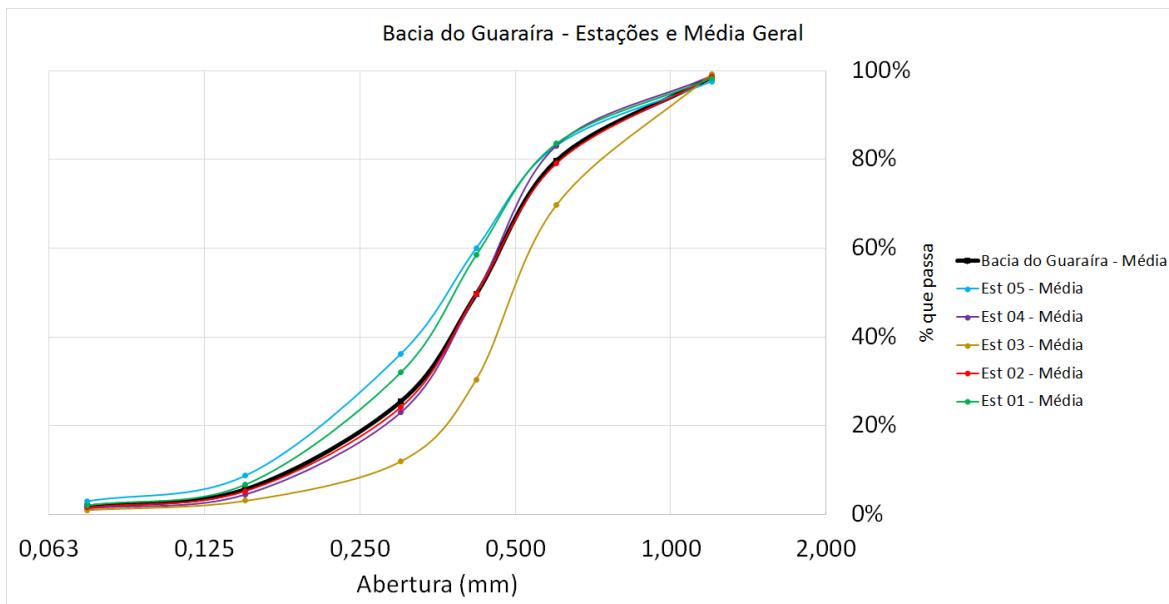


Figura 49 – Resultado da granulometria para cada estação e média para a área de estudo

Percebe-se que os solos das estações são bastante semelhantes, com o solo da estação 02 mais próximo da média e o solo da estação 03 sendo o mais diferente, com maior quantidade de areia grossa. Ainda, a estação 05 apresenta o solo mais fino, juntamente com a estação 01. E a estação 04 aparece muito próximo a média, sendo apenas um pouco mais fino que a estação 02.

Desta forma, utilizaram-se os resultados da Tabela 10 – Resultados do ensaio de granulometria da bacia experimental do Guaraíra da granulometria da bacia experimental, que mostra um resultado de aproximadamente 50% de areia grossa, 48% de areia fina e os 2% restantes de silte no triângulo de classificação textural de solos, classificando o solo como arenoso, como apresentado o ponto vermelho no canto inferior esquerdo na Figura 50.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de granulometria da bacia experimental do Guaraíra

Bacia - Média das Estações						Tipo	massa (g)	%			
Peneira	Abertura (mm)	Material retido			% passa						
		massa (g)	%	% acum.							
n 16	1,200	15,15	1,52%	1,52%	98,48%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%			
						Areia grossa (2,000 a 0,420mm)					
n 30	0,600	188,08	18,81%	20,32%	79,68%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	503,56	50,36%			
n 40	0,420	300,33	30,03%	50,36%	49,64%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	478,47	47,85%			
n 50	0,300	241,85	24,19%	74,54%	25,46%						
n 100	0,150	197,88	19,79%	94,33%	5,67%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	17,97	1,80%			
n 200	0,074	38,74	3,87%	98,20%	1,80%						

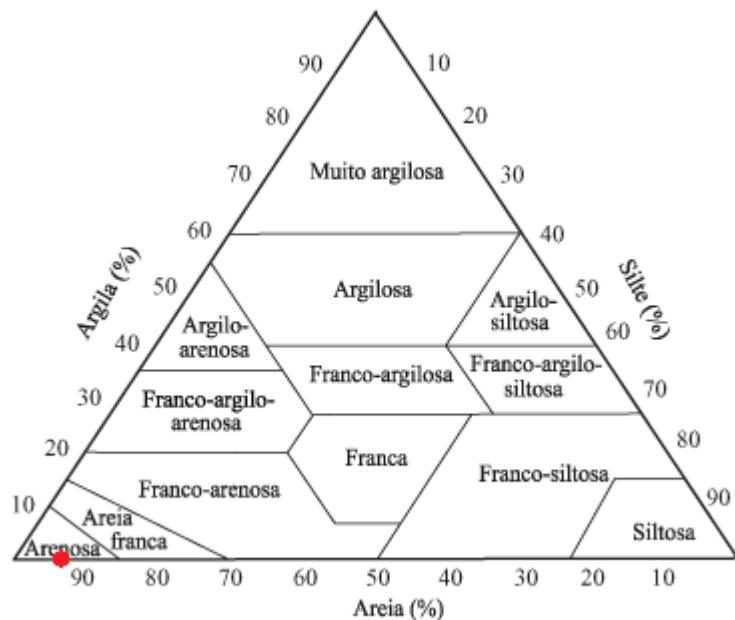


Figura 50 – Triângulo de grupamento textural do solo

Resultados mais específicos da granulometria do solo de cada estação podem ser conferidos no apêndice A desta dissertação.

5.5 Análises de variabilidade espaço-temporal da umidade do solo

Primeiramente, considera-se importante explanar melhor o que são os termos variáveis e invariáveis no tempo, quando se refere à umidade do solo. A parcela da umidade do solo invariável no tempo, ou média temporal, é aquela que é influenciada por parâmetros estáveis ao longo dos meses, anos e até mesmo décadas, como por exemplo o tipo de solo, uso do solo, cobertura do solo (seja vegetação natural ou modificada) e topografia. Estes fatores, claro, podem variar de acordo com o tempo, principalmente quando se há influência antropomórfica, como uma mudança no uso do solo, desmatamento ou retirada de solo, por exemplo.

Inversamente, a parcela da umidade variável do solo, também chamada de anomalia, é aquela influenciada pelas variáveis que variam de acordo com a sazonalidade, sendo esta normalmente mensal e anual, tendo como exemplo a precipitação. Sendo a precipitação a variável principal que afeta a anomalia, seu gráfico mensal para o período estudado é apresentado na Figura 51, onde pode-se ver que, para o período estudado, o período chuvoso concentrou-se nos meses que vão de maio a agosto.

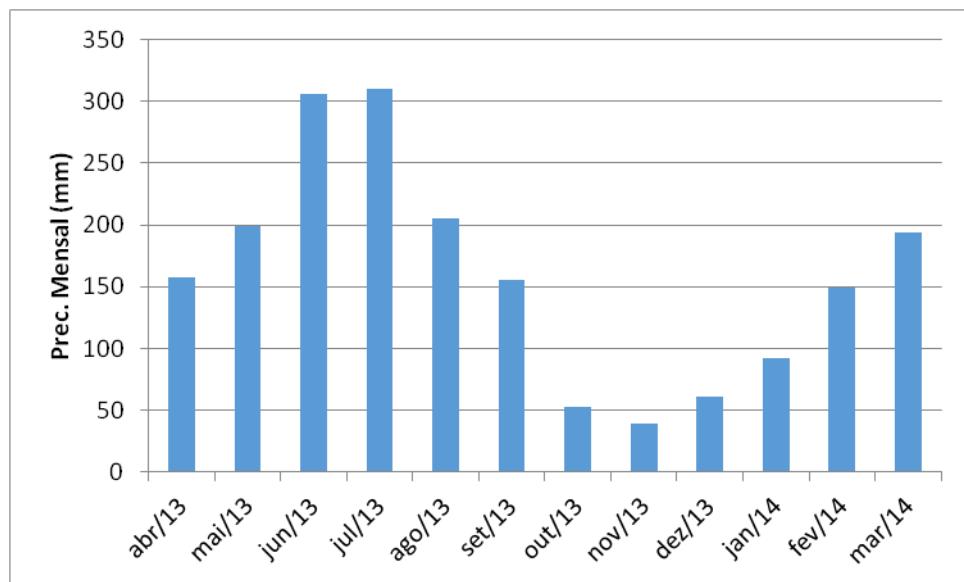


Figura 51 - Distribuição temporal mensal da precipitação para o período de estudo 2013/2014 - Estação pluviográfica 04

Observou-se neste estudo que para a bacia do Guaraíra, a variância da umidade do solo é tão menor quanto menor seja a média espacial da umidade do solo, ou seja, o comportamento das estações da bacia experimental é mais semelhante em sua época seca, como mostrado na Figura 52. As Figura 53 e Figura 54 confirmam esse comportamento, ao

se comparar, respectivamente, a média e coeficiente de variação espaciais da umidade do solo e a média e variância espacial das anomalias. Observa-se nesta última que quão maior a média das anomalias, maior seu desvio padrão, caracterizando as diferenças que existem entre o comportamento da umidade do solo nas estações estudadas.

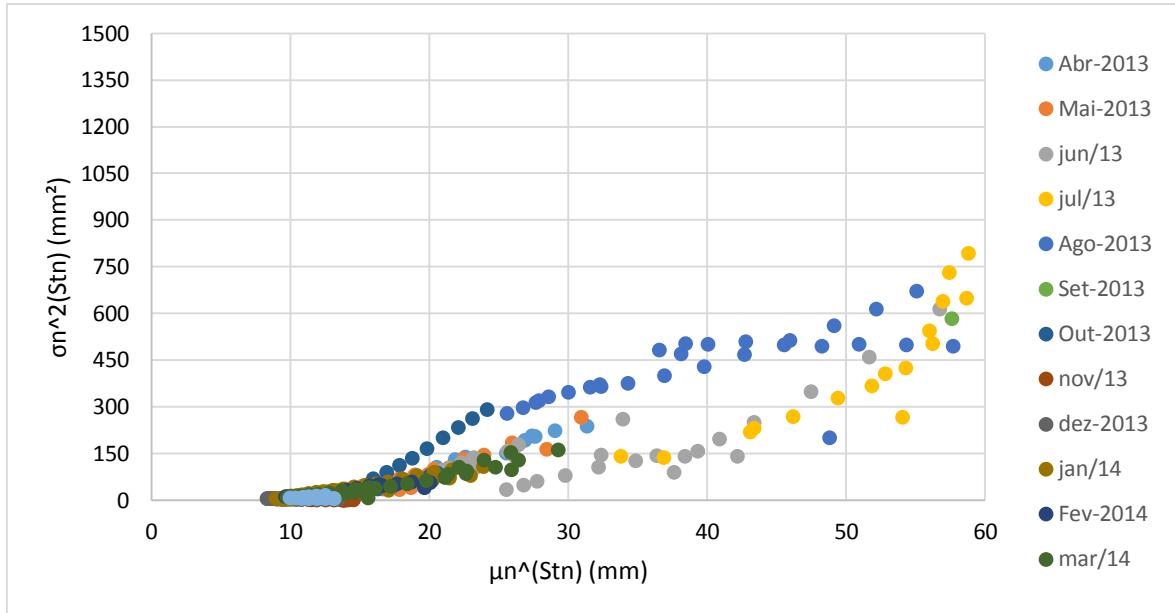


Figura 52 – Média espacial *versus* variância espacial diária da umidade do solo da bacia experimental

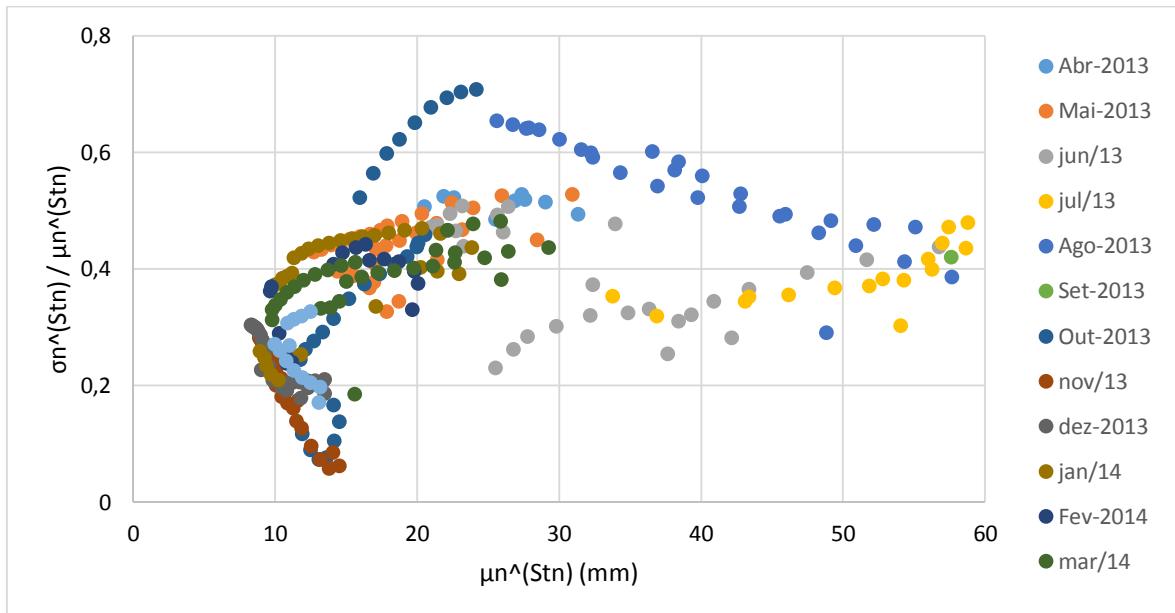


Figura 53 - Média espacial *versus* coeficiente de variação diária da umidade do solo da bacia experimental

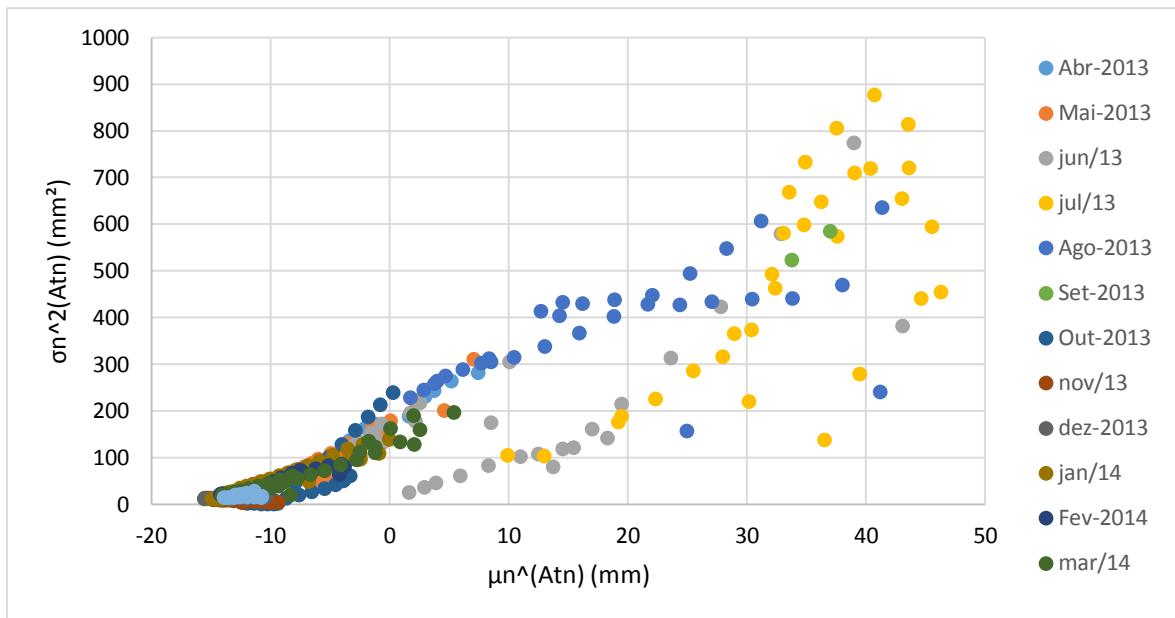


Figura 54 - Média espacial *versus* variância espacial diária das anomalias da bacia experimental

Percebe-se que, os meses mais secos, (setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) estão concentrados no lado esquerdo inferior do gráfico, que são os meses de pouca variabilidade temporal, enquanto que os meses chuvosos (março, abril, maio, junho, julho e agosto) mostram grande variabilidade temporal. Enquanto o mês de outubro, que é o segundo mês com a menor precipitação, apresenta um pouco de variação temporal, representando a água ainda acumulada no solo ao fim das precipitações de setembro. Ou seja, os valores estão relacionados com a umidade antecedente presente no solo. É interessante notar a Figura 53, onde estes meses secos apresentam os menores coeficientes em relação aos chuvosos, invertendo-se os meses de outubro e abril, que são os primeiros meses com pouca e muita chuva, respectivamente. Isto ressalta novamente a influência da umidade antecedente, agora no caso de abril, explicando-se que o solo e a vegetação absorveram de forma rápida a umidade, que vinham de um período seco.

As Figura 56, Figura 57 e Figura 57, por sua vez, mostram a representação gráfica das séries temporais da umidade do solo e de suas parcelas variáveis e invariáveis no tempo, respectivamente; e o espaço em branco, referente a setembro e uma parcela de outubro, são as falhas na coleta de dados durante o período, que vai de 03/setembro/2013 a 02/outubro/2013.

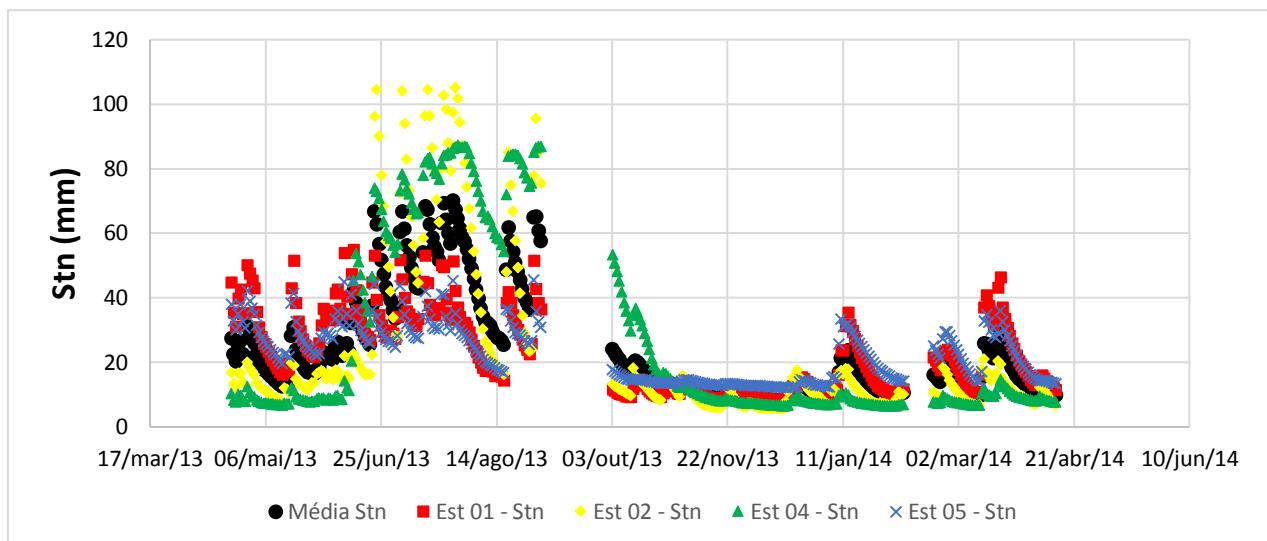


Figura 55 - Séries temporais de umidade do solo das estações e média

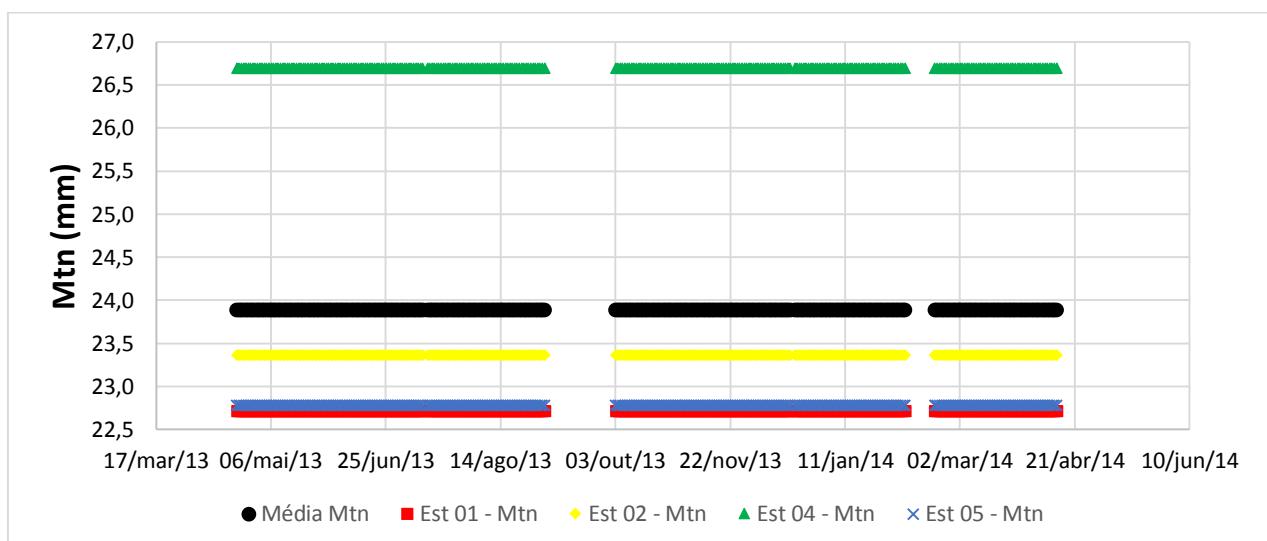


Figura 56 - Séries temporais das estações e média da parcela invariante no tempo da umidade do solo (média temporal)

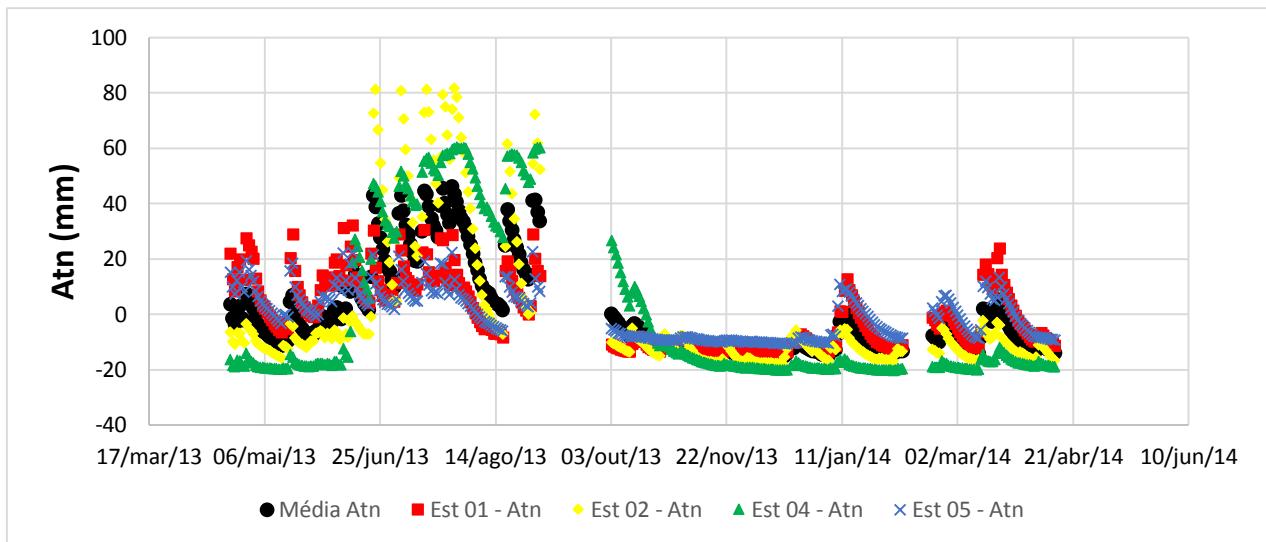


Figura 57 – Séries temporais das estações e média da parcela variante no tempo da umidade do solo (anomalias)

As Figura 55, Figura 56 e Figura 57 mostram a variação da umidade do solo para cada estação estudada durante o período determinado, novamente com os maiores valores durante a época chuvosa, fator visto como determinante para esta variável. Observa-se já na Figura 55 as diferenças entre as estações 02 e 04, com maiores valores de umidade e a estação 05, com os menores, porém mais constantes valores, enquanto a estação 01 é a que mais se aproxima da média.

Observa-se também as médias temporais na Figura 56, que por seu próprio conceito, é estável no tempo. Ainda, as médias temporais permitem uma fácil visualização da estação 04 como tendo os maiores valores e da 05 com os menores, e a 01 novamente próxima a média da estação. É interessante notar que neste caso, a estação que mais se aproxima da média da média temporal é a estação 02, isto devido ao fato desta média ser puxada para cima pela estação 04. Novamente aparecem as estações 01 e 05 com valores muito semelhantes, o que confirma o que foi visto durante as coletas no campo, as estações com solo e vegetação semelhantes. A estação 01 ainda aparece com valores um pouco menores que o da estação 05, podendo-se atribuir esta leve diferença de resultado aos galhos e folhas que retardam a chegada da água ao solo e previnem a evapotranspiração, impedindo o fenômeno da precipitação, visto como variável no tempo, de exercer função sobre ela.

Na Figura 57, as anomalias seguem o padrão da Figura 55, com valores menores, já que representam apenas as parcelas variáveis no tempo. Aqui percebe-se também que devido ao seu conceito e o conceito da média temporal, como as parcelas invariáveis e variáveis no tempo formam a umidade do solo medida. Também nota-se com mais facilidade

os baixos valores da estação 04, agora claramente menores que os da estação 02 e principalmente da estações 05 e 01.

Já as Figura 59 e Figura 59 mostram a umidade do solo e seu desvio padrão para mais e para menos, e as anomalias com o desvio padrão para mais e para menos, respectivamente. As variações do desvio são mais percebidas na parcela das anomalias durante o período seco, enquanto que no período chuvoso a variação é mais percebida na umidade do solo absoluta, embora esta ainda seja alta nas anomalias. Isto se deve a presença da parcela invariável na umidade absoluta e pela falta dela nas anomalias, tendo em vista seus valores na Figura 56.

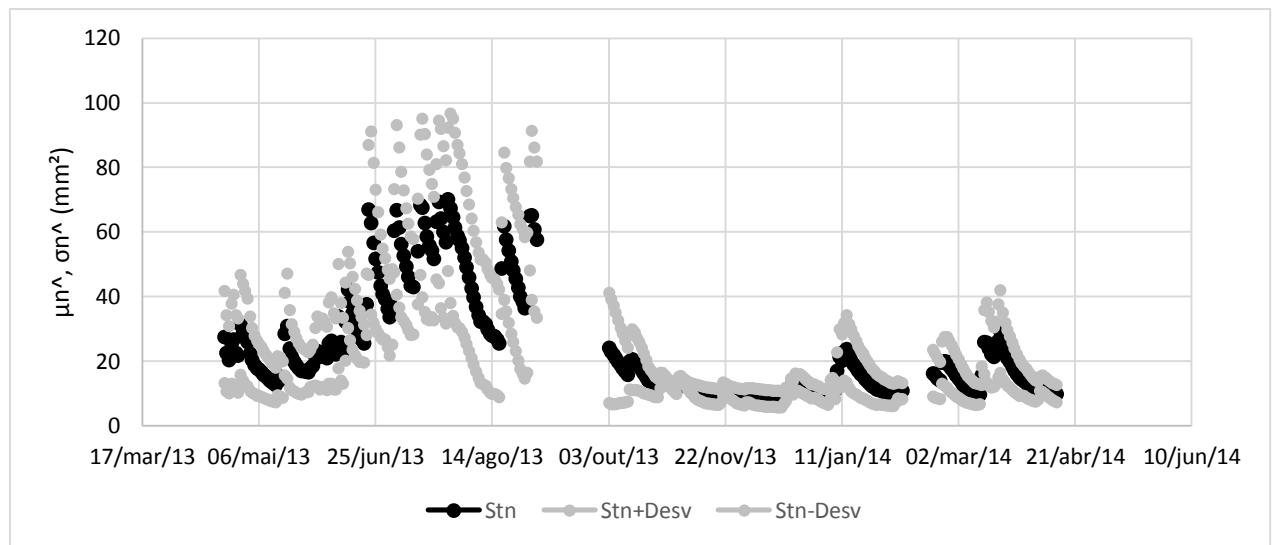


Figura 58 – Séries temporais da média da umidade do solo e seus desvios-padrões

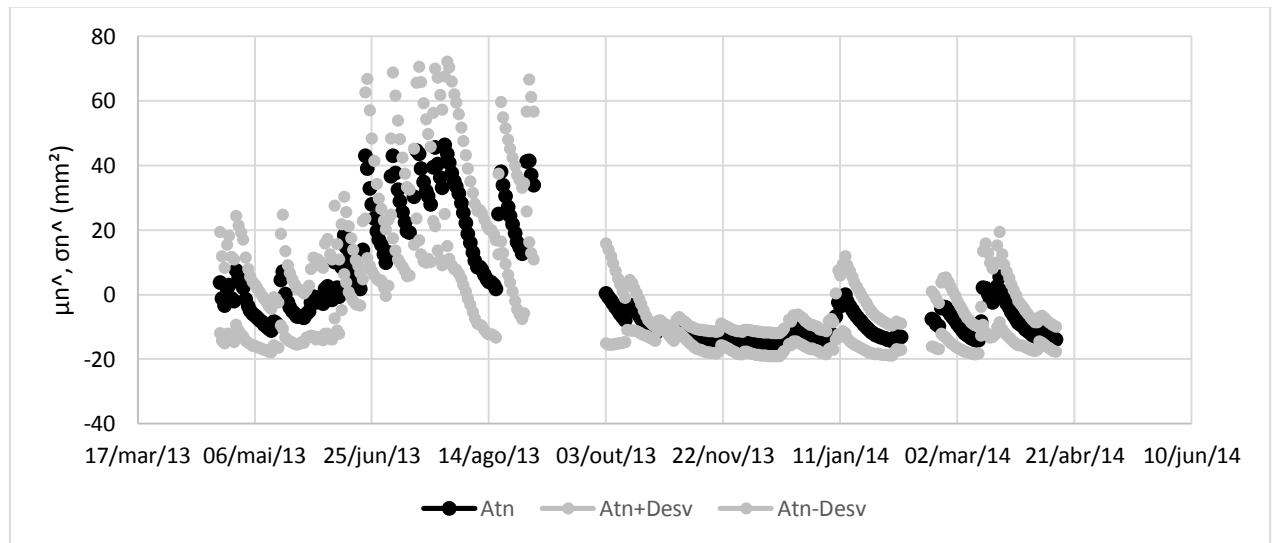


Figura 59 – Séries temporais da anomalia e seus desvios padrões

Enquanto isto, a evolução temporal da variância espacial da umidade absoluta e seus componentes, como na equação 10 é mostrada na Figura 60.

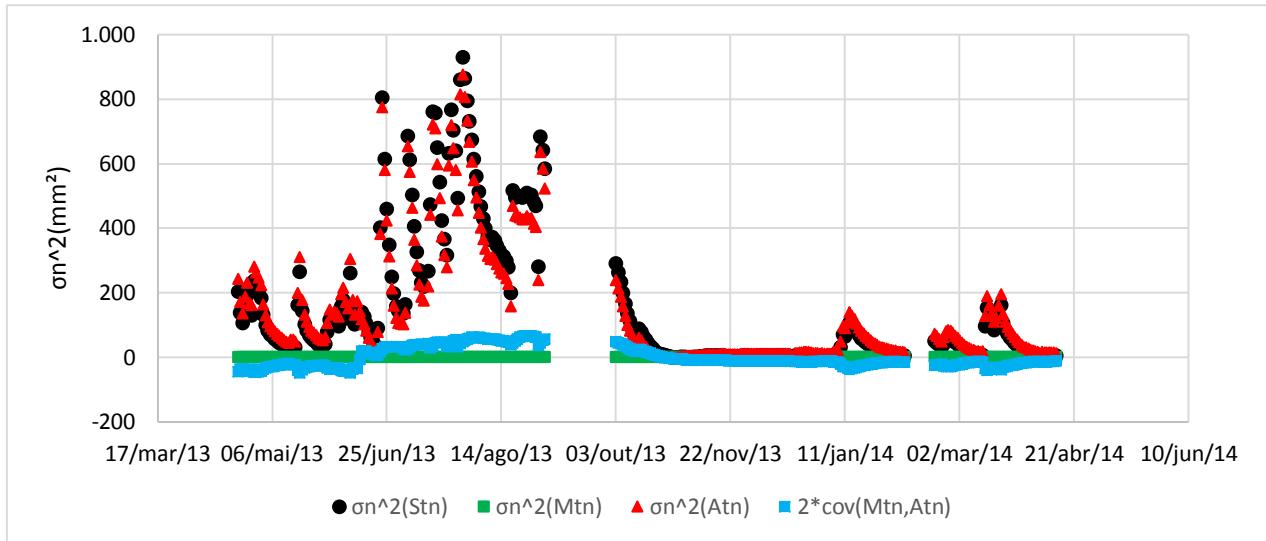


Figura 60 – Decomposição da variância espacial da umidade do solo em seus contribuintes como na equação 10 (mm^2)

Percebe-se o termo da variância da parcela invariável no tempo constante, $\sigma_{\hat{n}}^2(M_{tn})$, enquanto a correlação entre os termos variáveis e invariáveis no tempo, $2\text{cov}(M_{tn}, A_{tn})$, muda de sinal, sendo uma correlação alta e positiva na época chuvosa e baixa e negativa na época seca.

Por sua vez, a Figura 61 representa o que foi explanado nas equações 11 e 12, expressa em porcentagem.

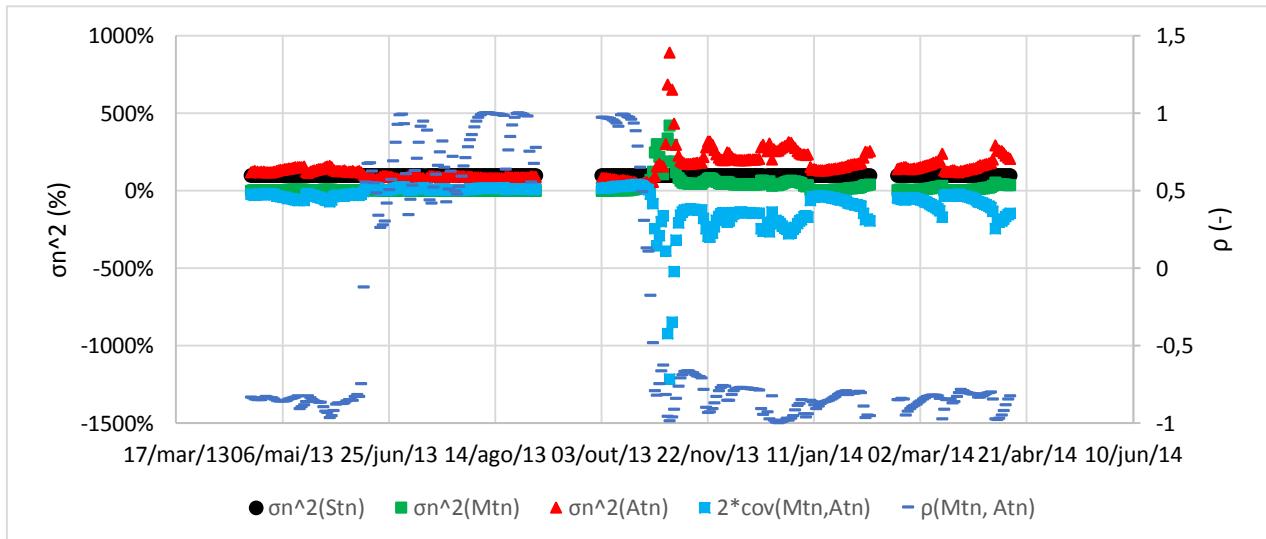


Figura 61 - Decomposição da variância espacial da umidade do solo em seus contribuintes como nas equações 11 e 12 (Valores em %)

Como a Figura 61 representa as porcentagens das variáveis, então a variância da umidade absoluta do solo (ρ) é que se torna “invariável” em 100%, visto que representa a soma dos outros componentes para lhe compor.

Isto se torna mais fácil de entender pela Figura 62, que representa estes mesmos dados em forma de porcentagens em barras para quatro épocas do ano.

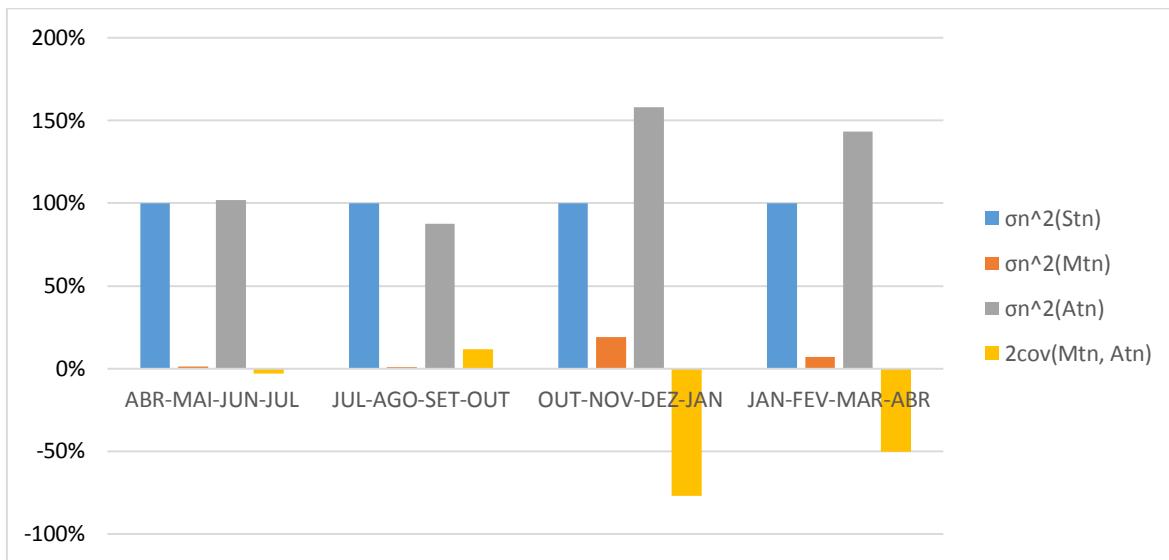


Figura 62 – Porcentagens das parcelas decompostas da variância espacial da umidade do solo

Vale ressaltar que estas épocas estão com 4 meses devido ao fato de que o período hidrológico não começou exatamente nem no fim e nem no começo do mês, desta forma, um pedaço do mês ainda representa um período distinto do outro. Nos dois últimos períodos, de outubro a abril, que compõem o período mais seco, a covariância entre a parcela invariável e a variável no tempo torna-se extremamente negativa. Os meses secos são exatamente onde o termo invariável, média temporal, torna-se mais relevante, com as anomalias com valores negativos e próximos a zero.

Enquanto isto, nos meses de maior umidade do solo na bacia experimental, a covariância é baixa, indo de -3% à 12%, como mostra o último gráfico. E a parcela da variância mais responsável pela variância absoluta como sendo a das anomalias.

Apresenta-se a Figura 63, que mostra a relação entre a variância espacial da umidade do solo absoluta $\sigma_{\hat{n}}^2(S_{tn})$ e a variância espacial das anomalias $\sigma_{\hat{n}}^2(A_{tn})$.

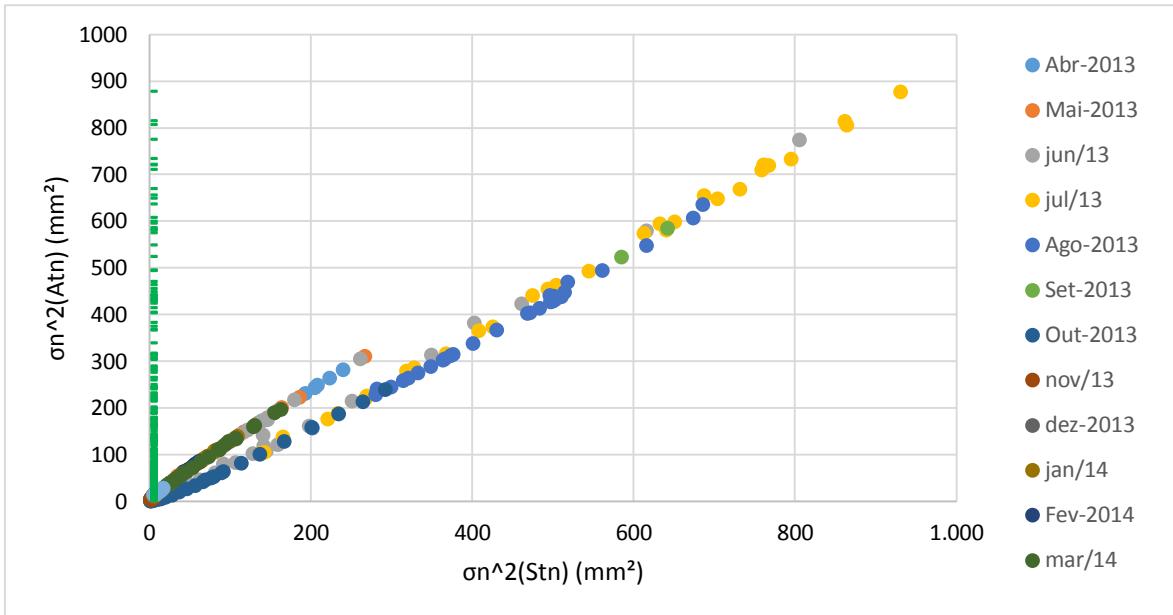


Figura 63 – Variância espacial da umidade do solo *versus* variância espacial da parcela variável no tempo (variância espacial da média temporal representada na linha verde vertical)

A tendência observada neste caso é o da semelhança entre o valor de $\sigma_{\hat{n}}^2(S_{tn})$ e o valor de $\sigma_{\hat{n}}^2(A_{tn})$, sendo o primeiro um pouco maior. No caso para valores de 0 a aproximadamente 260 mm² da variância espacial, a variância da anomalia aparece também maior, como numa parábola. A medida que os valores de $\sigma_{\hat{n}}^2(S_{tn})$ se aproximam e se tornam menores que $\sigma_{\hat{n}}^2(M_{tn})$, observa-se uma concentração dos valores de $\sigma_{\hat{n}}^2(A_{tn})$.

Apresenta-se então a Figura 64, que relaciona a variância espacial da umidade do solo absoluta e a covariância entre média temporal e anomalia.

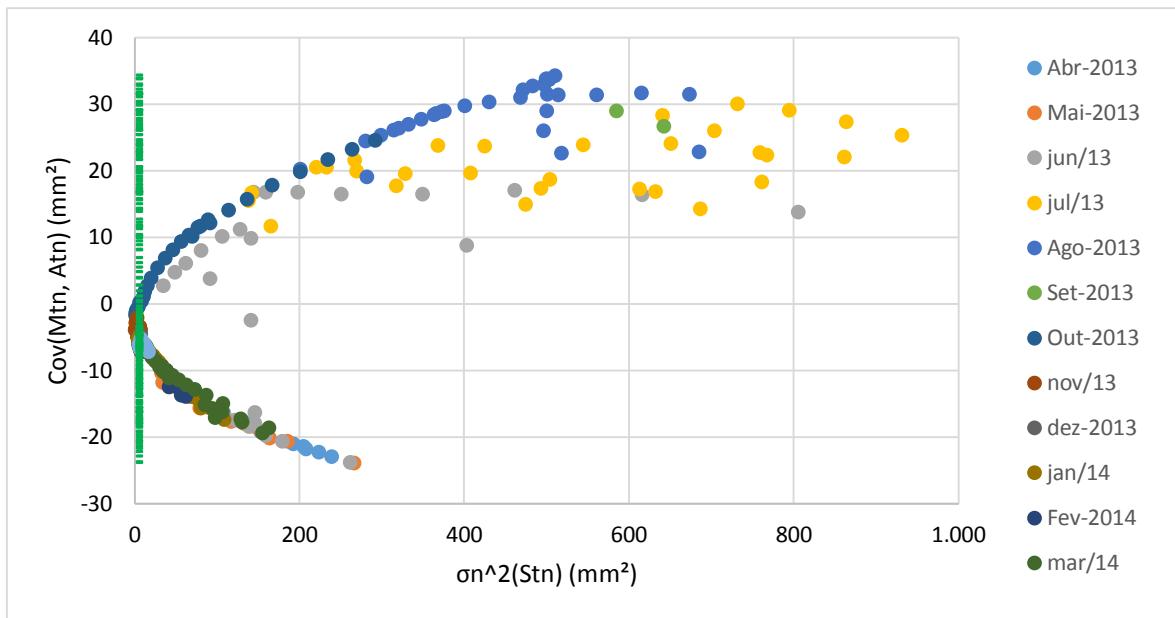


Figura 64 – Variância espacial da umidade do solo *versus* covariância da média temporal e anomalias (variância espacial da média temporal representada na linha verde vertical)

Aqui, pode-se observar um comportamento semelhante ao da Figura 63, com os detalhes de que a parábola é mais acentuada e quando os valores de $\sigma^2_{\hat{n}}(S_{tn})$ são menores, a covariância torna-se negativa, mostrando um comportamento contrário das parcelas variáveis e invariáveis no tempo da umidade do solo. É valido salientar que isto ocorre na época seca.

Apresenta-se então a Figura 65, relacionando a variância espacial das anomalias com a covariância entre a média temporal e as anomalias.

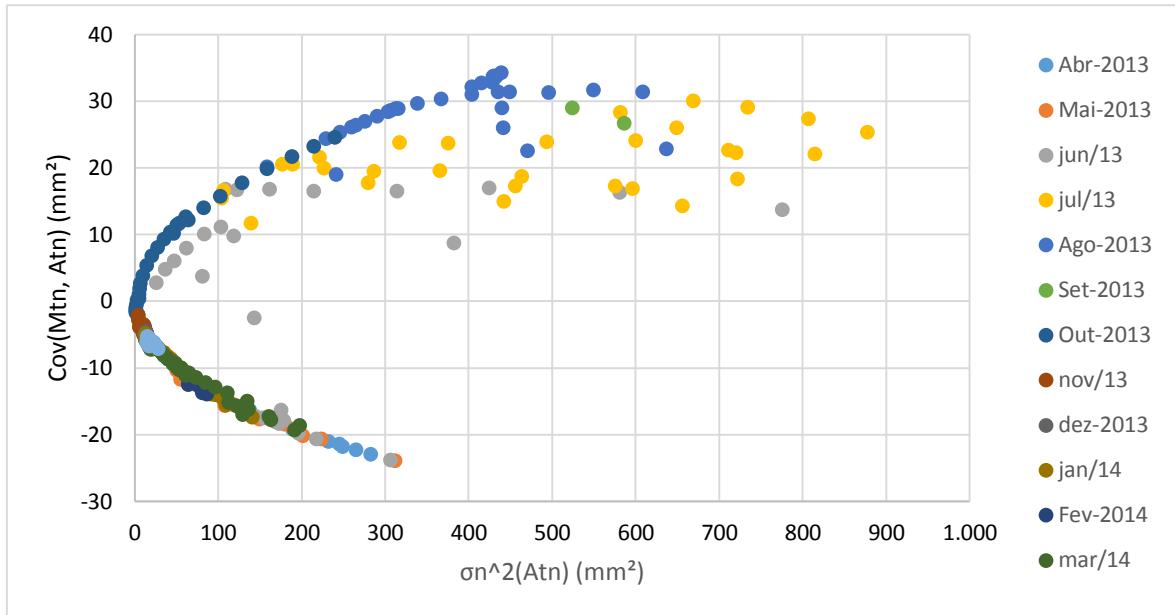


Figura 65 - Variância espacial das anomalias *versus* covariância da média temporal e anomalias

Por fim, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** confirma a Figura 64, ao ostrar a parábola no mesmo sentido, e uma tendência de aumento da variância espacial da parcela variável no tempo em relação à covariância até o valor de 450 mm^2 para $\sigma^2_{\hat{n}}(A_{tn})$, onde se estabiliza e se espalha. É interessante notar nestas três últimas figuras como a variância sempre apresenta os maiores valores para os meses de julho e agosto, tanto para a parcela absoluta quanto das anomalias, comprovando o que já se veio observando desde as análises das coletas manuais.

Na Figura 66 a) e b) são mostrados os rankings das diferenças relativas da umidade absoluta do solo (δS_{tn}) e das diferenças absolutas da umidade do solo (ΔS_{tn}) com seus desvios-padrões.

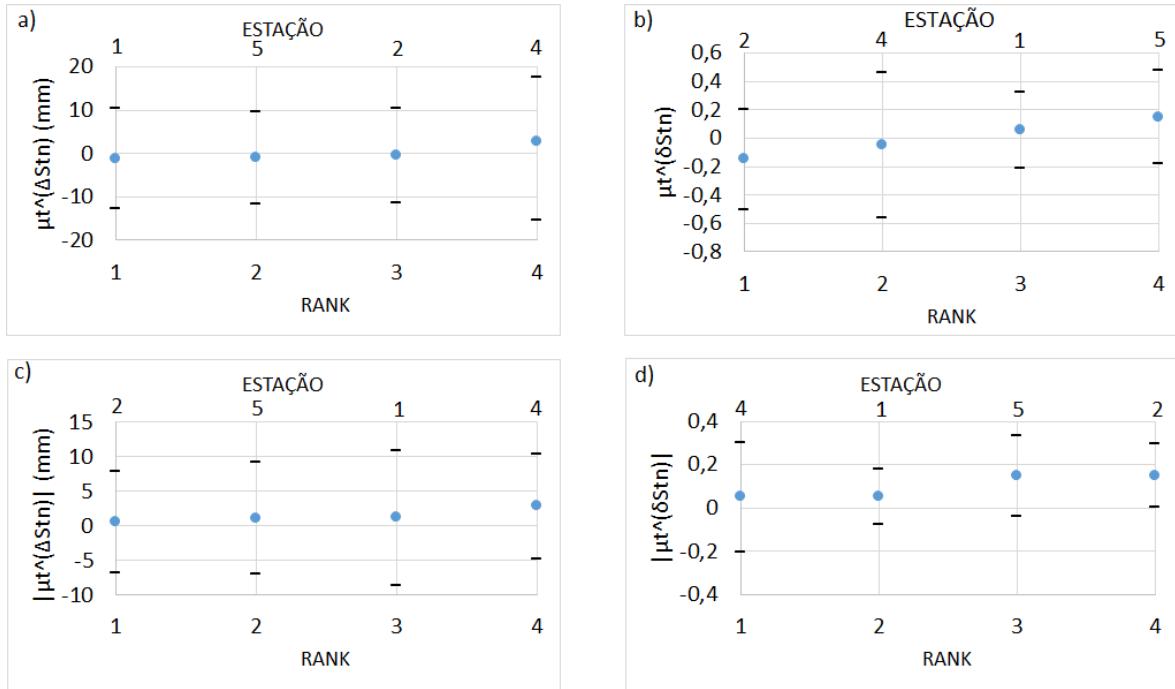


Figura 66 – Rankings de estabilidade de: (a) média temporal da diferença de umidade absoluta do solo; (b) média temporal da diferença relativa de umidade absoluta do solo; (c) módulo da média temporal da diferença de umidade absoluta do solo; (d) módulo da média temporal da diferença relativa de umidade absoluta do solo

A ordem das estações é invertida exatamente nas estações 01 e 02 e nas estações 04 e 05, nas partes a) e b), onde as estações 01 e 02 são mais próximas da média de umidade do solo da bacia experimental e as estações 04 e 05 as mais distantes. Enquanto a Figura 66 c) e d) nos mostra os rankings destas mesmas variáveis, mas em módulo, invertendo desta vez as estações 02 e 04 e 01 e 05. Estas inversões ocorrem pelas variações do valores de diferenças relativas e absolutas que ocorrem entre as estações. É importante notar também o alto valor do desvio padrão para a estação 04, quase sempre mais elevado que das outras estações. Nota-se que todas as estações possuem seus valores próximos a zero, o que indica que elas representam bem a bacia como um todo, temporalmente. Isto acontece principalmente devido ao fato da chuva ser igual para todas as bacias, gerando valores anuais de umidade semelhantes entre as estações para a profundidade medida. Porém, nota-se na Figura 66 b) o desvio padrão da estação 01 como sendo o menor, e como foi visto, esta é a estação com os valores mais constantes de umidade volumétrica do solo para o período estudado.

A Figura 67 a) e b) mostra agora os rankings de $\mu_t(|\Delta M_{tn}|)$ e $\mu_t(|\Delta A_{tn}|)$, respectivamente, este último acompanhado de seu desvio-padrão.

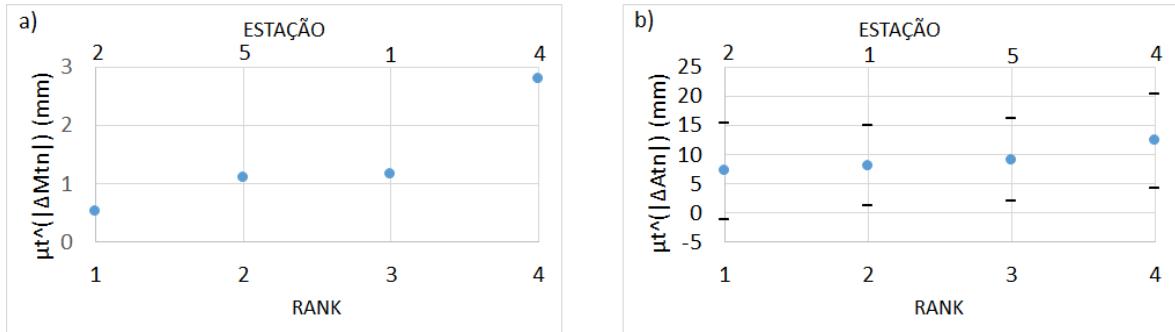


Figura 67 – Rankings de estabilidade de: (a) valores absolutos da média temporal e (b) média temporal dos valores absolutos das diferenças das anomalias com seus respectivos desvios padrões para mais e menos

Comparando-os com os valores de $|\mu_t(\Delta S_{tn})|$ percebe-se que este se aproxima mais da média temporal do que das anomalias. Também, o ranking está idêntico nas estações, ao contrário das anomalias, com um ranking invertendo as estações 01 e 05. Nota-se a estação 04 novamente com o maior desvio-padrão, já esperado, pois regista os maiores valores de umidade volumétrica do solo na época chuvosa e os menores na época seca.

Por fim, a Figura 68 relaciona o ranking de $\mu_t(|\Delta S_{tn}|)$ com os rankings de $\mu_t(|\Delta M_{tn}|)$ e $\mu_t(|\Delta A_{tn}|)$, em a) e b), respectivamente.

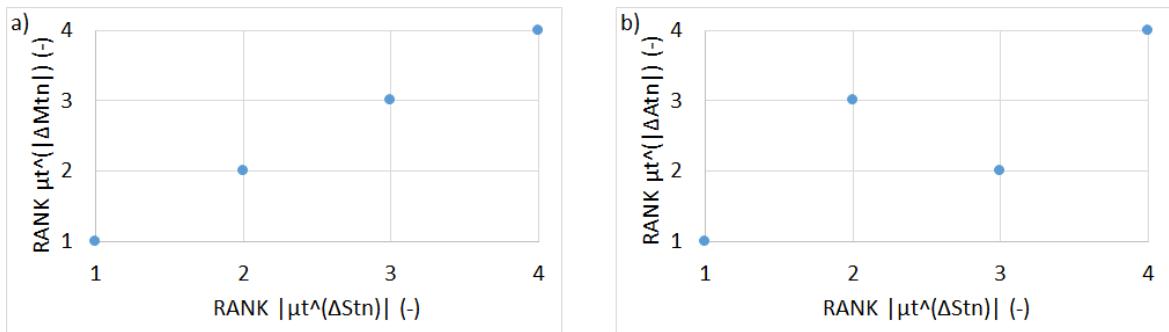


Figura 68 – (a) Ranking dos valores absolutos da média temporal das diferenças da umidade do solo absoluta *versus* ranking dos valores absolutos da média temporal e (b) ranking dos valores absolutos da média temporal das diferenças da umidade do solo absoluta *versus* ranking da média temporal dos valores absolutos das diferenças das anomalias.

Na parte a), observa-se a linearidade entre as variáveis relacionados, enquanto que a parte b) não apresenta um ranking distorcido. Isto confirma o exposto anterior, de que os elementos responsáveis pela média temporal são mais determinantes para a umidade do solo do que as dinâmicas temporais.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A estação 01, com vegetação composta por árvores do tipo mata atlântica, apresentou a maior constância nos valores de umidade volumétrica do solo e também foi a que mais se aproximou da média da bacia hidrográfica considerando todo o período estudado. A estação 05 apresentou resultados semelhantes à da estação 01, enquanto que as estações 02 e 04 se afastaram da média, com maiores valores, nas épocas chuvosas.

Acerca da variabilidade temporal da umidade do solo, percebe-se que esta é bem relacionada às variações no regime precipitações e umidade antecedente, como mostrado nos gráficos de precipitação e umidade do solo medida tanto pelas coletas manuais quanto pelas sondas TDR. Na média temporal foi observado como os valores da estação 04 elevam os resultados para a média da bacia hidrográfica, ocasionando o distanciamento dos valores obtidos nas estações 01 e 05, que são os menores entre as estações estudadas. Desta forma, tornando a média temporal da estação 02 como sendo a mais próxima da média da bacia hidrográfica. Já para as anomalias, que variam no tempo, é possível observar as estações 04 e 02 com os menores valores na época chuvosa, enquanto os maiores valores destas anomalias acontecem no período específico da época chuvosa, onde o solo já está com alto teor de umidade devido a precipitações anteriores recentes.

Na questão da variabilidade espacial, descobriu-se que para a área de estudo, os termos invariáveis no tempo possuem maior significância. Isto ficou claro ao se observar os comportamentos da estação 04 tanto nos dados coletados manualmente quanto pela sonda TDR, que era a única com pouca cobertura vegetal, sendo esta sua principal diferença em relação às outras estações. As análises estatísticas e de variabilidade espaço-temporal confirmaram então o que já era percebido em campo, visto que esta estação apresentava por vezes um pequeno curso d'água durante alguns dias dos meses mais chuvosos.

A precipitação, variável que rege as anomalias, apesar de influenciar bastante nos resultados medidos de umidade volumétrica do solo, justamente por serem iguais para todas as estações, pouco contribuíram para as diferenças vistas entre as estações estudadas. Com isto, a precipitação poderia diferenciar bastante os resultados de uma estação em relação a outra, o que não acontece devido às estações serem afetadas de forma igual por esta variável.

Logo, as diferenças na percepção da umidade do solo nas estações ficaram a cargo do que as diferenciam entre os parâmetros invariáveis no tempo, neste caso, a já citada cobertura

vegetal, que é semelhante para as estações 01 e 02, com árvores de pequeno e médio porte, sendo a 01 com vegetação mais densa, a estação 05 com bastante grama e, por fim, a estação 04, com pouquíssima cobertura vegetal, fazendo com que a água recebida seja logo absorvida pelo solo, resultando em pequenos valores de umidade do solo superficial e altos valores de umidade do solo nas camadas mais profundas.

Assim, percebe-se nas épocas chuvosas, com a umidade do solo mais elevada, os diferentes resultados que mostram como a cobertura vegetal implica na umidade do solo. Isto pode acontecer devido aos fenômenos de evapotranspiração das plantas, que de certa forma controlam a umidade que chega ao solo, sendo protegendo-o da precipitação ou retirando-a do solo, como também devido ao perfil do subsolo na bacia hidrográfica, e suas propriedades hidráulicas em conjunto ao tipo de solo apresentado em suas diferentes camadas. Assim, há diminuição no escoamento superficial local, e as raízes garantem firmeza ao solo, impedindo modificações no mesmo decorrentes de erosões pelo fluxo de água. Desta forma, a vegetação é uma variável que promove no contexto de uma bacia hidrográfica: geração de vazão, desenvolvimento de secas, recarga de aquíferos e demais interações desta variável com o clima e ambiente.

Na bacia hidrográfica experimental, as sondas TDR utilizadas, agora calibradas, continuam a obter mais dados, aumentando o período que estudos semelhantes possam ser realizados, aumentando assim sua confiabilidade e até mesmo talvez novos resultados e inquições sobre a área de estudo, principalmente com a adição futura dos dados da estação 03.

Como recomendações, este trabalho pode servir de base à modelagem hidrológica nesta região e em outras regiões semelhantes. A modelagem hidrológica tornaria possível uma expansão em pesquisas que se relacionem à umidade do solo envolvendo imagens de satélites, recarga de aquíferos e evapotranspiração por exemplo, devido ao fato de se precisar ir menos à campo devido aos dados e estudos de campo obtidos em estudos prévios, como este, subsidiando o entendimento matemático do ciclo hidrológico da região.

Dito isto, espera-se que este estudo possa promover mais estudos em outras bacias hidrográficas diferentes, bem como nela própria, com uma série de dados maior. Isto permitirá um entendimento ainda melhor sobre como os termos invariáveis e variáveis para geração de umidade do solo trabalham para diversos locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELEN, S.; SEITZ, F.: **Relating satellite gravimetry data to global soil moisture products via data harmonization and correlation analysis.** Remote Sensing of Environment 136 (2013) 89–98.
- ARAÚJO, J. C. de; PIEDRA, J. I. G.: **Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed.** 2009. Hydrological Processes 23: 1169-1178.
- DORIGO, W.; WAGNER, W.; DRUSCH, M.; MECKLENBURG, S.; VAN OEVELEN, P.: **International Soil Moisture Network.** Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (I.P.F.) Vienna University of Technology, 2009
- BARBOSA, L. R.: **Relações precipitação-umidade do solo-vazão de eventos sub-diários em bacias experimentais do NE brasileiro.** 2015. 138f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- BOLTEN, J. D., CROW, W. T., ZHAN, X., JACKSON, T. J., & REYNOLDS, C. A.: **Evaluating the utility of remotely sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring.** IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(1), 57–66. 2010.
- BOUTEN, W.; HEIMOVAARA, T. J., TIKTAK, A.: **Spatial Patterns of Throughfall and Soil Water Dynamics in a Douglas Fir Stand.** Water Resources Research, 28, 3227–3233, 1992.
- BRACKEN, L. J.; CROKE, J.: **The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems.** Hydrological Processes, 21(13), 1749-1763. 2007.
- BROCCA, L.; TULLO, T.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R.: **Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability.** Journal of Hydrology, 422-423, 63-75, 2012.
- CAMPBELL, Manual de instruções da sonda CS616 e CS625, 2002.
- CHEN, L.; HUANG, Z.; GONG, J.; FU, B.; HUANG, Y.: **The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China.** Catena, 70, 200-208. 2007.
- 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, 516, 317-329, 2014.
- COBOS, D. R.; & CHAMBERS, C.: **Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors. Decagon Devices, Inc.: Application Note,** 2010.
- COPPOLA, A.; COMEGNA, A.; DRAGONETTI, G.; LAMADDALENA N.; KADER, A. M.; COMEGNA, V.: **Average moisture saturation effects on temporal stability of soil water spatial distribution at field scale.** Soil & Tillage Research 114, pp. 155-164, 2011.

COSTA, C. A. G.: **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de caatinga preservada.** 2012. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo. 2. ed.** rev. atual. Rio de Janeiro, 212 p.

GOLDFARB, M. C.; CYSNEIROS, D. O.; SILVA, T. C. **Caracterização fluvio-morfológica da bacia do Rio Gramame.** In: SILVA, T. C.; SILANS, A. M. B. P.; GADELHA, C. L. M.: **Bacia do Rio Gramame: hidrologia e aspectos ambientais para a gestão dos seus Recursos Hídricos.** 1.ed. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, p.196, 2002.

IBESA: **Relatório preliminar sobre a instalação de bacias experimentais no Semi Árido.** Projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP. 2002.

LAWRENCE, J. E.; HORNBERGER, G. M.: **Soil moisture variability across climate zones.** Geophysical Research Letters, Vol. 34, L20402, 2007.

LIRA, G. A. R.; SILANS, A. M. B. P.; PEDROSA FILHO, L.; ALMEIDA, C. A.; LEITE, E. P. F.; SILVA, T. C.; FILHO, S. V.; MOURA, E. M.; SOUSA, E. E.; DIAS DA SILVA, L.: **Bacia experimental do rio Guaraíra: implantação e primeiros Resultados.** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 2003.

LIU, Y. Y.; EVANS, J. P.; McCABE, M. F.; DE JEU, R. A. M.; VAN DIJK, A. I. J. M.; SU, H.: **Influence of cracking clays on satellite estimated and model simulated soil moisture.** Hydrology and Earth Systems Science, 14, 979–990, 2010.

MITTELBACH, H.; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S. I.: **Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland.** Journal of Hydrology, 430-431, pgs 30-39, 2012.

MITTELBACH, H.; SENEVIRATNE, S. I.: **A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: temporal dynamics versus time-invariant contributions.** Hydrology and Earth Systems Sciences, 16, 2169–2179, 2012.

MEDEIROS, J. D. F.; CASTRO, N.; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T.: **Calibração de Sondas do TDR em um Latossolo.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.2, p.19-25, 2007.

MOLINA, A. J.; LATRON, J.; RUBIO, C. M.; GALLART, F.; LLORENS, P.: **Spatio-temporal variability of soil water content on the local scale in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, North Eastern Spain). How different spatio-temporal scales reflect mean soil water content.** Journal of Hydrology, 516, 182-192, 2013.

MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R.; PINTO, E. J. A.; LIMA, J. E. S.: **Estabilidade Temporal da Distribuição Espacial da Umidade do Solo em uma Bacia Intermittente no Semiárido de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 17 n.3, jul/set 2012, 101-113.

OLIVEIRA, L. M. M de.; MONTENEGRO, S. M. G. L; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, B. B. da; MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D.: **Análise quantitativa de**

parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v. 47, n.9, p. 1209-1217, set. 2012.

PASTUSZKA, T.; KRZYSZCZAK, J.; ŚLAWIŃSKI, C.; LAMORSKI, K.; **Effect of Time-Domain Reflectrometry probe location on soil moisture measurement during wetting and drying processes.** *Measurement* (2013).

PARAÍBA. 1985. Secretaria da Educação. **Atlas geográfico do Estado da Paraíba.** Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, GRAFSET.

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

QIU, Y.; FU, B.; WANGS, J.; CHEN, L.: **Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China.** *Journal of Arid Environments* (2001) 49: 723–750.

REHISA. **Relatório Final da Caracterização das bacias exp. 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.: **Simulação do escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema.** 2008. 148f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), UFAL, Alagoas.

RITSEMA, C.J.; DEKKER, L. W.: **How water moves in a water repellent soil Dynamics of fingered flow.** *Water Resources Research* 30, 2519–2531, 1994.

ROBINSON, D.A., CAMPBELL, C.S., HOPMANS, J.W., HORNBUCKLE, B.K., JONES, S.B., KNIGHT, R., OGDEN, F., SELKER, J., WENDROTH, O.: **Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review.** *Vadose Zone J.* 7, 358, 2008.

ROSSATO, L.; ANGELIS, C. F.; ALVALÁ, R. G. C.: **Impacto das Características da Superfície Terrestre no Algoritmo de Inferência da Umidade do Solo no Brasil, Utilizando Observações do Sensor AMSR-E/Aqua.** *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 18 n.4 - Out/Dez 2013, 137-156.

RUIZ-SINOGA, J. D.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; GABARRÓN-GALEOTE, M. A.; GARCÍA-MARÍN, L.: **The effects of soil moisture variability on the vegetation pattern in Mediterranean abandoned fields (Southern Spain).** *Catena* 85 (2011) 1–11.

SÁ, M. A. C.; JUNIOR, J. D. G. S.; SANO, E. E.: **Calibração e validação de sensor dielétrico para estimativa de teor de água em solos de cerrado.** Boletim de pesquisa e desenvolvimento nº 223, EMBRAPA, 2008.

SANTOS, T. E. M.: **Dinâmica espacial e temporal da umidade do solo em bacia experimental do semiárido pernambucano.** Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

SILANS, A. M. B.; SILVA, F. M.; WERLANG, L. M.; GOLDFARB, M. C. **The role of soil and vegetation in the hydrology of a semi-arid basin: an experimental study in the**

northeast of Brazil. In: Hydrology: Science and Practice for the 21st Century, 2004. Londres, 2004. British Hydrological Society, v.2, p. 139-145, 2004.

SILVA, R. M.; SILVA, L. P.; SANTOS, C. A. G.: **Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto na modelagem dos Processos de vazão e de erosão na bacia do rio Guaraíra.** III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Aracaju/SE, 25 a 27 de outubro de 2006.

SULLIVAN, J.; MAIDMENT, D. R.: **Soil moisture mapping of drought in Texas. Final report for integrated drought information system.** Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin, 2012.

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.

TUCCI, C. E. M.: **Modelos Hidrológicos.** 2.ed.. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS: ABRH, 2005. 678p., il.

VACHAUD, G., PASSERAT DE SILANS, A., BALABANIS, P., VAUCLIN, M.: **Temporal stability of spatially measured soil water probability density function.** Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 822–828, 1985.

VEREECKEN, H., HUISMAN, J.A., BOGENA, H., VANDERBORGHT, J., VRUGT, J.A., HOPMANS, J.W.: **On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review.** Water Resour. Res. 44, 2008.

VEREECKEN, H.; HUISMAN, J. A.; PACHEPSKY, Y.; MONTZKA, C.; VAN DER KRUK, J.; BOGENA, H.; WEIHERMÜLLER, L.; HERBST, M.; MARTINEZ, G.; VANDERBORGHT, J.: **On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale.** Journal of Hydrology, 516, 76-96, 2014.

VIENKEN, T.; REBOULET, E.; LEVEN, C.; KRECK, M.; ZSCHORNACK, L.; DIETRICH, P.: **Field comparison of selected methods for vertical soil water content profiling.** Journal of Hydrology, 501, 205-212, 2013.

WHITEHEAD, P. G.; ROBINSON, M.: **Experimental basin studies: An international and historical perspective of forest impacts.** Journal of Hydrology, 145, 217-230, 1993.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE GRANULOMETRIA

Tabela 11 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 01

Estação 1 - Amostra 1					Tipo	massa (g)	%		
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido							
		massa (g)	%	% acum.	% passa				
n 16	1,200	15,87	1,59%	1,59%	98,41%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 30	0,600	138,93	13,89%	15,48%	84,52%				
n 40	0,420	254,23	25,42%	40,90%	59,10%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	409,03	40,90%	
n 50	0,300	258,73	25,87%	66,78%	33,22%				
n 100	0,150	255,22	25,52%	92,30%	7,70%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	564,81	56,48%	
n 200	0,074	50,86	5,09%	97,38%	2,62%				

Tabela 12 - Granulometria da amostra 2 do solo da estação 01

Estação 1 - Amostra 2					Tipo	massa (g)	%		
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido							
		massa (g)	%	% acum.	% passa				
n 16	1,200	19,02	1,90%	1,90%	98,10%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	422,94	42,29%	
n 30	0,600	155,95	15,60%	17,50%	82,50%				
n 40	0,420	247,97	24,80%	42,29%	57,71%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	562,14	56,21%	
n 50	0,300	269,71	26,97%	69,27%	30,74%				
n 100	0,150	249,88	24,99%	94,25%	5,75%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	14,92	1,49%	
n 200	0,074	42,55	4,26%	98,51%	1,49%				

Tabela 13 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 02

Estação 2 - Amostra 1					Tipo	massa (g)	%		
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido							
		massa (g)	%	% acum.	% passa				
n 16	1,200	13,00	1,30%	1,30%	98,70%	Areia grossa (2,000 a 0,420mm)	513,62	51,36%	
n 30	0,600	200,57	20,06%	21,36%	78,64%				
n 40	0,420	300,05	30,01%	51,36%	48,64%	Areia fina (0,420 a 0,074mm)	464,65	46,47%	
n 50	0,300	258,55	25,86%	77,22%	22,78%				
n 100	0,150	171,45	17,15%	94,36%	5,64%	Silte+Argila (No caso, apenas silte - < 0,074mm)	21,73	2,17%	
n 200	0,074	34,65	3,47%	97,83%	2,17%				

Tabela 14 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 02

Estação 2 - Amostra 2						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido			% passa			
		massa (g)	%	% acum.	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 16	1,200	15,42	1,54%	1,54%				98,46%
n 30	0,600	189,89	18,99%	20,53%				79,47%
n 40	0,420	286,95	28,70%	49,23%				50,77%
n 50	0,300	252,06	25,21%	74,43%				25,57%
n 100	0,150	206,35	20,64%	95,07%				4,93%
n 200	0,074	39,37	3,94%	99,00%				1,00%

Tabela 15 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 03

Estação 3 - Amostra 1						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido			% passa			
		massa (g)	%	% acum.	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 16	1,200	7,11	0,71%	0,71%				99,29%
n 30	0,600	256,04	25,60%	26,32%				73,69%
n 40	0,420	418,25	41,83%	68,14%				31,86%
n 50	0,300	191,39	19,14%	87,28%				12,72%
n 100	0,150	89,68	8,97%	96,25%				3,75%
n 200	0,074	23,56	2,36%	98,60%				1,40%

Tabela 16 – Granulometria da amostra 2 da estação 03

Estação 3 - Amostra 2						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido			% passa			
		massa (g)	%	% acum.	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 16	1,200	8,61	0,86%	0,86%				99,14%
n 30	0,600	335,05	33,51%	34,37%				65,63%
n 40	0,420	366,76	36,68%	71,04%				28,96%
n 50	0,300	177,84	17,78%	88,83%				11,17%
n 100	0,150	87,81	8,78%	97,61%				2,39%
n 200	0,074	18,35	1,84%	99,44%				0,56%

Tabela 17 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 04

Estação 4 - Amostra 1						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	13,26	1,33%	1,33%	98,67%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	102,12	10,21%	11,54%	88,46%			
n 40	0,420	345,93	34,59%	46,13%	53,87%			
n 50	0,300	277,30	27,73%	73,86%	26,14%			
n 100	0,150	206,45	20,65%	94,51%	5,49%			
n 200	0,074	35,97	3,60%	98,10%	1,90%			

Tabela 18 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 04

Estação 4 - Amostra 2						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	10,35	1,04%	1,04%	98,97%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	212,40	21,24%	22,28%	77,73%			
n 40	0,420	321,40	32,14%	54,42%	45,59%			
n 50	0,300	257,30	25,73%	80,15%	19,86%			
n 100	0,150	163,20	16,32%	96,47%	3,54%			
n 200	0,074	26,83	2,68%	99,15%	0,85%			

Tabela 19 – Granulometria da amostra 1 do solo da estação 05

Estação 5 - Amostra 1						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido						
		massa (g)	%	% acum.	% passa			
n 16	1,200	21,18	2,12%	2,12%	97,88%	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%
n 30	0,600	142,79	14,28%	16,40%	83,60%			
n 40	0,420	231,46	23,15%	39,54%	60,46%			
n 50	0,300	244,76	24,48%	64,02%	35,98%			
n 100	0,150	265,70	26,57%	90,59%	9,41%			
n 200	0,074	63,02	6,30%	96,89%	3,11%			

Tabela 20 – Granulometria da amostra 2 do solo da estação 05

Estação 5 - Amostra 2						Tipo	massa (g)	%
Peneir a	Abertura (mm)	Material retido			% passa			
		massa (g)	%	% acum.	Pedregulho (acima de 2,000mm)	0,00	0,00%	
n 16	1,200	27,69	2,77%	2,77%				97,23%
n 30	0,600	147,04	14,70%	17,47%				82,53%
n 40	0,420	230,30	23,03%	40,50%				59,50%
n 50	0,300	230,89	23,09%	63,59%				36,41%
n 100	0,150	283,07	28,31%	91,90%				8,10%
n 200	0,074	52,23	5,22%	97,12%				2,88%

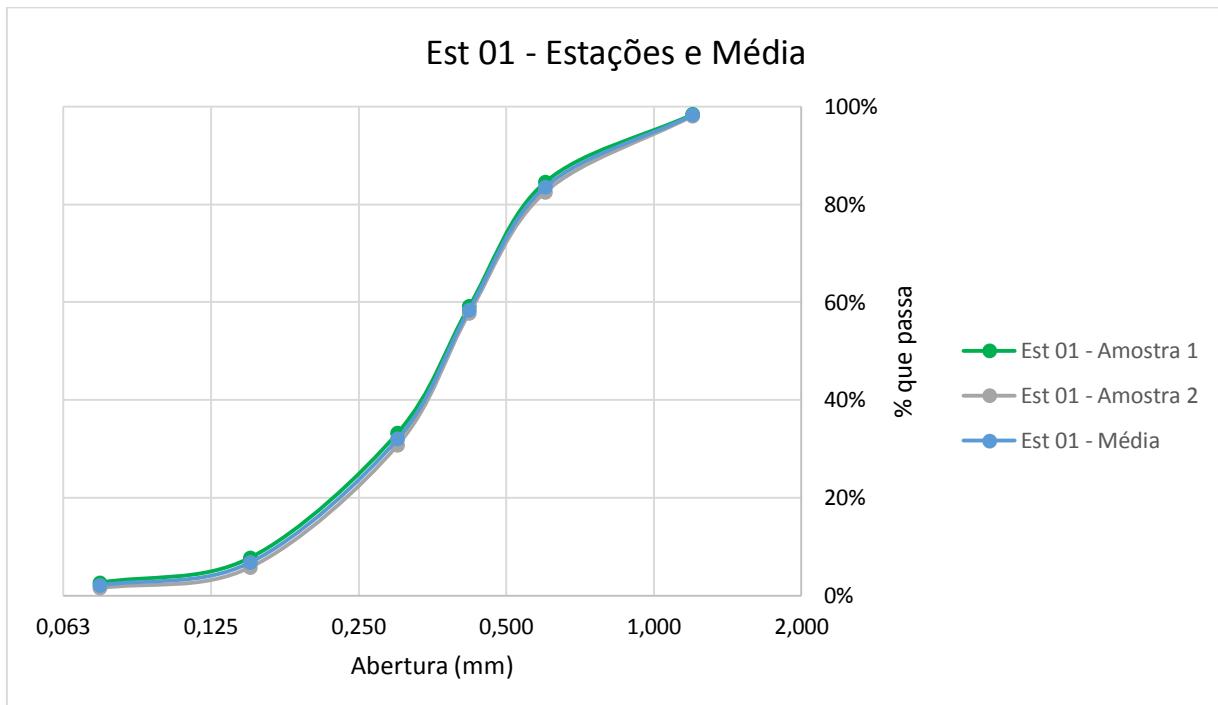


Figura 69 – Granulometria do solo da estação 01

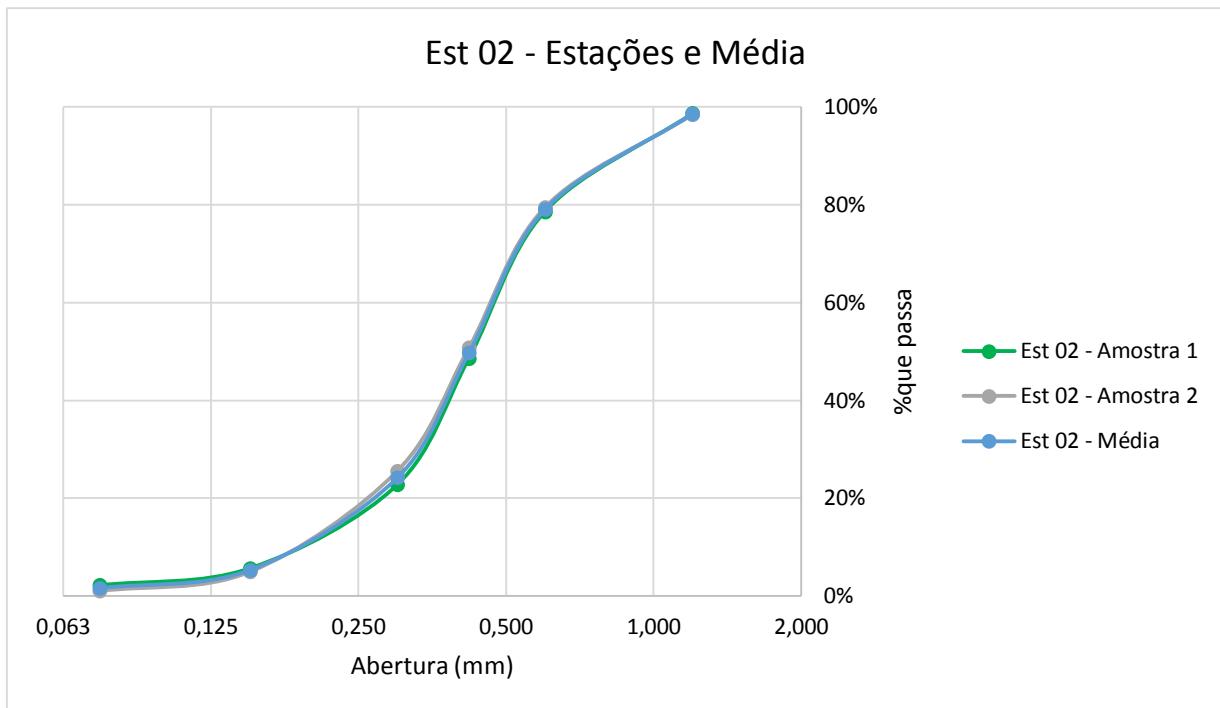


Figura 70 – Granulometria do solo da estação 02

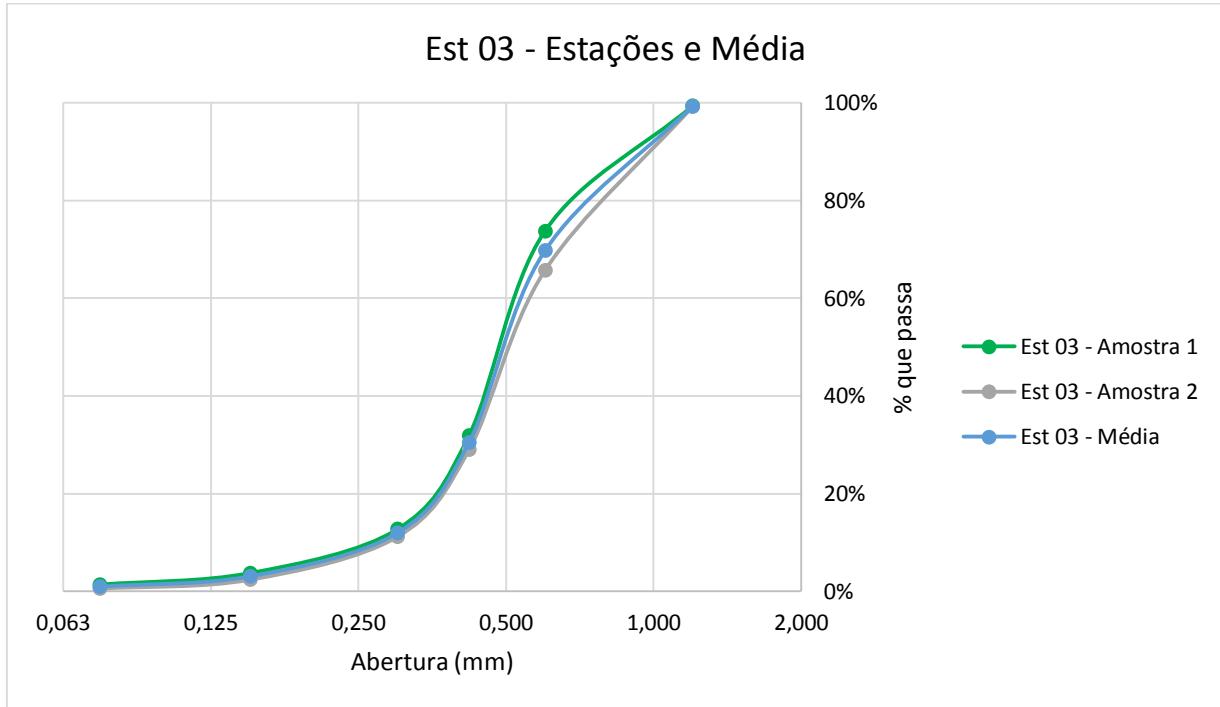


Figura 71 – Granulometria do solo da estação 03

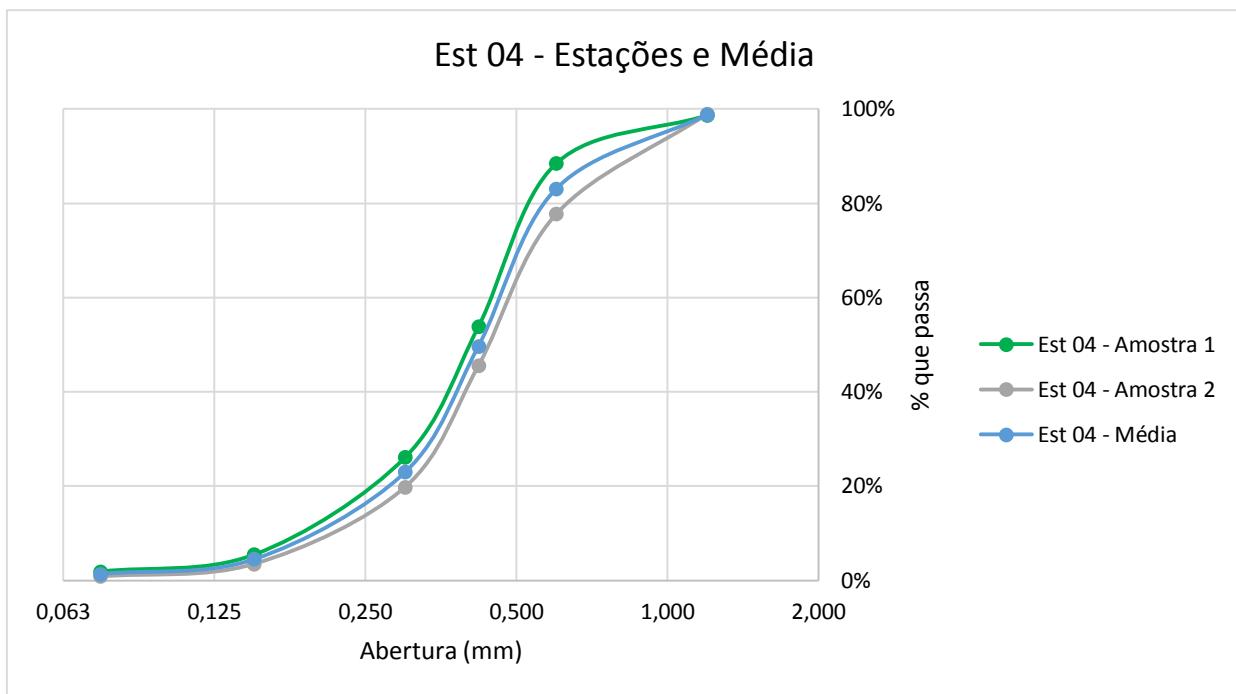


Figura 72 – Granulometria do solo da estação 04

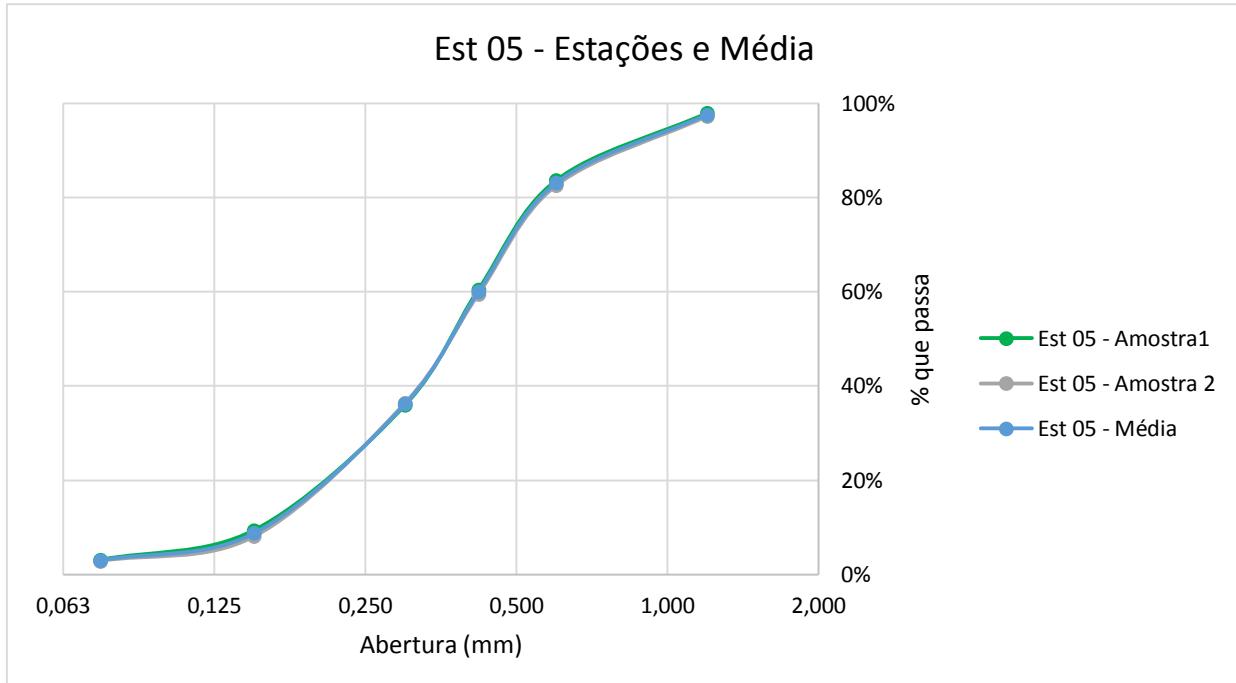


Figura 73 – Granulometria do solo da estação 05

APÊNDICE B – RESULTADOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO

Tabela 21 – Dados de umidade volumétrica do solo coletados manualmente

Estação	Prof. (cm)	Visitas (Umidade Volumétrica do solo em cm³/cm³)													
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª
PLUV 1	5	0,032	0,140	0,053	0,071	0,090	0,080	0,073	0,115	0,153	0,143	0,131	0,125	0,175	0,120
	15	0,025	0,049	0,049	0,019	0,049	0,078	0,103	0,086	0,092	0,121	0,170	0,120	0,089	0,112
	30	0,019	0,010	0,020	0,011	0,019	0,057	0,078	0,078	0,106	0,072	0,108	0,077	0,076	0,062
	50	0,027	0,032	0,015	0,013	0,011	0,040	0,079	0,060	0,074	0,048	0,087	0,051	0,062	0,063
PLUV 1	5	0,037	0,144	0,027	0,055	0,091	0,079	0,088	0,113	0,142	0,123	0,147	0,095	0,144	0,146
	15	0,023	0,045	0,047	0,022	0,012	0,044	0,112	0,083	0,102	0,116	0,133	0,107	0,070	0,108
	30	0,033	0,007	0,016	0,010	0,010	0,046	0,088	0,085	0,100	0,085	0,102	0,082	0,067	0,108
	50	0,030	0,013	0,017	0,009	0,008	0,039	0,068	0,070	0,071	0,087	0,067	0,067	0,059	0,064
PLUV 2	5	0,056	0,118	0,030	0,074	0,070	0,065	0,075	0,100	0,153	0,088	0,166	0,133	0,106	0,158
	15	0,044	0,097	0,038	0,037	0,043	0,050	0,063	0,078	0,090	0,062	0,170	0,178	0,051	0,102
	30	0,088	0,092	0,030	0,017	0,032	0,047	0,052	0,059	0,066	0,057	0,105	0,069	0,043	0,059
	50	0,167	0,069	0,052	0,031	0,076	0,043	0,051	0,056	0,066	0,075	0,098	0,067	0,062	0,054
PLUV 2	5	0,071	0,099	0,045	0,058	0,071	0,055	0,071	0,125	0,128	0,085	0,210	0,140	0,098	0,150
	15	0,103	0,063	0,029	0,011	0,032	0,045	0,056	0,068	0,079	0,066	0,197	0,085	0,067	0,082
	30	0,075	0,036	0,030	0,019	0,030	0,055	0,054	0,078	0,062	0,053	0,084	0,066	0,055	0,055
	50	0,155	0,064	0,034	0,025	0,028	0,051	0,062	0,061	0,059	0,062	0,107	0,063	0,072	0,055
PLUV 3	5	0,146	0,150	0,058	0,068	0,125	0,101	0,133	0,141	0,194	0,173	0,301	0,119	0,057	0,111
	15	0,137	0,097	0,029	0,033	0,083	0,060	0,025	0,083	0,159	0,116	0,194	0,112	0,079	0,074
	30	0,119	0,052	0,049	0,033	0,046	0,077	0,120	0,067	0,148	0,269	0,415	0,204	0,068	0,066
	50	0,357	0,178	0,090	0,052	0,101	0,296	0,374	0,137	0,380	0,345		0,373	0,192	0,205
PLUV 3	5	0,153	0,233	0,036	0,052	0,157	0,103	0,100	0,109	0,168	0,213	0,208	0,116	0,082	0,098
	15	0,155	0,087	0,049	0,052	0,107	0,055	0,078	0,076	0,131	0,130	0,209	0,102	0,094	0,070
	30	0,142	0,057	0,060	0,035	0,046	0,079	0,406	0,055	0,114	0,138	0,420	0,222	0,072	0,075
	50	0,374	0,161	0,112	0,075	0,083	0,316	0,129	0,160	0,375	0,345		0,366	0,291	0,177
PLUV 4	5	0,120	0,128	0,035	0,045	0,068	0,043	0,094	0,065	0,121	0,106	0,223	0,090	0,161	0,155
	15	0,092	0,073	0,036	0,018	0,018	0,038	0,072	0,052	0,089	0,096	0,363	0,197	0,104	0,072
	30	0,263	0,085	0,048	0,032	0,020	0,033	0,103	0,058	0,119	0,154	0,312	0,348	0,143	0,117
	50	0,392	0,281	0,129	0,066	0,030	0,073	0,216	0,095	0,343	0,343		0,355	0,333	0,325
PLUV 4	5	0,128	0,124	0,049	0,050	0,083	0,053	0,087	0,077	0,133	0,123	0,206	0,173	0,132	0,149
	15	0,101	0,073	0,038	0,020	0,017	0,035	0,062	0,055	0,091	0,105	0,360	0,197	0,081	0,075
	30	0,196	0,101	0,065	0,036	0,019	0,071	0,094	0,070	0,110	0,154	0,361	0,347	0,157	0,104
	50	0,348	0,293	0,154	0,056	0,043	0,046	0,310	0,075	0,336	0,362		0,333	0,341	0,341
CLIM 5	5	0,026	0,114	0,030	0,031	0,061	0,074	0,089	0,098	0,112	0,117	0,134	0,116	0,065	0,087
	15	0,035	0,036	0,051	0,021	0,043	0,083	0,097	0,106	0,117	0,107	0,132	0,088	0,084	0,099
	30	0,031	0,016	0,022	0,013	0,023	0,053	0,067	0,070	0,099	0,098	0,115	0,091	0,064	0,071
	50	0,034	0,015	0,015	0,009	0,008	0,047	0,064	0,070	0,066	0,084	0,076	0,059	0,053	0,060
CLIM 5	5	0,023	0,114	0,038	0,023	0,063	0,071	0,095	0,068	0,106	0,121	0,123	0,096	0,072	0,094
	15	0,030	0,102	0,039	0,025	0,053	0,092	0,076	0,094	0,111	0,096	0,125	0,105	0,087	0,091
	30	0,050	0,028	0,023	0,012	0,020	0,056	0,061	0,064	0,094	0,095	0,125	0,077	0,055	0,075
	50	0,032	0,015	0,015	0,010	0,037	0,051	0,062	0,067	0,075	0,087	0,072	0,063	0,059	0,062

Tabela 22 – Dados de massa específica aparente do solo

Estação	Prof. (cm)	Visitas (Massa específica Aparente do Solo em g/cm³)													
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª
PLUV 1	5	1,124	1,089	1,064	1,074	1,061	1,122	1,058	1,152	0,972	1,019	1,145	1,017	0,973	1,160
	15	1,319	1,038	1,254	1,185	1,329	1,222	1,117	1,169	1,149	1,007	1,052	1,032	1,280	1,086
	30	1,166	1,297	1,270	1,418	1,238	1,396	1,277	1,278	1,262	1,227	1,263	1,234	1,296	1,156
	50	1,346	1,491	1,419	1,411	1,450	1,350	1,295	1,268	1,347	1,391	1,410	1,387	1,391	1,228
PLUV 1	5	1,122	1,087	0,986	1,022	0,813	1,081	0,842	0,939	1,089	1,206	1,067	0,816	1,058	1,262
	15	1,284	1,192	1,161	1,264	1,317	1,236	1,109	1,153	1,016	1,000	1,071	0,980	1,081	1,185
	30	1,211	1,346	1,353	1,429	1,372	1,331	1,400	1,315	1,177	1,347	1,311	1,277	1,334	1,311
	50	1,418	1,348	1,347	1,458	1,363	1,393	1,363	1,328	1,386	1,413	1,263	1,399	1,421	1,434
PLUV 2	5	1,295	1,207	1,290	1,290	1,269	1,241	1,175	1,227	0,923	1,200	0,864	1,073	1,065	0,944
	15	1,066	1,210	1,258	1,313	1,296	1,316	1,430	1,357	1,232	1,278	1,026	1,008	1,244	0,956
	30	1,298	1,318	1,251	1,315	1,358	1,278	1,242	1,264	1,266	1,278	1,189	1,269	1,351	1,338
	50	1,358	1,322	1,372	1,442	1,412	1,359	1,172	1,320	1,265	1,330	1,369	1,315	1,288	1,332
PLUV 2	5	0,606	1,107	1,267	0,952	1,144	1,263	1,189	0,922	1,010	1,037	0,862	0,941	0,888	0,994
	15	1,168	1,309	1,306	1,360	1,321	1,326	1,320	1,231	1,094	1,276	0,885	1,016	1,230	1,257
	30	1,298	1,307	1,407	1,392	1,296	1,295	1,226	1,154	1,283	1,303	1,279	1,316	1,322	1,355
	50	1,256	1,351	1,338	1,288	1,415	1,208	1,290	1,353	1,290	1,307	1,391	1,283	1,324	1,418
PLUV 3	5	0,850	0,879	1,100	1,180	0,681	1,048	1,012	1,066	0,940	1,061	0,747	1,124	1,151	1,037
	15	1,209	1,022	1,081	1,231	1,124	1,231	1,268	1,263	1,113	1,022	1,112	1,127	1,223	1,247
	30	1,269	1,394	1,446	1,362	1,318	1,286	1,281	1,277	1,374	1,411	1,540	1,358	1,284	1,343
	50	1,553	1,387	1,408	1,276	1,285	1,339	1,483	1,243	1,529	1,566		1,596	1,394	1,379
PLUV 3	5	1,143	0,967	1,186	0,910	0,923	1,172	1,203	1,022	0,929	0,928	1,022	1,216	1,112	1,099
	15	1,297	1,142	1,082	1,120	1,055	1,331	1,165	1,061	1,313	1,073	1,139	1,290	1,134	1,217
	30	1,426	1,264	1,369	1,340	1,250	1,350	1,501	1,244	1,238	1,323	1,549	1,306	1,289	1,379
	50	1,509	1,378	1,236	1,352	1,278	1,408	1,355	1,270	1,588	1,581		1,550	1,383	1,404
PLUV 4	5	1,053	1,290	1,314	0,879	0,699	1,315	1,297	1,186	1,170	1,097	1,269	1,227	1,035	1,243
	15	1,363	1,351	1,363	1,240	1,275	1,381	1,261	1,266	1,256	1,258	1,484	1,349	1,234	1,346
	30	1,439	1,397	1,358	1,363	1,297	1,436	1,395	1,219	1,355	1,406	1,606	1,515	1,376	1,390
	50	1,671	1,467	1,400	1,468	1,349	1,389	1,294	1,326	1,620	1,592		1,565	1,586	1,576
PLUV 4	5	1,202	1,309	1,298	1,075	1,076	1,285	1,279	1,258	1,197	1,154	1,227	1,249	1,167	1,160
	15	1,438	1,363	1,385	1,409	1,248	1,314	1,332	1,270	1,316	1,256	1,480	1,327	1,352	1,224
	30	1,443	1,395	1,381	1,341	1,381	1,354	1,301	1,351	1,345	1,395	1,565	1,520	1,405	1,385
	50	1,613	1,466	1,395	1,422	1,318	1,344	1,486	1,182	1,556	1,561		1,574	1,589	1,540
CLIM 5	5	1,247	1,211	1,236	1,421	1,183	1,437	1,304	1,311	1,331	1,330	1,229	1,276	1,155	1,361
	15	1,205	1,282	1,222	1,296	1,301	1,358	1,299	1,322	1,217	1,283	1,426	1,329	1,326	1,377
	30	1,330	1,282	1,327	1,417	1,285	1,371	1,431	1,278	1,220	1,430	1,434	1,310	1,355	1,391
	50	1,496	1,500	1,388	1,432	1,423	1,440	1,312	1,322	1,300	1,414	1,397	1,349	1,386	1,386
CLIM 5	5	1,271	1,328	1,297	1,268	1,264	1,378	1,238	1,255	1,363	1,309	1,353	1,229	1,272	1,403
	15	1,315	1,359	1,220	1,270	1,273	1,123	1,137	1,327	1,259	1,363	1,426	1,290	1,387	1,341
	30	1,143	1,250	1,406	1,440	1,404	1,305	1,332	1,345	1,259	1,361	1,342	1,397	1,396	1,348
	50	1,194	1,424	1,453	1,481	1,398	1,437	1,393	1,340	1,388	1,351	1,444	1,367	1,388	1,413

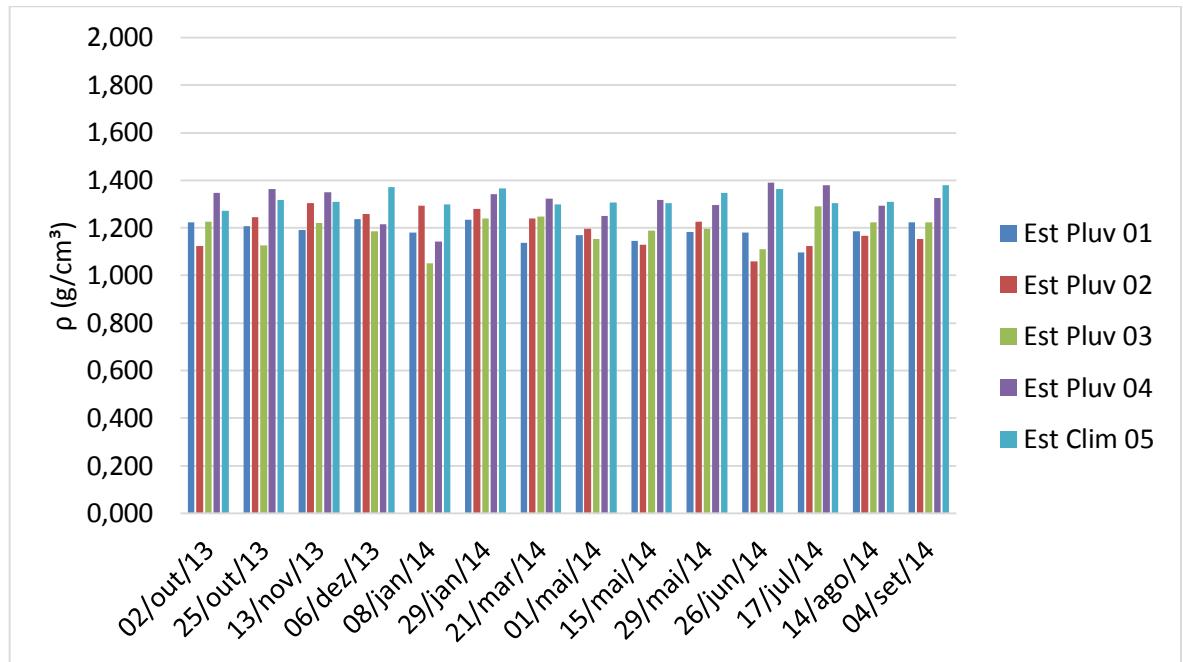


Figura 74 – Massa específica aparente do solo média por local de coleta

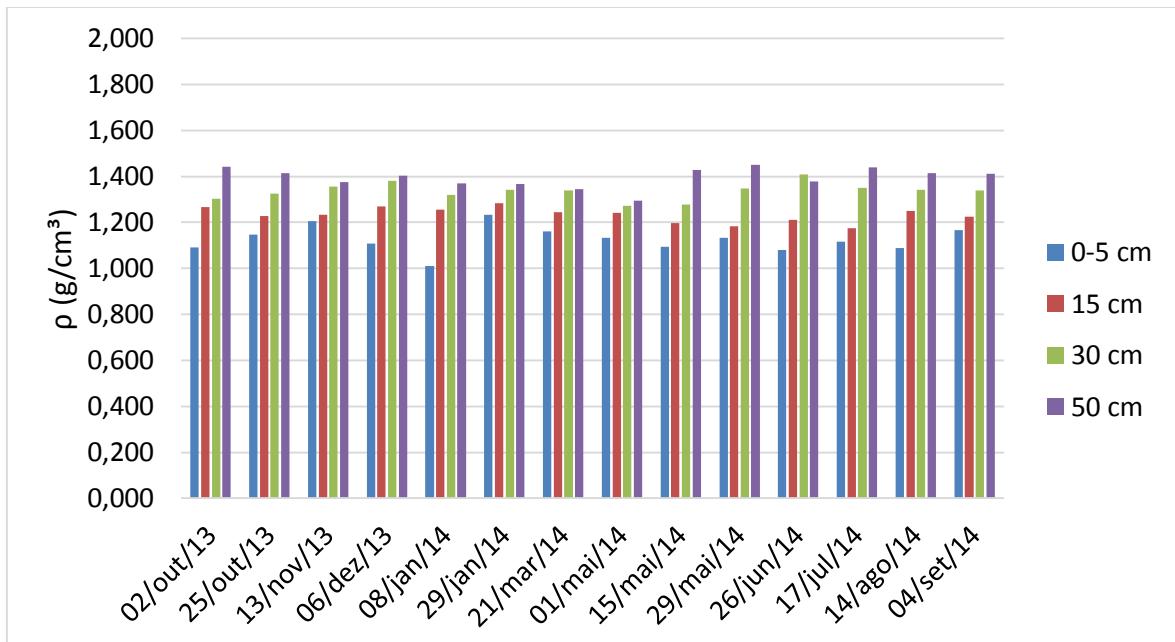


Figura 75 – Massa específica aparente do solo média por profundidade

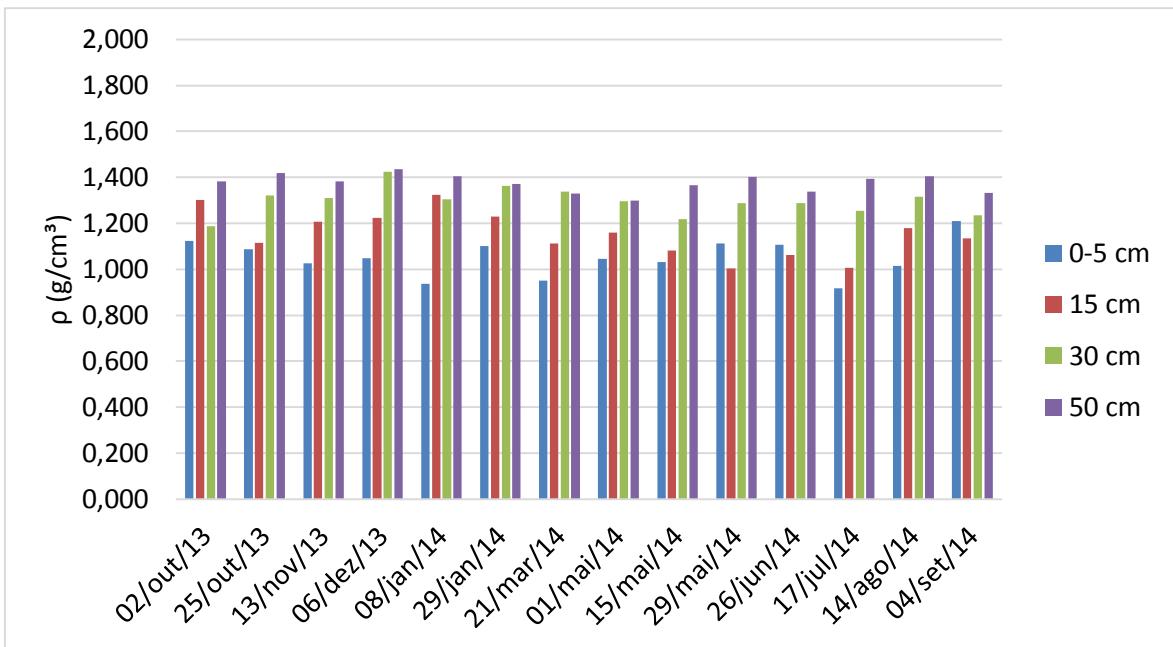


Figura 76 – Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 01

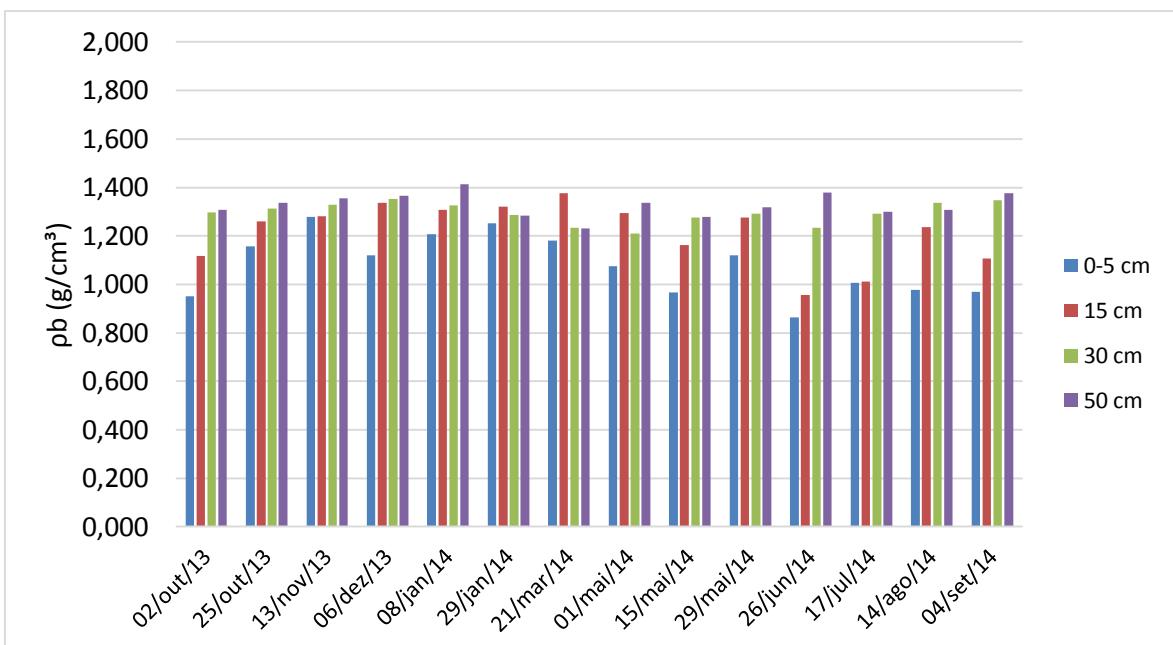


Figura 77 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 02

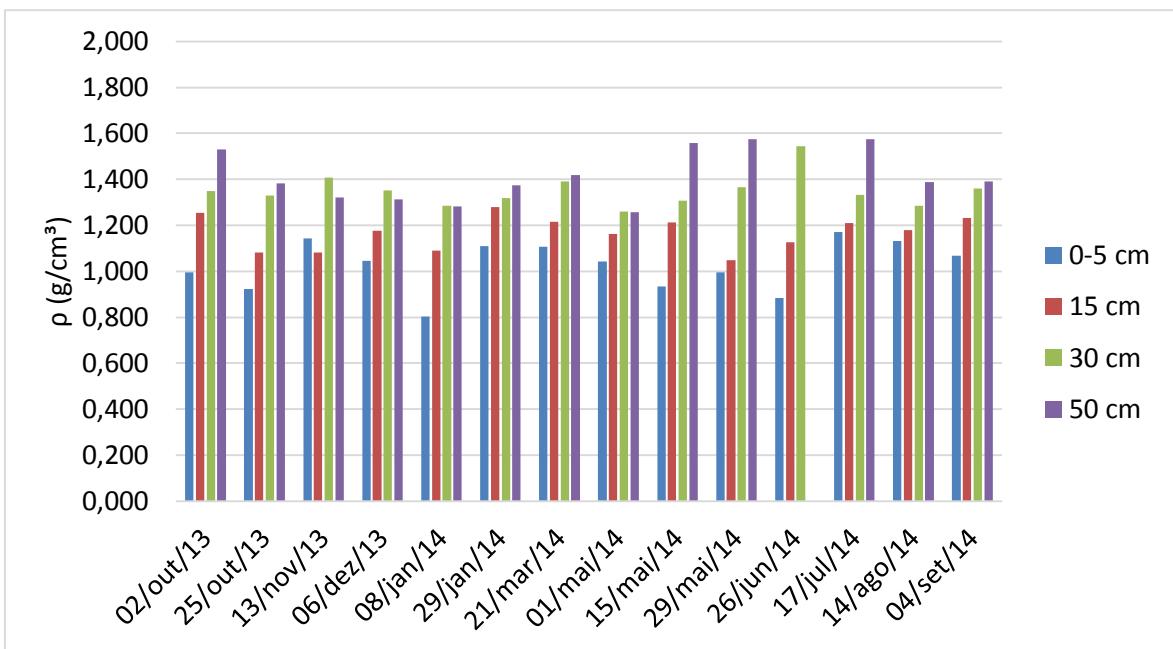


Figura 78 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 03

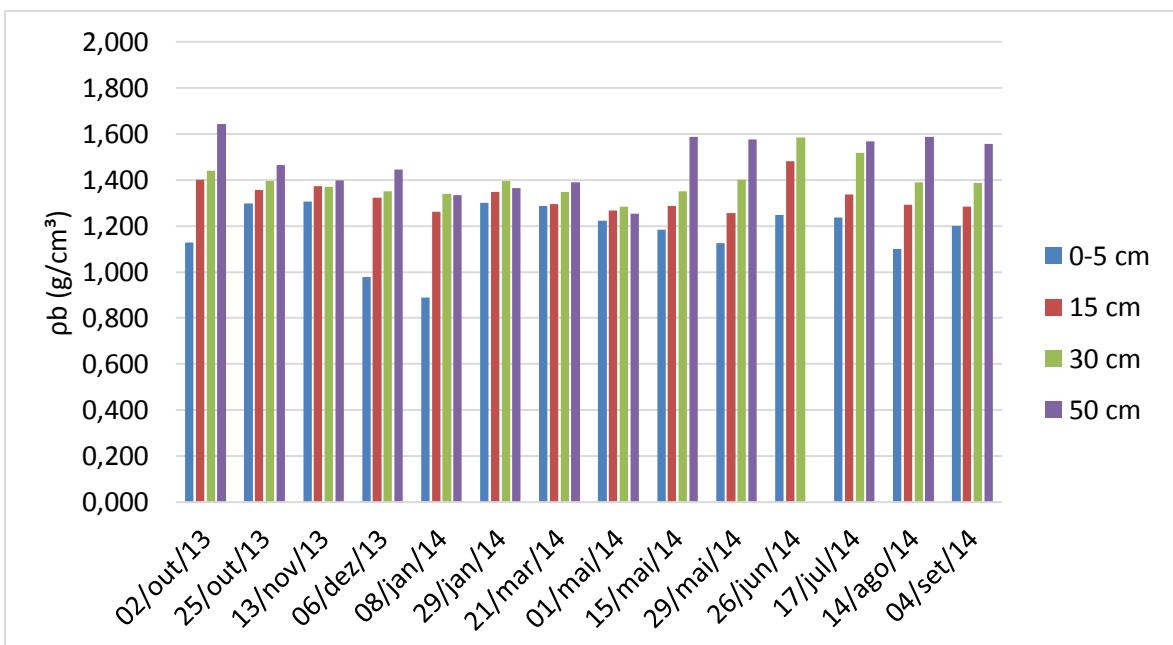


Figura 79 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 04

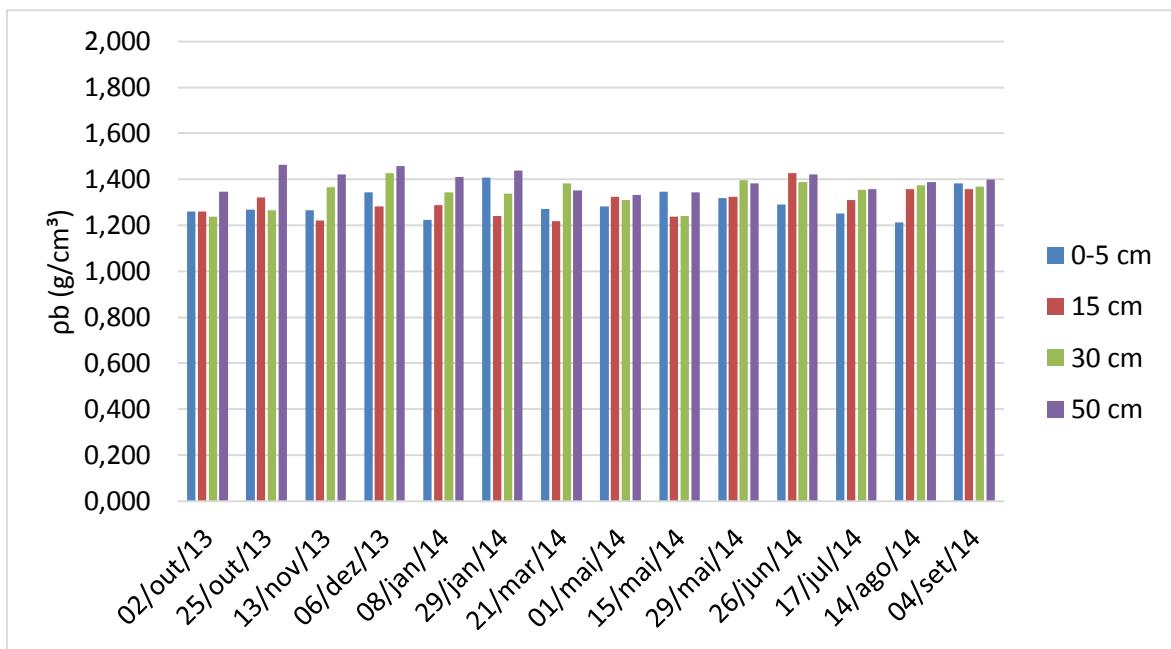


Figura 80 - Massa específica aparente do solo: Variação média por profundidade na Est. Pluv. 05

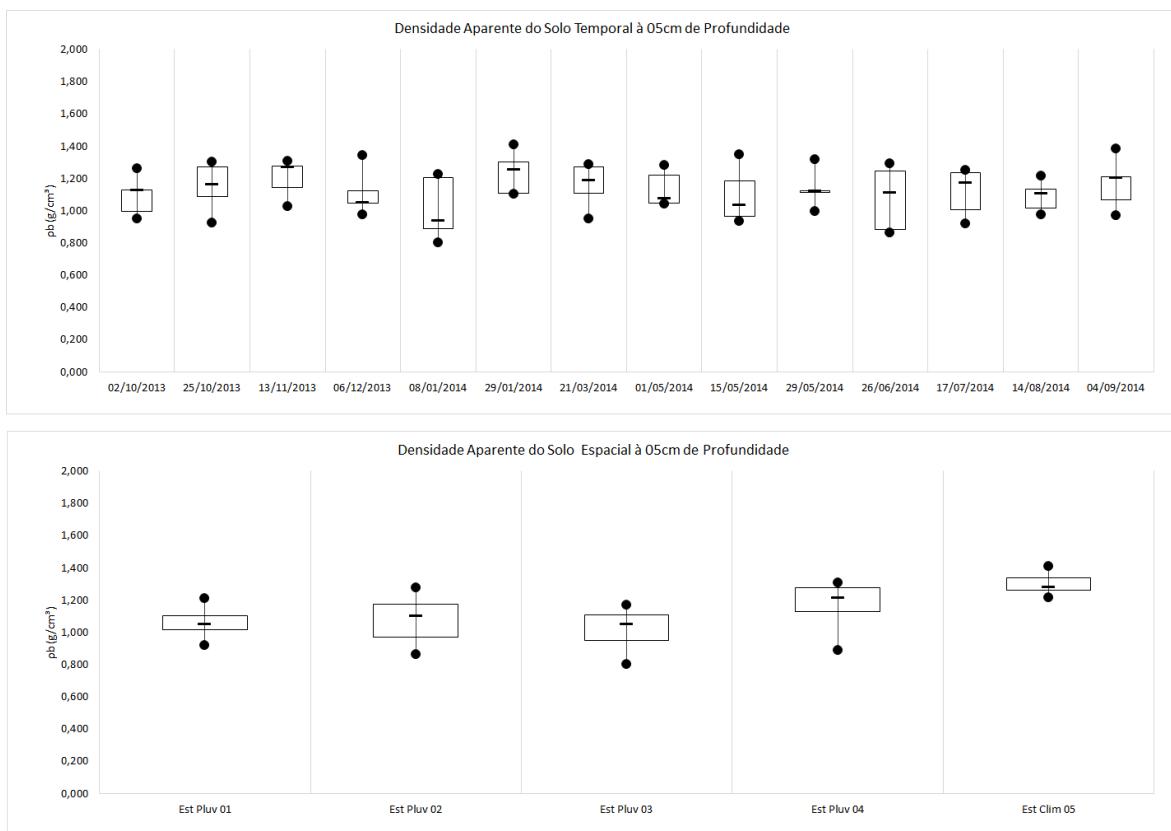


Figura 81 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 5cm de profundidade

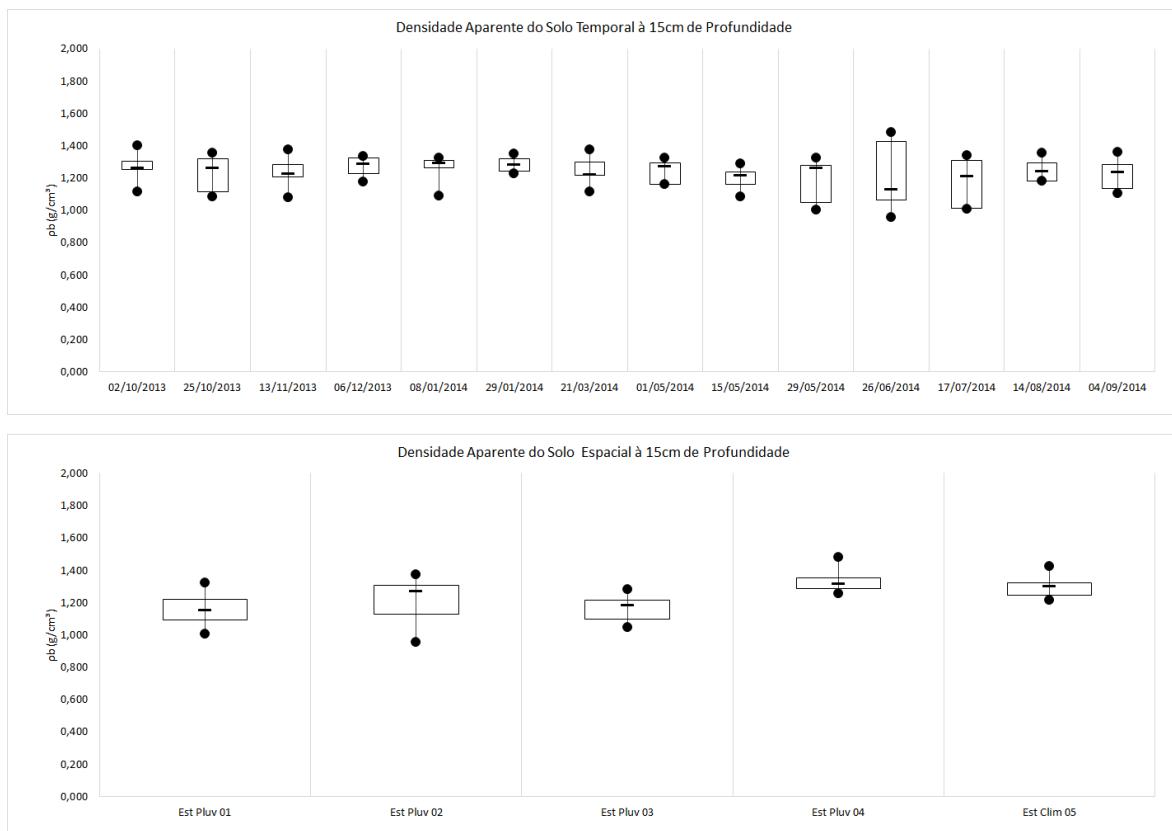


Figura 82 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 15cm de profundidade

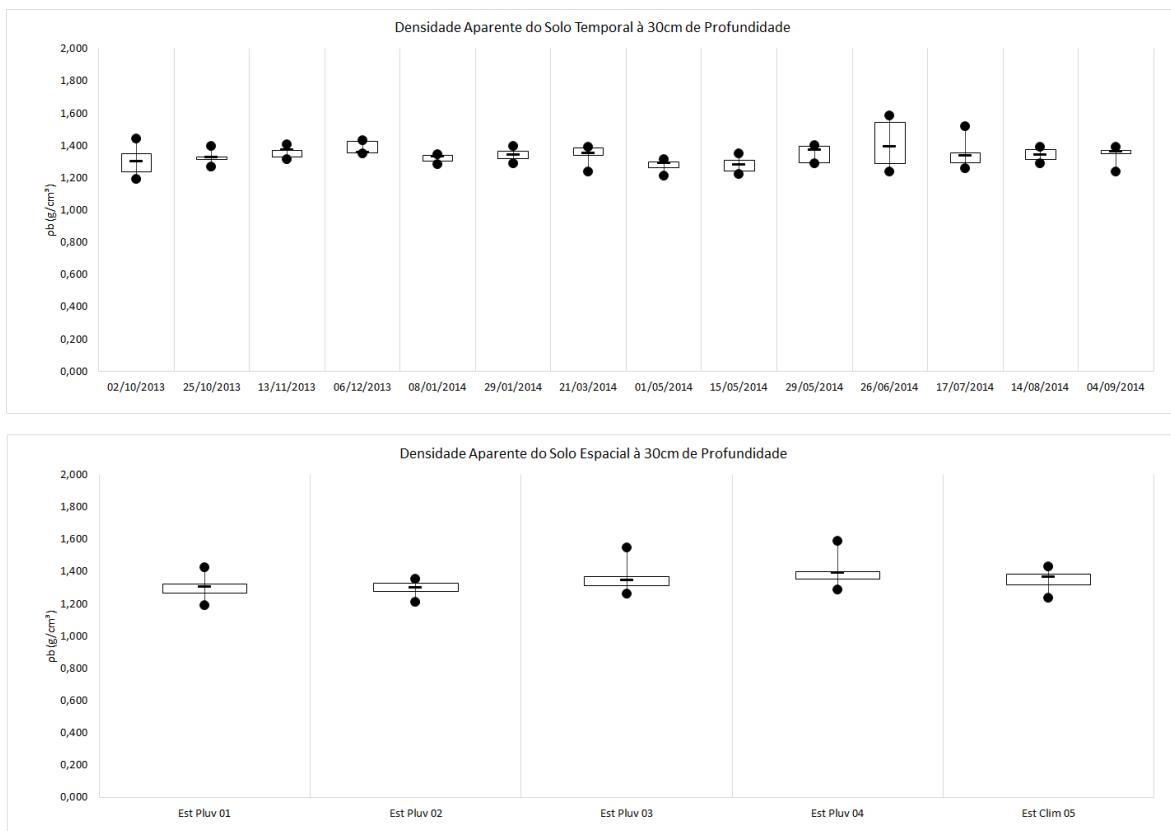


Figura 83 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 30cm de profundidade

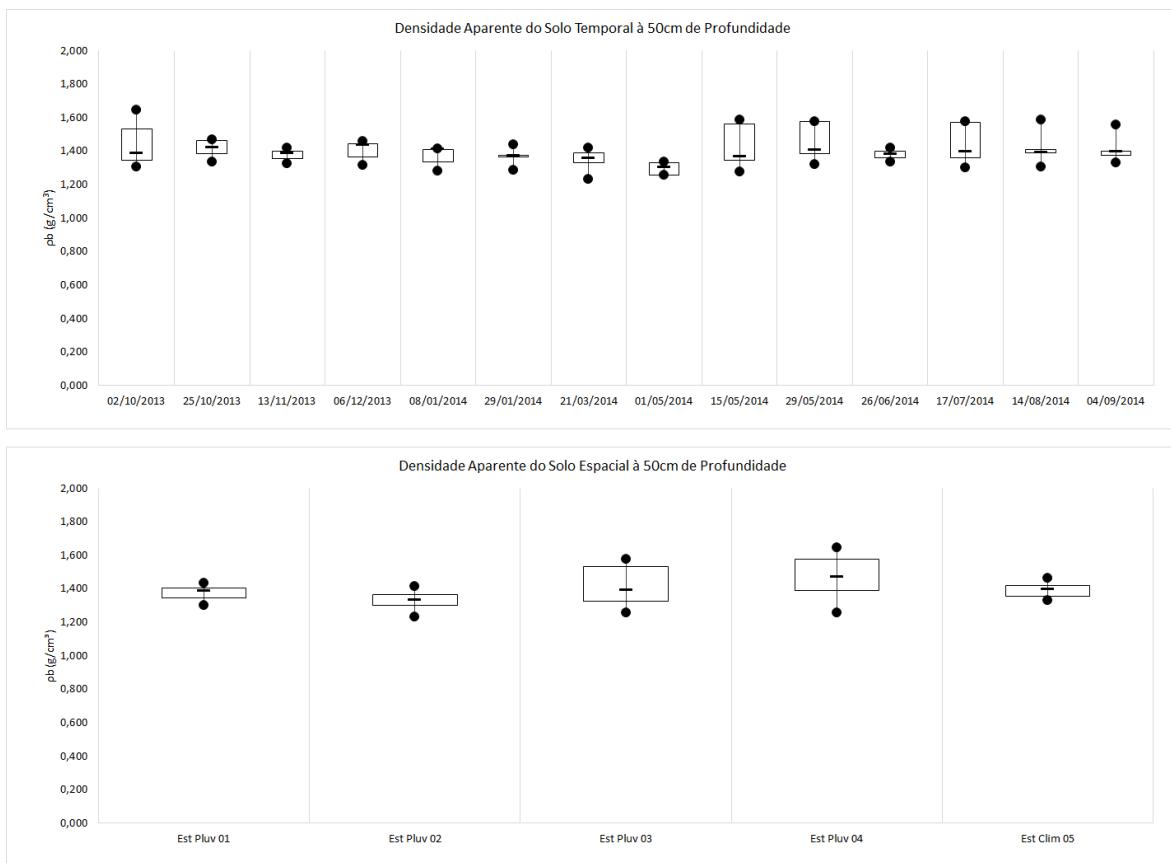


Figura 84 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal à 50cm de profundidade

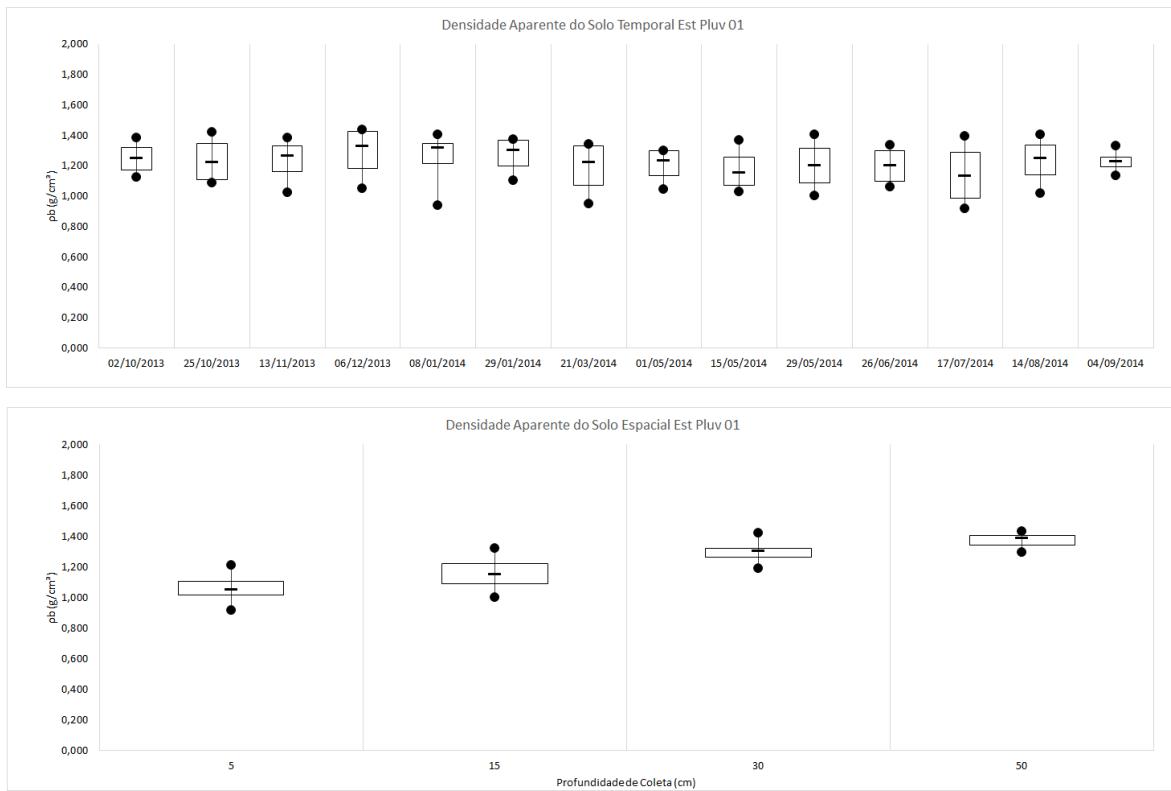


Figura 85 – Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 01

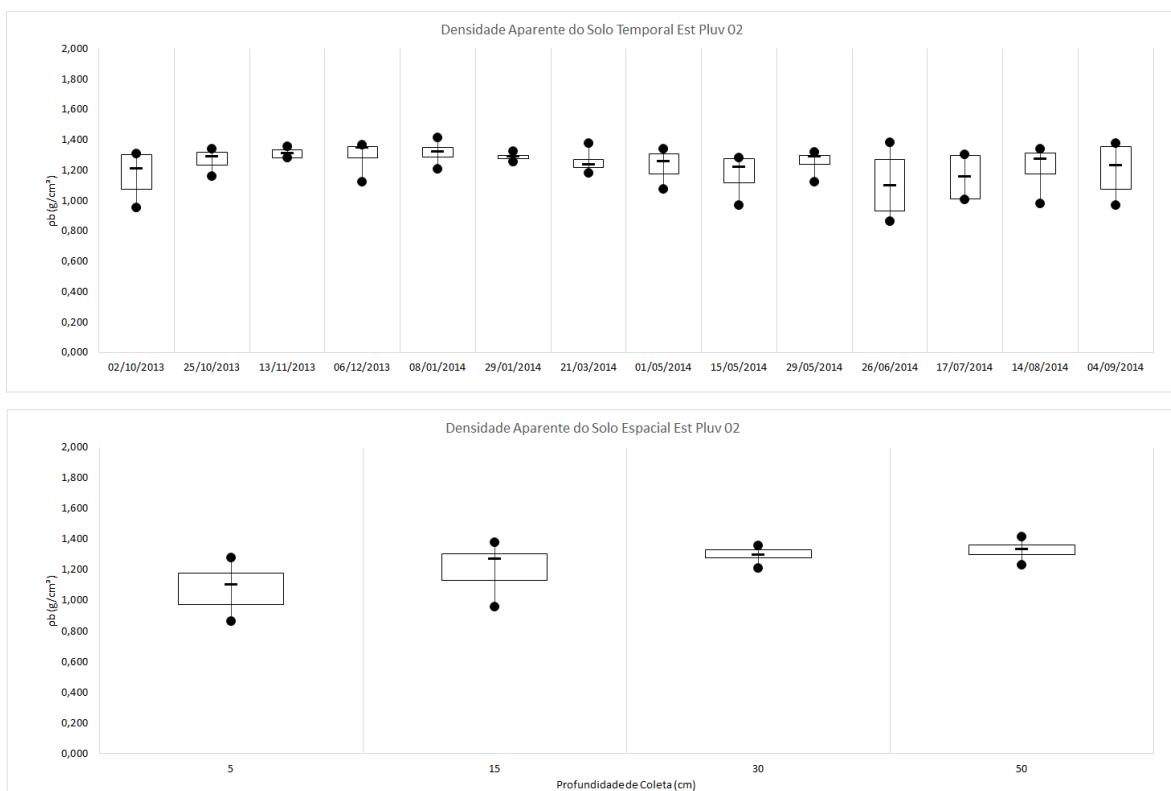


Figura 86 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 02

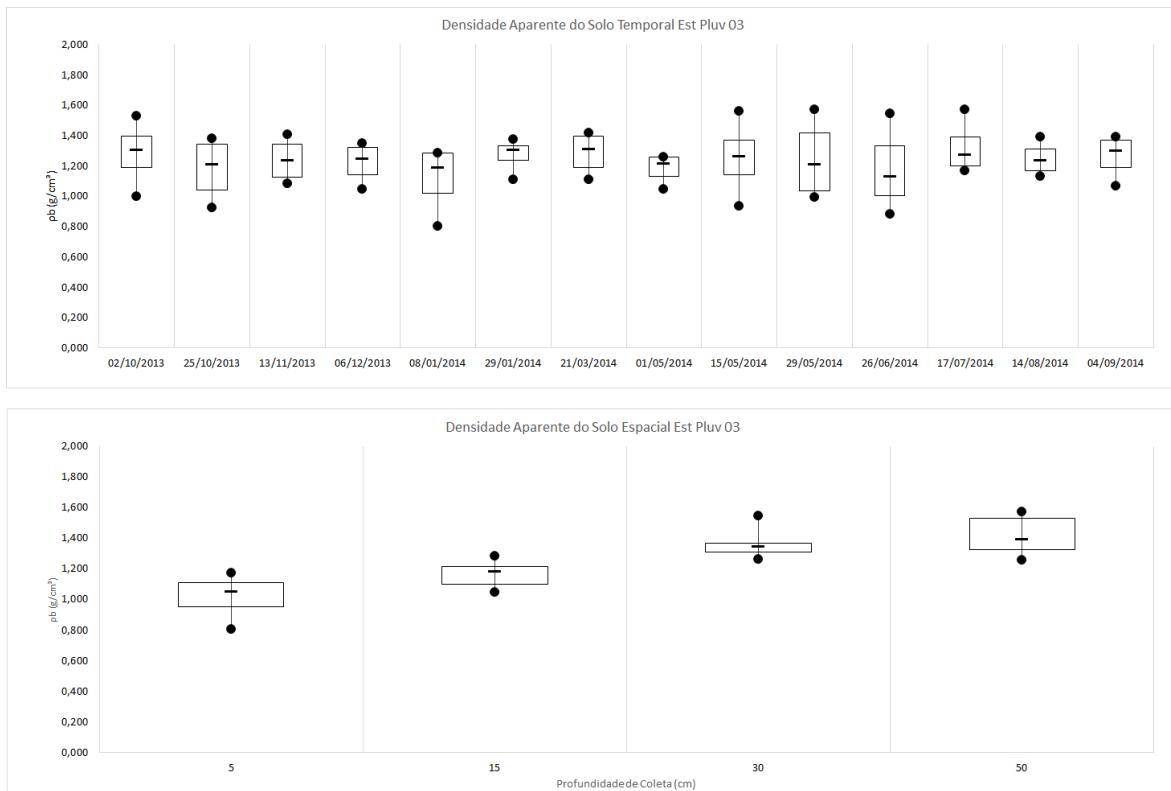


Figura 87 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 03

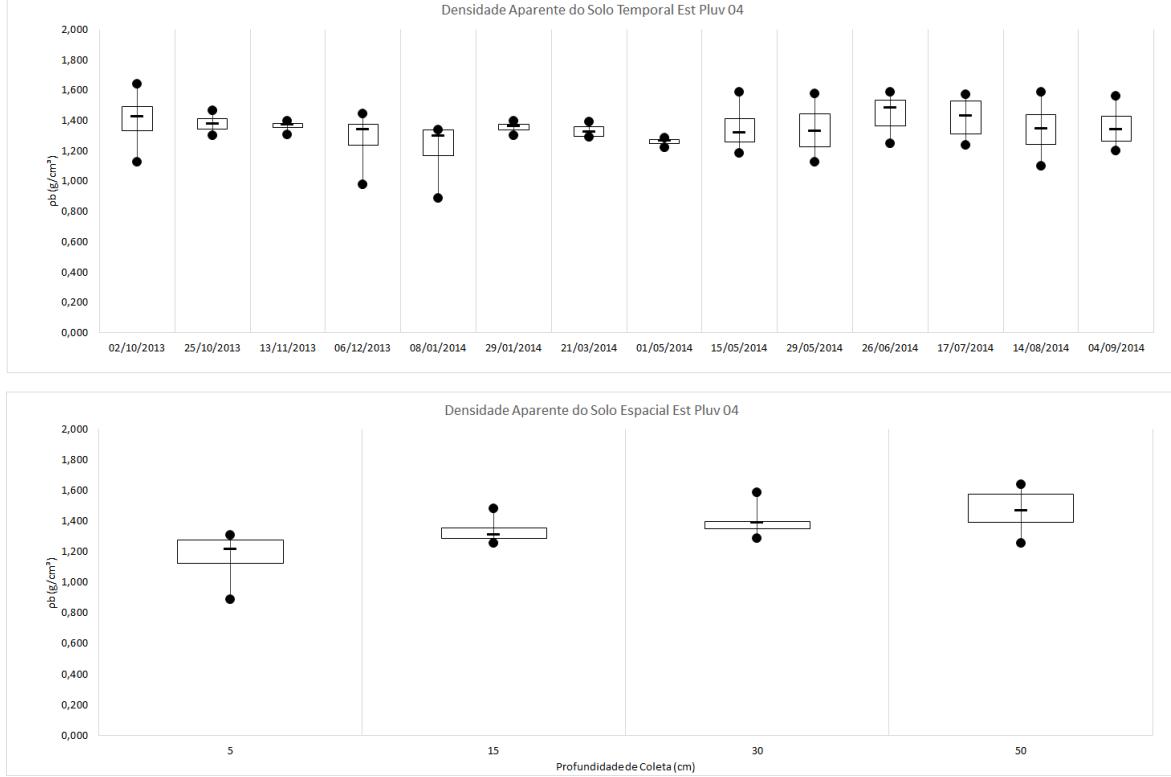


Figura 88 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 04

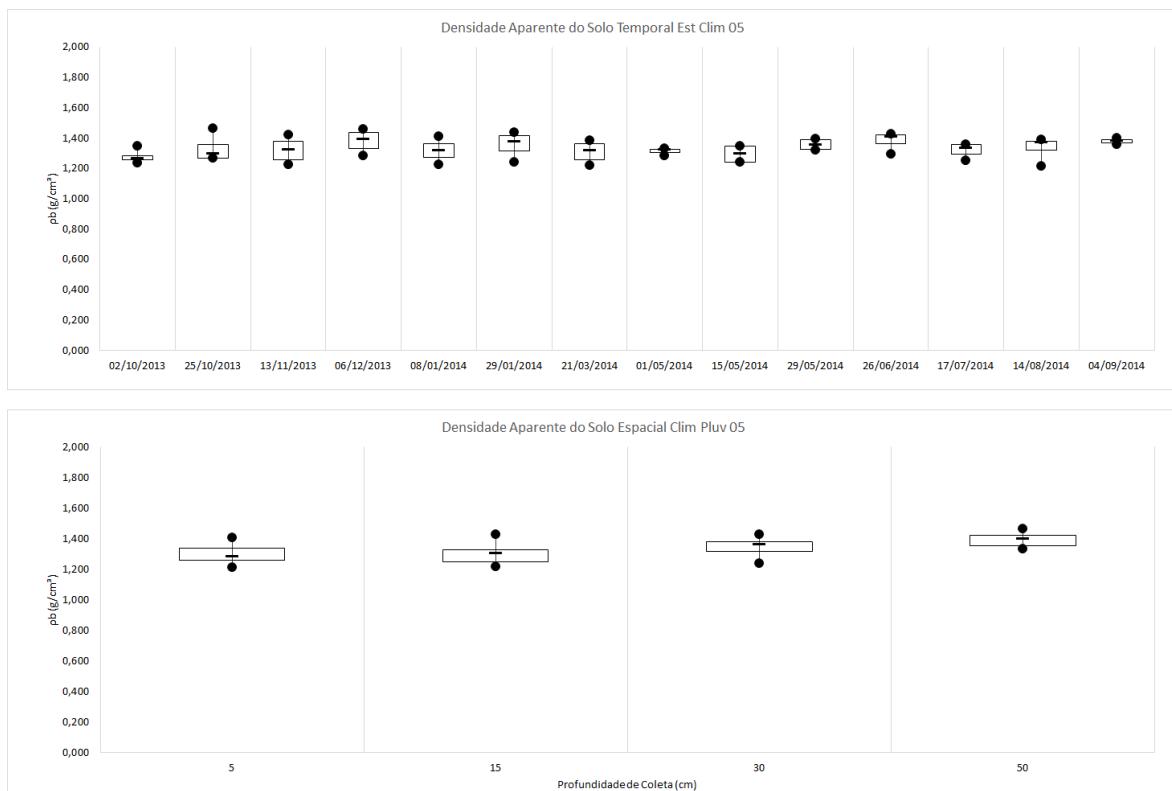


Figura 89 - Massa específica aparente do solo: variação espaço-temporal na Est. Pluv. 05

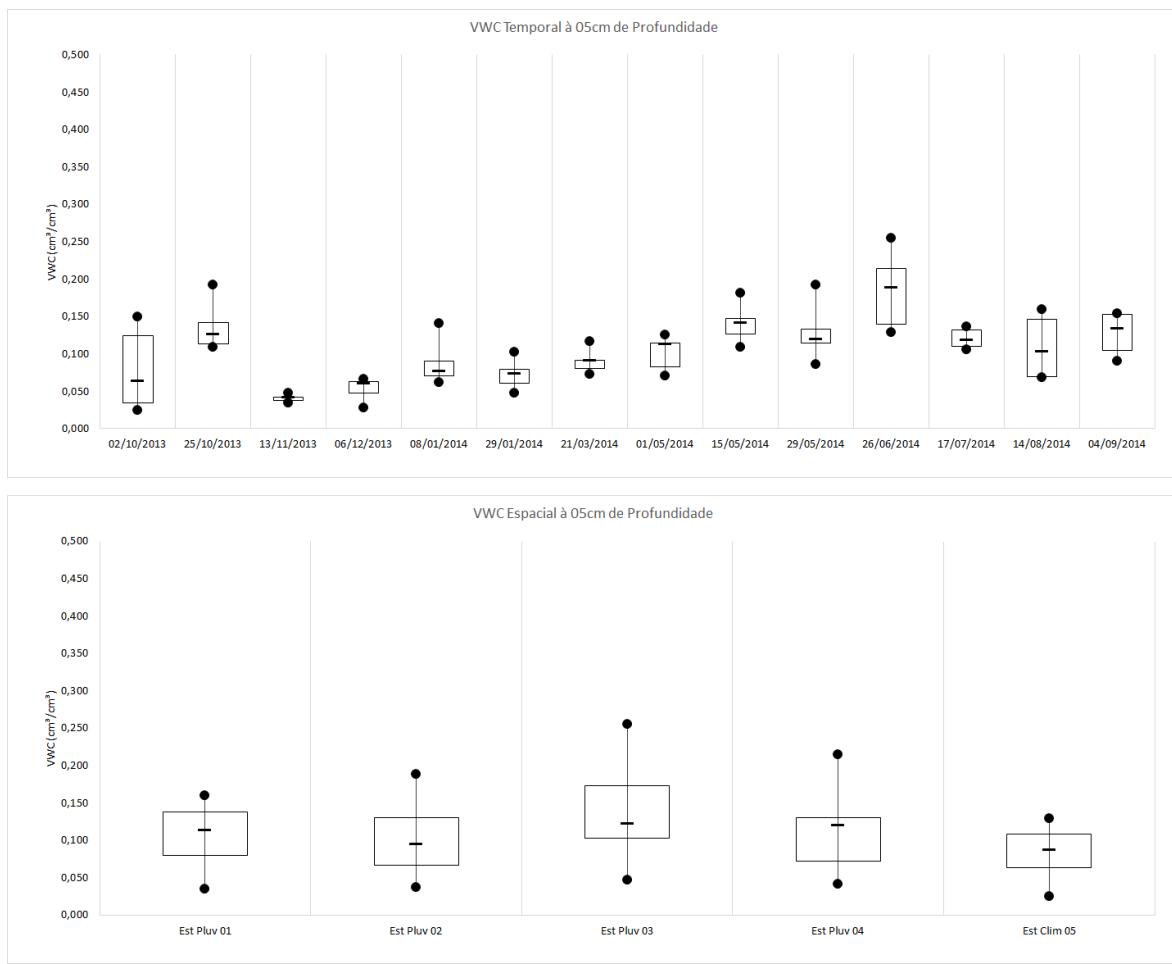


Figura 90 – VWC espaço-temporal à 5cm de profundidade

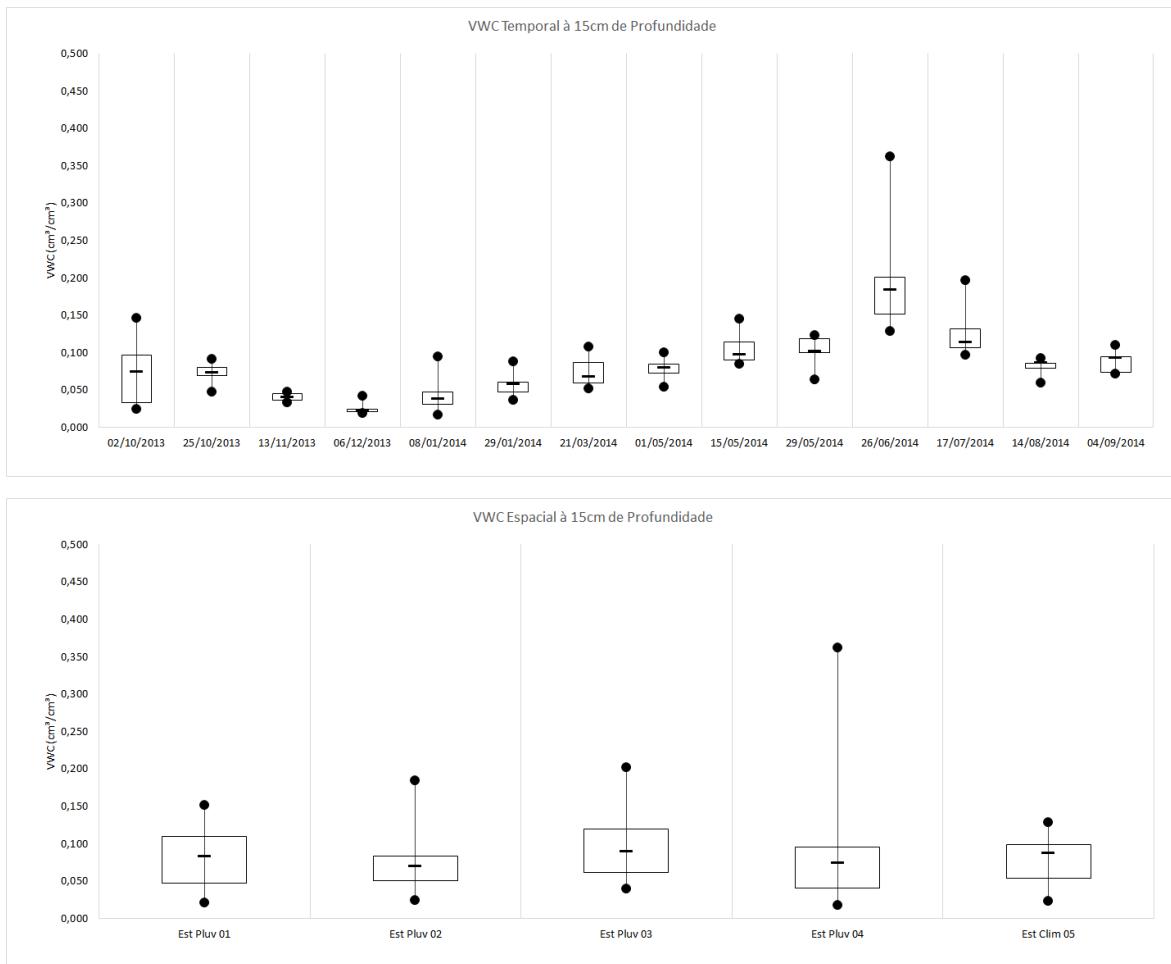


Figura 91 - VWC espaço-temporal à 15cm de profundidade

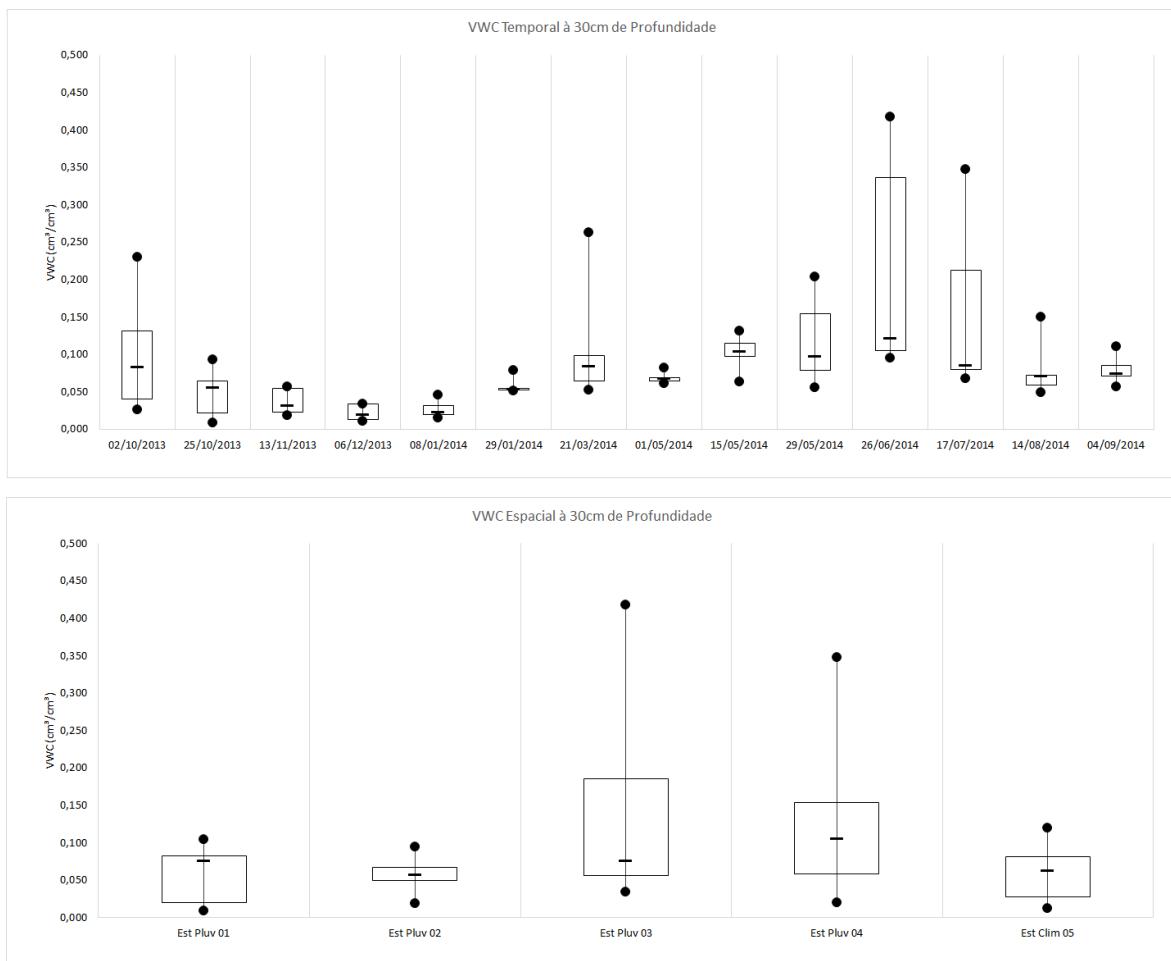


Figura 92 - VWC espaço-temporal à 30cm de profundidade

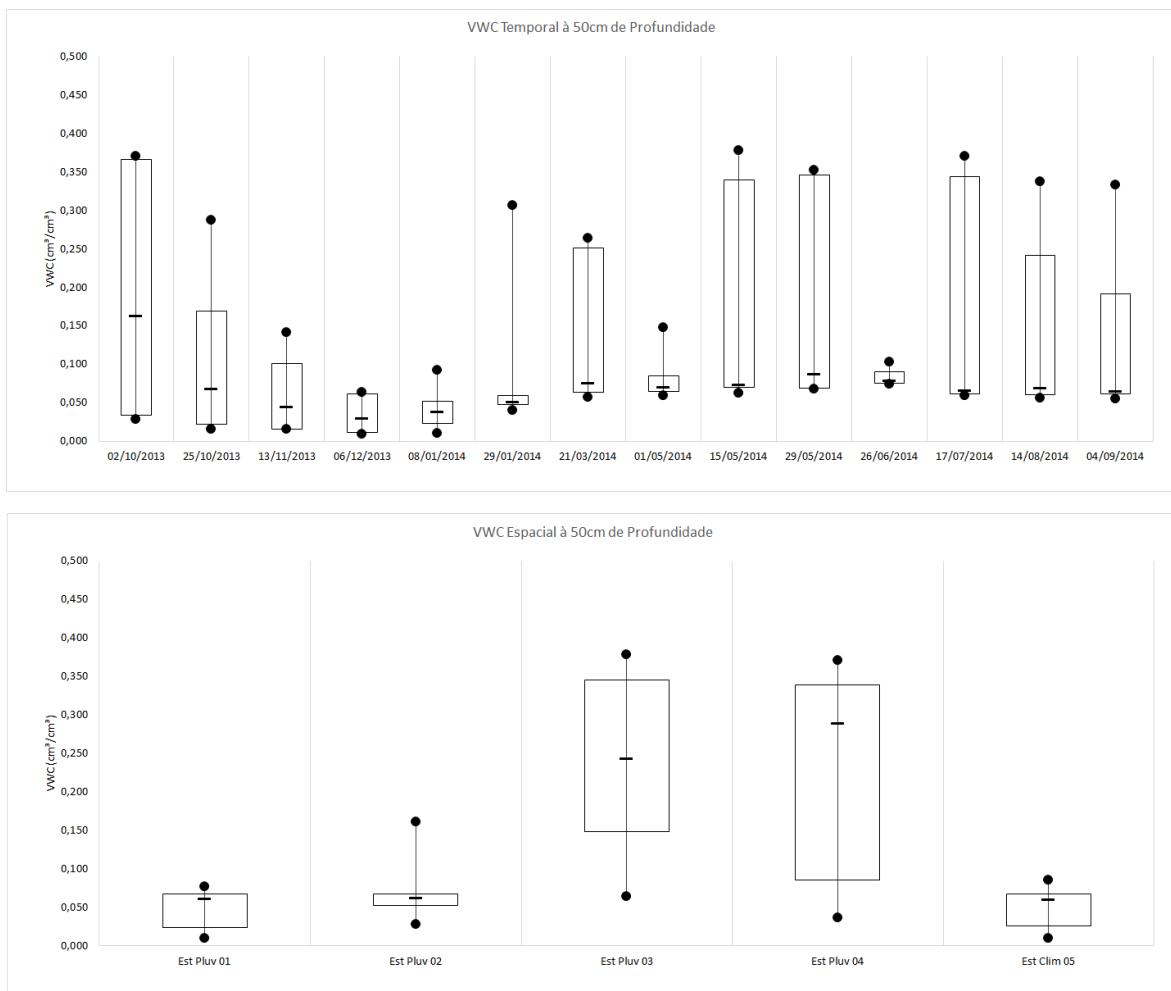


Figura 93 - VWC espaço-temporal à 50cm de profundidade

APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO NAS ESTAÇÕES

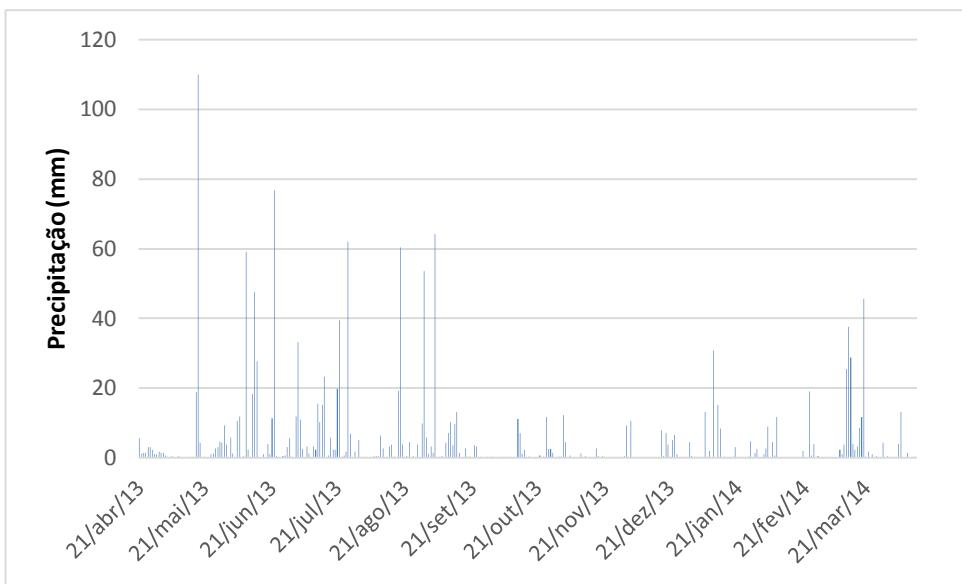


Figura 94 – Precipitação Diária Est. Pluv. 01

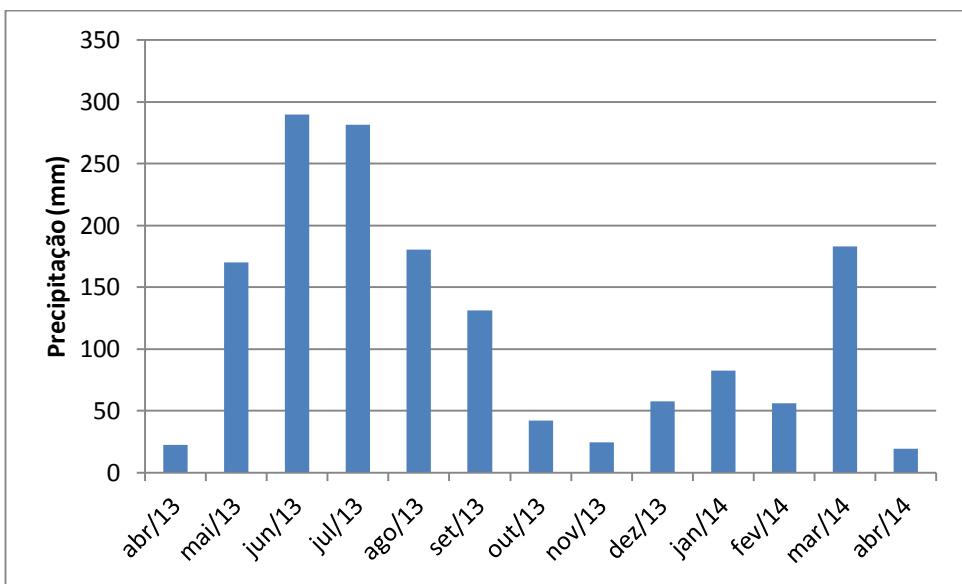


Figura 95 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 01

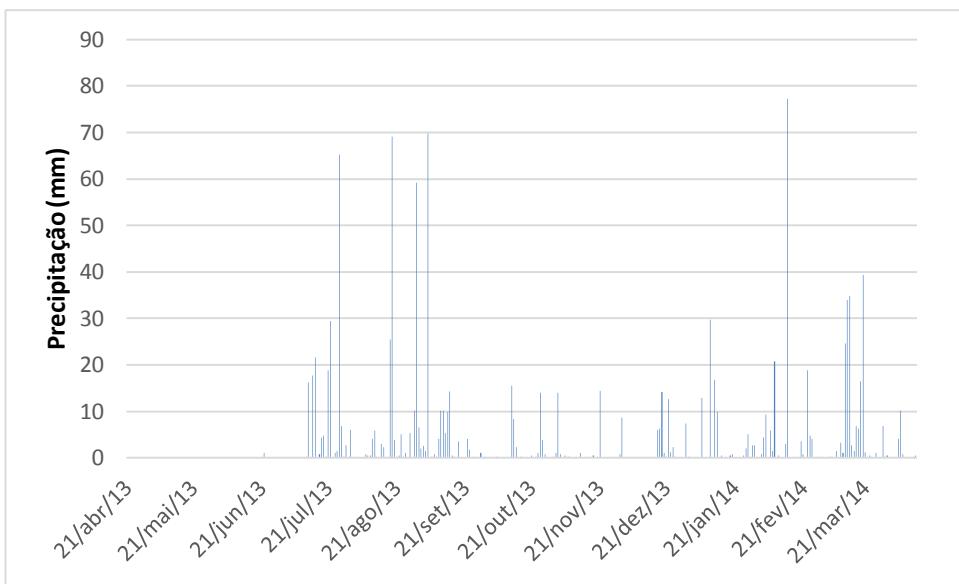


Figura 96 – Precipitação Diária Est. Pluv. 02

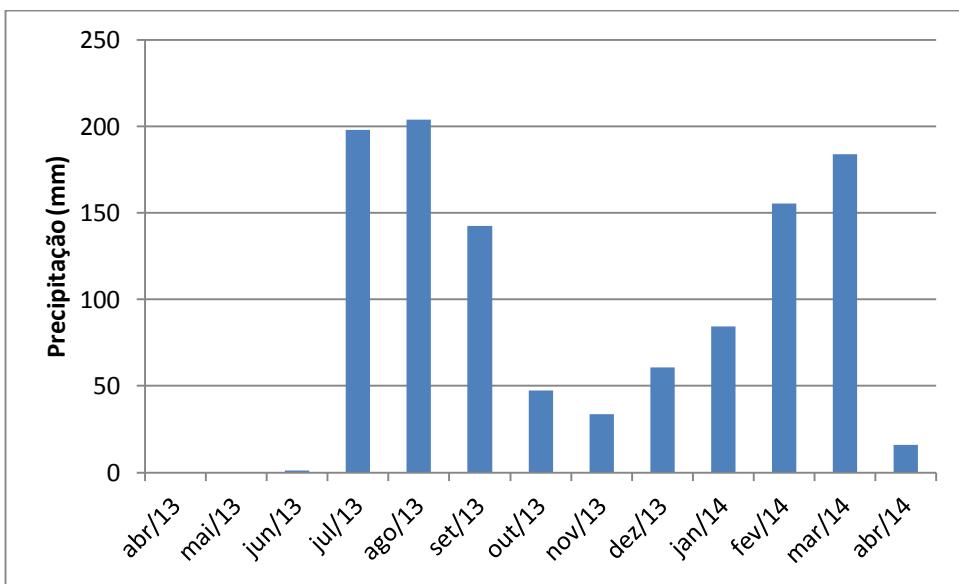


Figura 97 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 02

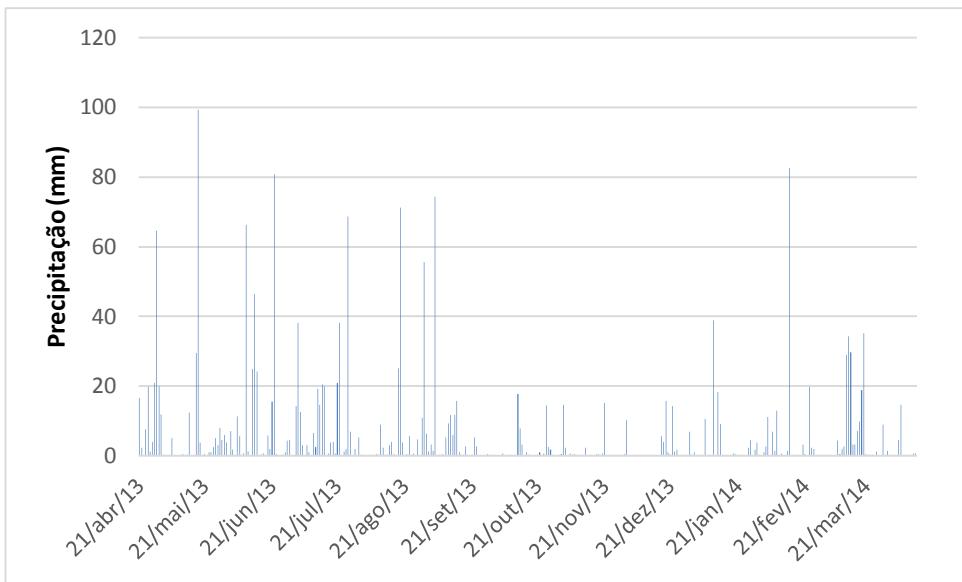


Figura 98 – Precipitação Diária Est. Pluv. 04

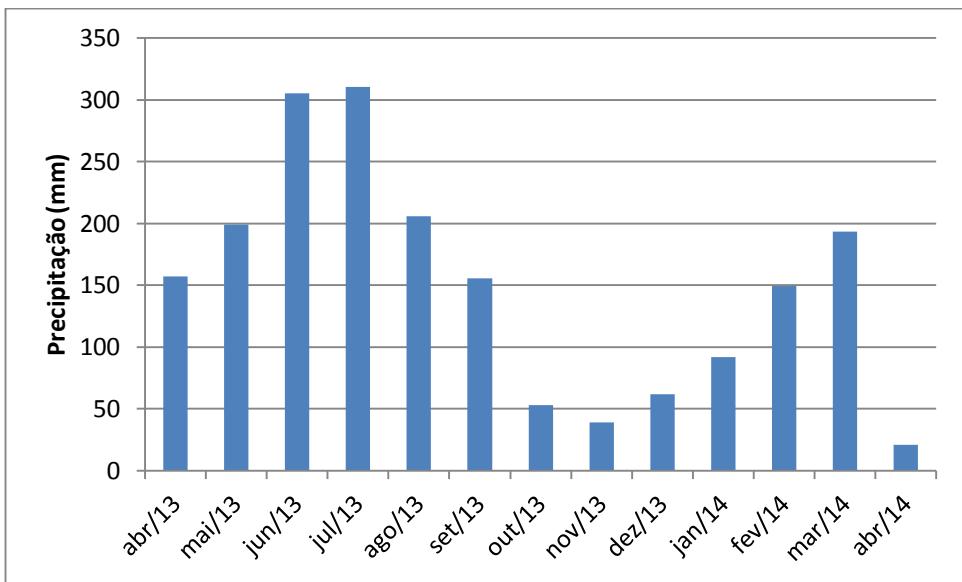


Figura 99 – Precipitação Mensal Est. Pluv. 04

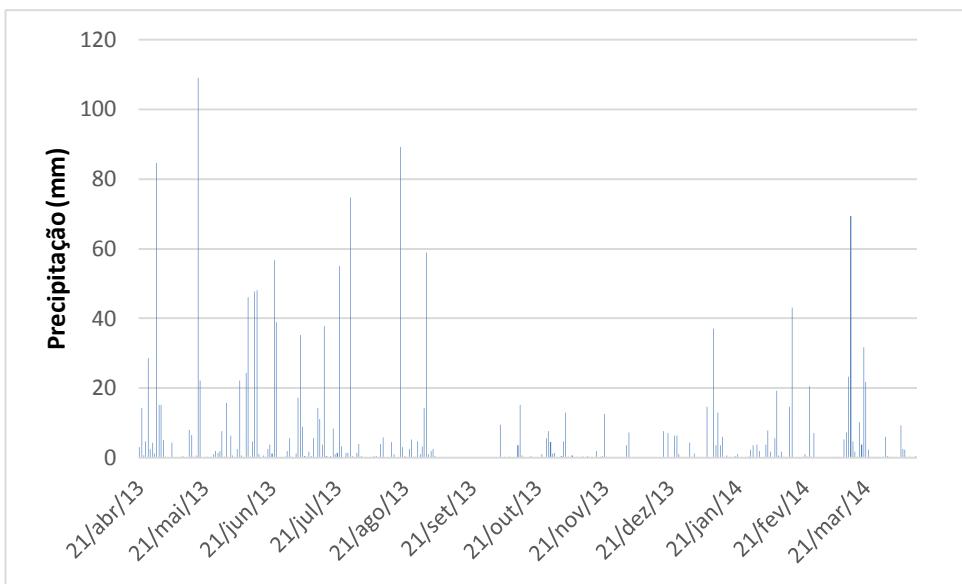


Figura 100 – Precipitação Diária Est. Clim. 05

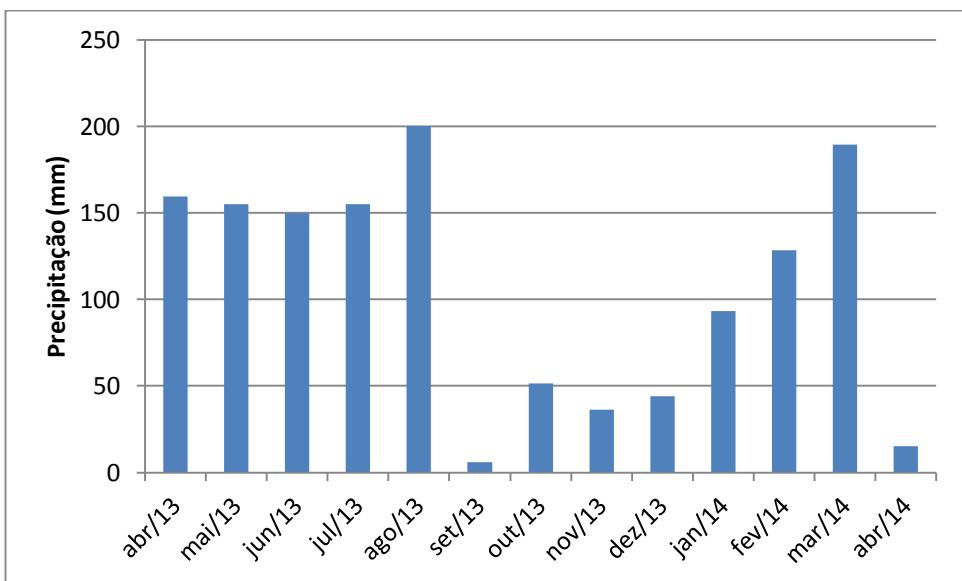


Figura 101 – Precipitação Mensal Est. Clim.05