

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

TALITA ROSAS FERREIRA

**ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA DA DENSIDADE DO SOLO DE
AMOSTRAS COLETADAS EM ANÉIS VOLUMÉTRICOS VIA ANÁLISE
TOMOGRÁFICA**

PONTA GROSSA

2014

TALITA ROSAS FERREIRA

**ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA DA DENSIDADE DO SOLO DE
AMOSTRAS COLETADAS EM ANÉIS VOLUMÉTRICOS VIA ANÁLISE
TOMOGRÁFICA**

Dissertação apresentada para obtenção de título
de Mestre na Universidade Estadual de Ponta
Grossa, no Programa de Pós Graduação em
Ciências/ Física.

Orientador Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA

2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

F383 Ferreira, Talita Rosas
Área elementar representativa da
densidade do solo de amostras coletadas em
anéis volumétricos via análise
tomográfica/ Talita Rosas Ferreira. Ponta
Grossa, 2014.
83f.

Dissertação (Mestrado em Ciências -
Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
Pires.

1.Estrutura do solo. 2.Densidade do
solo. 3.Análise de Imagens. 4.Atenuação de
raios gama. 5.Medidas elementares
representativas. I.Pires, Luiz Fernando.
II. Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Ciências. III. T.

CDD: 539

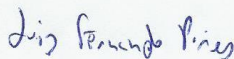
TERMO DE APROVAÇÃO

TALITA ROSAS FERREIRA

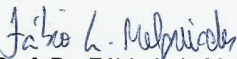
“ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA DA DENSIDADE DO SOLO DE AMOSTRAS COLETADAS EM ANÉIS VOLUMÉTRICOS VIA ANÁLISE TOMOGRAFICA”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

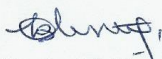
Orientador:



Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
Departamento de Física, UEPG/PR.



Prof. Dr. Fábio Luiz Melquíades
Departamento de Física, UNICENTRO/PR



Prof. Dr. André Maurício Brinatti
Departamento de Física, UEPG/PR

✱ Ponta Grossa, 14 de março de 2014.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por se mostrar sempre presente em minha vida;

Aos meus pais, pelo carinho, paciência e apoio ao longo do caminho;

Àquele que invadiu meu rádio, pela parceria, pelo incentivo e por me fazer sorrir;

Ao prof. Dr. Luiz Fernando Pires, por sua excelente orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho;

A todos do grupo FASCA, pelo companheirismo e conhecimento compartilhado. Em especial à Jaqueline, pelas discussões, ideias e sugestões no decorrer desta etapa;

A CAPES, pelo auxílio financeiro;

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica que fornece imagens do interior de amostras, permitindo a investigação de diferentes fenômenos físicos que ocorrem no solo por meio de análises qualitativas e quantitativas em 2D e 3D. Na área de física aplicada a meios porosos, uma questão que vem sendo estudada nos últimos anos diz respeito à definição de áreas elementares representativas (AER) para medidas de propriedades físicas desses meios. A AER está relacionada com a área mínima de uma amostra, necessária para representar suas características de interesse. O objetivo deste estudo foi definir AERs para medidas de densidade (ρ_s) de amostras de solo coletadas em anéis volumétricos. Para isso, três solos de diferentes texturas foram analisados: Latossolo Vermelho-amarelo (LVA), Latossolo Vermelho (LVE) e Nitossolo Vermelho (NV). Seis amostras de cada solo foram submetidas a dois métodos para determinação da sua ρ_s : método do anel volumétrico (AV) e da TC. Para a obtenção das imagens foi utilizado um tomógrafo de raios gama de primeira geração equipado com fonte de ^{241}Am . Foram selecionadas, nas imagens tomográficas, áreas consecutivas, de acordo com três diferentes esquemas (áreas concêntricas crescentes a partir de uma área no centro da amostra e áreas crescentes a partir de uma área selecionada nas bordas inferior e superior da amostra), com áreas variando de 1,2 até 678,8 mm². Para medidas de ρ_s , os seguintes critérios foram adotados para a definição da AER: 1) desvio relativo (DR) entre o valor médio de ρ_s - AV e cada uma das demais áreas não superior a 10, 8, 6, 4 e 2%; 2) DR entre o valor médio de ρ_s - TC obtido para a última área (UA) selecionada na imagem tomográfica e para cada uma das demais áreas igualmente não superior aos critérios do item 1; 3) que pelo menos três áreas consecutivas não devessem diferir entre si nos valores de ρ_s , de acordo com os itens 1 e 2. Considerou-se que a AER para a ρ_s foi atingida no critério de variação de 4%. As AERs obtidas para ρ_s , de acordo com uma seleção de áreas partindo do centro, face inferior e face superior das imagens tomográficas foram, respectivamente, 432,0; 393,3 e 334,0 mm² (solo LVA), 473,1; 457,4 e 393,3 mm² (solo LVE) e 349,7; 457,4 e 334,0 mm² (solo NV). Os resultados obtidos por meio da seleção de áreas partindo do centro das imagens tomográficas foram adotados como valores oficiais de AER dos solos estudados. Também foi proposto neste trabalho um novo critério de análise baseado nos resultados que utilizam como referência os métodos do AV e da TC, simultaneamente, a partir do qual foi possível determinar que as áreas de tamanho 432,0 mm² e 349,7 mm², respectivamente, fornecem valores de densidade confiáveis para os solos LVA e NV.

Palavras-chave: estrutura do solo, densidade do solo, análise de imagens, atenuação de raios gama, medidas elementares representativas.

ABSTRACT

The computed tomography (CT) represents a technique that provides images of samples, allowing the study of different soil physical phenomena by qualitative and quantitative analysis in 2D and 3D. In the area of applied physics to porous media is a matter of investigation the definition of representative elementary areas (REA) regarding measurements of physical properties of this media. REA is related to the minimum area of a sample needed to represent its characteristics of interest. The aim of this study was to define REAs to be adopted for density (ρ_s) measurements from sample soil collected in volumetric rings. Having this purpose in mind, three soils with different textures were analyzed: Geric Ferralsol (GF), Rhodic Ferralsol (RF) and Eutric Nitosol (EN). Six samples from each soil were submitted to the method of volumetric ring (VR) and CT for ρ_s evaluation. A first generation tomograph equipped with ^{241}Am gamma-ray source was used in the image acquisition. Consecutive areas were selected according to three different schemes (consecutive areas increasing from a first area selected at the center of the image and consecutive areas increasing from a first area selected at the inferior and superior borders of the sample) with size areas ranging from 1.2 to 678.8 mm². For ρ_s measurements, the following criteria were adopted: 1) relative deviation (RD) between ρ_s - RV and each of the areas not superior to 10, 8, 6, 4 and 2%; 2) RD between ρ_s - CT obtained for the last area selected inside the tomographic image and each of the remaining areas equally not superior than the criteria from item 1; 3) that at least three consecutive areas must not differ in RD values among themselves, using the variation criterion presented in items 1 and 2. It was considered that the REA for ρ_s was reached at the variation criteria of 4%. The REA found for ρ_s , according to the area selection starting from the center, superior and inferior borders of the tomographic images, were: 432.0; 393.3 and 334.0 mm² (GF), 473.1; 457.4 and 393.3 mm² (RF) and 349.7; 457.4 and 334.0 mm² (EN), respectively. The results obtained by the area selection starting from the center were assumed to be the real values of REA for the studied soils. In this study, it was also proposed an alternative criterion of analysis based on the results obtained, which use as reference, simultaneously, the methods of VR and CT. Therefore, it was possible to define that áreas measuring 432.0 mm² e 349.7 mm² provide, respectively, reliable density values for the LVA and NV soils.

Key-words: soil structure, image analysis, gamma ray attenuation, representative elementary measurements.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema representando a relação entre a porosidade (ϕ) e o volume (V) de um meio poroso. Para pequenos volumes, são observadas flutuações nos valores de ϕ associadas aos efeitos microscópicos. A partir de um volume mínimo ($V_{\min}$), os valores de ϕ tendem a se estabilizar. Para meios homogêneos, esta estabilização independe do volume; para meios heterogêneos, os valores de ϕ voltam a variar após um certo volume máximo ($V_{\max}$). 15
- Figura 2: Diagrama esquemático do procedimento de amostragem. (a) Anéis volumétricos de alumínio e aço; (b) Acoplamento dos anéis de alumínio e de aço e (c) Coleta da amostra de solo..... 25
- Figura 3: Esquema do sistema tomográfico localizado no Laboratório de Física dos Solos do CENA/USP. 27
- Figura 4: Esquema de uma matriz de unidades tomográficas (UT). Os números destacados em vermelho representam a matriz selecionada para a determinação do valor médio de UT dos materiais usados na calibração do tomógrafo. Os números 0 representam a atenuação pelo ar e os números 80 a atenuação pelas bordas do recipiente que possam conter as amostras. 28
- Figura 5: Gráfico dos dados de unidades tomográficas (UT) obtidos nas medidas de TC, para fótons de ^{241}Am , dos materiais (água, álcool, “nylon”, acrílico, glicerina e amostras dos solos LVA, LVE e NV) usados na calibração do sistema em função de seus respectivos coeficientes de atenuação linear (μ). 29
- Figura 6: Imagem esquemática para um cilindro (anel volumétrico) com volume aproximado de 55 cm^3 . A região em vermelho na parte central do cilindro representa a fatia ao longo da profundidade da amostra de solo varrida pelo feixe de radiação gama (setas azuis), que por sua vez fornece a imagem tomográfica apresentada ao lado direito. 30
- Figura 7: Divisões (x1...x5) feitas na imagem tomográfica para a análise da variabilidade da densidade em função da profundidade (z) das amostras de solo. O cilindro sobreposto indica sua posição em relação à imagem. 32
- Figura 8: Esquemas de construção das áreas concêntricas e consecutivas sobre as imagens tomográficas: (a) Esquema 1, (b) Esquema 2 e (c) Esquema 3. Regiões mais escuras representam maiores valores de densidade. 32

Figura 9: Esquema ilustrativo para a definição de uma área ótima válida simultaneamente para o método do anel volumétrico e para a tomografia de raios gama, para uma amostra de um solo arbitrário.	34
Figura 10: Imagens tomográficas obtidas em escala de cinza para as amostras do solo (a) LVA (b) LVE (c) NV.....	37
Figura 11: Divisões (x1, x2, x3, x4 e x5) feitas na imagem tomográfica para a análise da variabilidade da densidade em função da profundidade (z) das amostras de solo.....	38
Figura 12: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo LVA. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo LVA.	40
Figura 13: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC _{UA}	41
Figura 14: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC _{UA}	42
Figura 15: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC _{UA}	43
Figura 16: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo LVE. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo LVE.....	47
Figura 17: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC _{UA}	48

- Figura 18: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}. 49
- Figura 19: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}. 50
- Figura 20: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo NV. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo NV..... 54
- Figura 21: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}. 55
- Figura 22: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}. 56
- Figura 23: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}. 57
- Figura 24: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVA que atingiram a área elementar representativa (AER), com ρ_s – TC_{UA} como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 61
- Figura 25: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVE que atingiram a área elementar representativa (AER), com ρ_s – TC_{UA} como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 62

- Figura 26: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo NV que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - TC_{UA}$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 63
- Figura 27: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVA que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 67
- Figura 28: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVE que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 68
- Figura 29: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo NV que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3. 69
- Figura 30: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo LVA. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, $\rho_s - TC_{UA}$ e $\rho_s - AV$. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra. A linha tracejada na vertical indica a área comum aos IARs. 73
- Figura 31: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo LVE. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, $\rho_s - TC_{UA}$ e $\rho_s - AV$. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra. 73
- Figura 32: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo NV. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, $\rho_s - TC_{UA}$ e $\rho_s - AV$. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra. A linha tracejada na vertical indica a área comum aos IARs. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas da camada de 0 – 10 cm para o latossolo vermelho amarelo (LVA), nitossolo vermelho (NV), latossolo vermelho escuro (LVE).....	24
Tabela 2: Relação das áreas selecionadas de acordo com o esquema 1 adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER).....	33
Tabela 3: Relação das áreas selecionadas de acordo com o esquemas 1 e 2 adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER).....	33
Tabela 4: Resumo dos dados apresentados nas Figuras 23, 24 e 25, contendo informações a respeito da maior área na qual cada critério foi atingido entre as amostras de cada solo (AER), bem como as medidas de tais áreas, de acordo com cada esquema de seleção...	65
Tabela 5: Resumo dos dados apresentados nas Figuras 26, 27 e 28, contendo informações a respeito da maior área na qual cada critério foi atingido entre as amostras de cada solo (AER), bem como as medidas de tais áreas, de acordo com cada esquema de seleção...	70
Tabela 6: Área para a qual AC, considerada como área ideal, foi determinada, de acordo com cada solo/esquema de seleção de áreas, suas respectivas medidas e o número de amostras em que a AC foi encontrada.	77

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

MER	Medida Elementar Representativa
AER (cm ²)	Área Elementar Representativa
VER (cm ³)	Volume Elementar Representativo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CNPDIA	Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária
TC/MTC	Tomografia Computadorizada/ Método da TC
AV/MAV	Anel Volumétrico/ Método do AV
TP/MTP	Torrão Parafinado/ Método do TP
UT	Unidade tomográfica
μ (cm ⁻¹)	Coeficiente de atenuação linear
μ_m (cm ² g ⁻¹)	Coeficiente de atenuação de massa
LVA	Latossolo Vermelho-amarelo
LVE	Latossolo Vermelho Escuro
NV	Nitossolo Vermelho
UA	Última área
ρ_s (g cm ⁻³)	Densidade do solo
$\rho_s - AV$ (g cm ⁻³)	Densidade do solo obtida pelo MAV
$\rho_s - TC$ (g cm ⁻³)	Densidade do solo obtida pelo MTC
$\rho_s - TC_{UA}$ (g cm ⁻³)	Densidade do solo obtida pelo MTC para a última área
ϕ (cm ³ cm ⁻³)	Porosidade
θ (cm ³ cm ⁻³)	Umidade volumétrica
DR	Desvio Relativo
IAR	Intervalo de áreas representativas
AO (cm ²)	Área Ótima
AC (cm ²)	Área Comum
CV	Coeficiente de variação
r	Coeficiente de correlação
z (mm)	Profundidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	12
1.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) E MEDIDAS ELEMENTARES REPRESENTATIVAS (MER)	14
2. OBJETIVOS.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. COLETA DAS AMOSTRAS.....	24
3.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO	26
3.2.1 Método do Anel Volumétrico (MAV).....	26
3.2.2 Método da Tomografia Computadorizada (MTC).....	26
3.2.2.1 Sistema Tomográfico	26
3.2.2.2 Calibração do sistema tomográfico	27
3.2.2.3 Coeficiente de Atenuação	29
3.2.2.4 Procedimentos para a Aquisição das Imagens Tomográficas.....	30
3.3 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA AER.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 DENSIDADE DO SOLO AVALIADA PELO MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO.....	35
4.2 ANÁLISE QUALITATIVA DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS	37
4.3 DETERMINAÇÃO DA AER EM FUNÇÃO DE ρ_s PARA TRÊS DIFERENTES ESQUEMAS DE SELEÇÃO DE ÁREAS.....	38
4.4 DEFINIÇÃO DE INTERVALOS DE ÁREAS REPRESENTATIVAS VÁLIDOS PARA O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO E PARA O MÉTODO DA TOMOGRAFIA.....	72
4.5 AER E ÁREA IDEAL, VÁLIDA PARA OS MÉTODOS DO AV E TC, ADOTADAS COMO RESULTADOS OFICIAIS PARA MEDIDAS DE DENSIDADE DOS SOLOS LVA, LVE E NV	78
5. CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

1.1. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

O solo é tradicionalmente descrito como um sistema trifásico, em que a fase sólida forma a matriz do solo, composta por material orgânico e inorgânico; a fase líquida consiste na quantidade de água presente no solo, a qual contém substâncias dissolvidas e, por esta razão, é chamada de solução do solo; e a fase gasosa que consiste na atmosfera do solo. A matriz sólida do solo é constituída de partículas que variam de acordo com a sua composição mineralógica, tamanho, formato e orientação (HILLEL, 2004).

De acordo com Hillel (2004), o arranjo ou organização das partículas do solo (*i.e.*, a configuração interna da matriz do solo) é denominada estrutura do solo, a qual é responsável por controlar o transporte de solutos, gases e calor no interior do solo. A estrutura do solo é influenciada pelas mudanças no clima, atividade biológica e práticas de manejo. Além disso, é vulnerável às forças destrutivas de natureza mecânica ou físico-química. A estrutura do solo afeta o crescimento e desenvolvimento de raízes e a sua funcionalidade, o que define o habitat da fauna desse meio poroso. Em solos agrícolas, a interação entre as propriedades relacionadas à estrutura e à água no solo contribui significativamente para a sua produtividade, assim como para os impactos ambientais da agricultura (RASA, 2011).

A avaliação da estrutura de um solo normalmente envolve uma análise visual que é complementada por medidas quantitativas de suas propriedades físicas, com o uso de amostras de solo coletadas em uma determinada região. As análises qualitativas incluem uma descrição da morfologia do solo na sua superfície e da variação dessa com a profundidade (KAY; ANGERS, 2002).

O termo “textura” é usado com referência a uma propriedade física fundamental do solo, ou seja, à distribuição de tamanhos das partículas minerais primárias ali presentes (areia, silte e argila). O tamanho das partículas do solo (ou diâmetro efetivo) fornece a base para um dado sistema de classificação textural do solo, que pode variar entre países, de modo que determinados intervalos de diâmetros de partículas recebem designações distintas (SKOPP, 2002). A textura do solo está relacionada ainda com os diferentes tamanhos de poros presentes no solo (macro e microporos) (KAY; ANGERS, 2002).

No solo podem ser definidas duas densidades: a de partículas e a do solo. A densidade de partículas, obtida pela razão entre a massa de partículas e seu respectivo volume, depende da constituição do solo e na maioria dos solos minerais, oscila em torno de 2,65 g cm⁻³ (densidade do quartzo). O quartzo é o mineral que geralmente prevalece na fração

grosseira do solo. Alguns dos minerais que compõem a fração mais fina do solo possuem uma densidade similar. No entanto, a presença de óxidos de ferro e de vários outros minerais pesados (densidade superior a $2,90 \text{ g cm}^{-3}$) aumenta o valor médio da densidade de partículas, enquanto a presença de matéria orgânica a diminui (HILLEL, 2004; REICHARDT; TIMM, 2004). O valor da densidade de partículas por si só fornece poucas informações a respeito dos processos físicos que ocorrem no solo, porém, o seu valor é necessário para a determinação de propriedades mais úteis, tais como a porosidade e a distribuição do tamanho de partículas (SKOPP, 2002).

A densidade do solo é representada pela razão entre a massa seca do solo e o volume total por ela ocupada (SKOPP, 2002). Os solos agrícolas apresentam uma grande variabilidade de valores de densidade em função de suas características mineralógicas, texturais e de teores de matéria orgânica. Neste sentido, solos arenosos, em condições naturais, apresentam densidade superior ($1,30$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$) ao solo argiloso ($0,90$ a $1,60 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto que os solos siltosos apresentam valores intermediários a estes (MARCOLIN, 2006; MARCOLIN; KLEIN, 2011).

A densidade do solo varia de acordo com a sua textura porque depende do arranjo das partículas. Em solos que contêm mais de 15% de argila, as partículas minerais tendem a formar unidades estruturadas, por meio de processos físicos e biológicos, conhecidas como agregados. Solos agregados são mais fortes quando comparados a solos mais homogêneos e os processos físicos, químicos e biológicos variam entre os volumes inter- e intra-agregados (HORN; BAUMGARTL, 2002). Estes agregados contam com uma porosidade intra-agregados, que por sua vez, reduz a densidade do solo (KLEIN, 2005 apud MARCOLIN, 2006). Em outras palavras, solos de textura fina bem agregados e solos arenosos podem apresentar um espaço macroporoso similar, mas a falta de microporos torna os solos arenosos mais densos.

Também é possível apontar o histórico de compactação do solo como um fator de influência relevante sobre a densidade desse meio poroso, de maneira que a determinação deste parâmetro requer que as condições no momento da coleta sejam conhecidas (SKOPP, 2002). Vale ressaltar que os macroporos são os poros menos estáveis e mais suscetíveis a compactação em comparação com os microporos (KAY; ANGERS, 2002).

Rasa (2011) afirma que, em termos biológicos e de fatores físicos, o horizonte superficial é a parte mais ativa do solo. As minhocas desempenham papel predominante na formação e manutenção da estrutura do solo, principalmente através dos túneis, das galerias e dos coprólitos (excrementos) que produzem. As características físicas e químicas destas

estruturas, assim como sua distribuição espacial e temporal definem em grande parte a boa qualidade da camada superficial agricultável do solo, facilitando sobremaneira a retenção de nutrientes e a infiltração de água no perfil (BARTZ et al., 2009). Rab et al. (2014) justificam o uso de amostras coletadas nas camadas superficial do solo em seus estudos pelo fato de que estas contém a maior porosidade e, portanto, a maior probabilidade de detectar os efeitos do volume da amostra e potenciais efeitos de borda provenientes da amostragem sobre a porosidade.

Segundo Hillel (2004), é sabido que os solos exibem diferenças marcantes entre localizações distintas, e estas diferenças são atribuídas às combinações variadas dos fatores que governam a formação do solo. A variabilidade espacial de propriedades físicas do solo é inerente a esse meio poroso e as suas causas podem ser naturais ou antropogênicas. São reconhecidos dois tipos de propriedades do solo: as propriedades pontuais, que podem ser medidas em qualquer ponto dentro do solo, como por exemplo, a temperatura, pressão e a composição química; e as propriedades volumétricas que, por outro lado, somente fazem sentido com referência a um determinado volume, tais como a densidade e a porosidade do solo. Os resultados das medidas de tais propriedades podem depender fortemente do volume medido.

1.2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) E MEDIDAS ELEMENTARES REPRESENTATIVAS (MER)

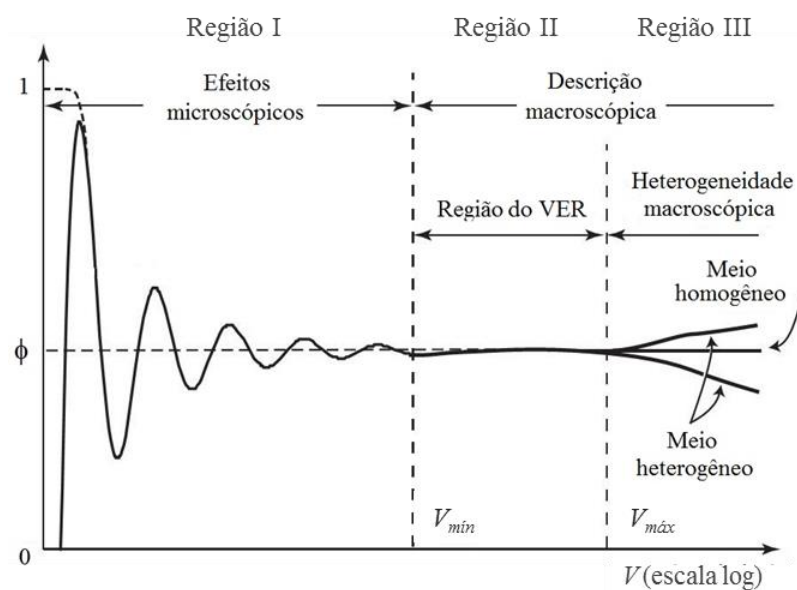
Medidas elementares representativas (MER) podem ser obtidas a partir de volumes (VER), áreas (AER) ou comprimentos (CER). Na literatura é possível encontrar uma grande quantidade de trabalhos que exploram principalmente o conceito de VER (Volume Elementar Representativo). Uma definição comum retrata o VER associado a uma dada variável como o menor volume de um meio poroso necessário para obtenção de um valor consistente de um parâmetro de medida. Vale ressaltar que, para meios isotrópicos, um VER pode ser bem representado por uma AER. Ou seja, a AER pode ser uma equivalência do VER em duas dimensões (BEAR; BACHMAT, 1984 apud VANDENBYGAART; PROTZ, 1999).

A dimensão característica do VER poderia, em princípio, ser determinada tomando-se volumes do meio poroso, gradativamente maiores, em torno de um dado ponto, e calculando-se então a variável de interesse nestes volumes. Sabe-se que o solo é um meio heterogêneo com porosidade variando no espaço. Portanto, se a amostra é muito pequena, isto é, comparável ao tamanho de uma partícula ou poro isolado, a porosidade medida pode variar entre 0% e 100% (Figura 1). Aumentando-se o volume da amostra, de maneira que partículas

e poros passam a ser englobados, as flutuações na medida desse parâmetro diminuem, de modo que obtém-se uma medida consistente de porosidade média do solo. De acordo com o esquema apresentado na Figura 1, no ponto em que os efeitos microscópicos não forem mais significantes, a variável (a porosidade nesse caso) assume um valor que flutua levemente em torno de um valor médio (BAVEYE; BOAST, 1999).

Para meios homogêneos, o VER ($V_{mín}$) é definido como o limite da região II (Figura 1); medidas de porosidade feitas nesta escala são independentes do tamanho da amostra e representam com acurácia um sistema maior (BEAR, 1972). Para meios porosos heterogêneos com relação à porosidade, esse parâmetro ainda pode variar significativamente na região II, e o desvio padrão associado pode ser grande. Ainda assim, o VER associado a tais meios pode ser atingido em um volume intermediário entre $V_{mín}$ e $V_{máx}$ (BEAR; CHENG, 2010; ZHANG et al., 2000). Entretanto, na região III, para meios heterogêneos, quando se aumenta o volume da amostra para além de $V_{máx}$, o valor da porosidade voltará a flutuar até que uma nova estabilização seja atingida em maiores escalas (BEAR; CHENG, 2010). Hillel (2004) afirma que, em contraste a solos mais uniformes, o VER tende a ser de maior tamanho em solos fortemente agregados, em solos pedregosos e em solos que apresentam rachaduras, ou seja, em solos mais heterogêneos.

Figura 1: Esquema representando a relação entre a porosidade (ϕ) e o volume (V) de um meio poroso. Para pequenos volumes, são observadas flutuações nos valores de ϕ associadas aos efeitos microscópicos. A partir de um volume mínimo ($V_{mín}$), os valores de ϕ tendem a se estabilizar. Para meios homogêneos, esta estabilização independe do volume; para meios heterogêneos, os valores de ϕ voltam a variar após um certo volume máximo ($V_{máx}$).



Fonte: Adaptado de Bear; Cheng (2010).

Os avanços tecnológicos no que diz respeito à aquisição não destrutiva de imagens 3D na área de materiais, tais como as oferecidas pela microtomografia de raios X (μ TC), resultaram em um aumento considerável da quantidade de dados relacionados às características dos meios porosos. Essa grande quantidade de dados possibilita analisar diferentes parâmetros físicos do solo, tais como: formato de poros, tortuosidade, conectividade, distribuição de partículas, área de superfície, etc. Imagens microtomográficas são ideais para o estudo de MER, pois tornam possível a análise de subvolumes dentro de uma mesma amostra (COSTANZA-ROBINSON; ESTABROOK; FOUHEY, 2011). O conceito de VER também pode ser utilizado para verificar se pequenos volumes de amostras submetidas à microtomografia podem fornecer resultados confiáveis de uma determinada propriedade física do solo.

Propriedades físicas do solo variam naturalmente no espaço e no tempo devido a processos de formação do solo, clima, crescimento da cultura e sistemas de manejo e preparo. Procedimentos de amostragem e preparo das amostras para análises físicas também podem afetar a representatividade da propriedade analisada. Em termos estatísticos, a variação da propriedade analisada diminui conforme o tamanho da amostra aumenta (STARR, 1995).

No entanto, o conceito de VER deve ser usado com certa precaução, pois parâmetros distintos podem exibir padrões espaciais e temporais diferentes, de modo que o VER pode variar de acordo com o parâmetro. Isto significa dizer que cada propriedade possui escala característica. No caso de domínios “estruturados”, isto é, em domínios que variam sistematicamente em uma determinada direção, aumentar o volume da amostra pode não produzir um resultado representativo (HILLEL, 2004; BAVEYE et al., 2002).

Baveye et al. (2002), em um estudo para se determinar o VER de diferentes propriedades físicas macroscópicas do solo, investigaram, via TC de raios X, parâmetros tais como: densidade, porosidade, conteúdos gravimétrico e volumétrico de água, de ar e de sólidos. No estudo dos referidos autores foram utilizadas duas amostras indeformadas, as quais foram coletadas em diferentes horizontes do solo. No interior das imagens microtomográficas (3D), um volume de $60 \times 60 \times 30 \text{ mm}^3$ (V_{bloco}) foi selecionado e dois esquemas foram adotados para simular medidas através de volumes de amostras crescentes: o primeiro esquema consistia em se tomar volumes progressivamente maiores ao redor do ponto central do V_{bloco} ; o segundo esquema, que simulava medidas feitas em amostras coletadas com caixas de Kubiena (caixas de papelão utilizadas para coletar blocos de solo para análise micromorfológica), considerava volumes crescentes a partir da face superior.

Os resultados obtidos pelos referidos autores indicaram que volumes de amostra de $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ seriam apropriadas para avaliar a densidade em qualquer ponto dentro do V_{bloco} , com um erro entre 3 – 4 %, conforme o horizonte estudado. Baveye et al. (2002) alegam que não foi possível encontrar mais de dois pontos sucessivos (referentes a volumes consecutivos) de dados que tivessem exatamente o mesmo valor da variável em estudo. Eles ressaltam ainda que, para o segundo esquema de análise, nem mesmo dois pontos de mesmos valores foram encontrados para a densidade e que, portanto, de acordo com as definições tradicionais, não seria possível estabelecer um VER para nenhuma das amostras de $60 \times 60 \times 30 \text{ mm}^3$. Entretanto, usando uma definição menos restrita do VER, de acordo com o critério proposto por VandenBygaart e Protz (1998), os autores identificaram um VER para ambos os horizontes, até mesmo para a densidade.

VandenBygaart e Protz (1999) afirmam que a deficiência nos estudos envolvendo MER, tal como é o caso da AER, se devia, naquele momento, à falta de uma técnica de identificação adequada desta área elementar. No trabalho mencionado, os autores buscaram descrever uma técnica de avaliação da AER envolvendo análises quantitativas de propriedades micromorfológicas do solo e propor um método consistente através do qual a AER pudesse ser determinada. Para isso, foram obtidas imagens em escala micrométrica de um total de 98 seções finas de amostras impregnadas com resina. Para a avaliação da AER, foram selecionadas 13 áreas consecutivas, cujos centros coincidiam com o pixel central da imagem, sendo a última área equivalente a $3,5 \times 4,7 \text{ cm}$. A área total (macroporosidade total) e o perímetro total (área total de vazios) dos poros foram medidos para cada área como uma porcentagem da área total da imagem.

Para a determinação da AER, propôs-se, no trabalho supracitado, o seguinte método: a AER seria atingida quando as medidas de um parâmetro para três áreas sucessivas não mudassem em $\pm 10\%$ com relação à próxima área de maior tamanho. Os autores explicam que este critério foi adotado arbitrariamente e poderia variar de acordo com o parâmetro de interesse. Para poros com diâmetro entre 50 e 500 μm , a AER foi alcançada em 99% e em 97% das amostras, para a área e perímetro total de poros, com valores médios de 5,09 e 5,00 cm^2 , respectivamente. Já para poros com diâmetro entre 500 e 2000 μm , 91% e 95% das amostras atingiram a AER, para área e perímetro total de poros, com médias de 6,73 e 4,95 cm^2 , respectivamente. VandenBygaart e Protz (1999) concluem que quanto maior é o tamanho da unidade individual de interesse, maior é a área exigida para a AER e postulam que tomando-se uma área de 4 a 6 vezes o maior diâmetro da maior propriedade do solo

dentro de um horizonte, esta área deve ser representativa para todas as propriedades deste horizonte.

Rab et al. (2014) realizaram um estudo em que buscavam avaliar os efeitos de diferentes diâmetros/volumes de amostras, de diferentes resoluções espaciais e das bordas do amostrador sobre as características da porosidade de solos de textura média (franco arenosos), usando TC de raios X. No referido trabalho, as amostras indeformadas de solo foram coletadas em diferentes regiões, em tubos de PVC com diâmetros de 50 e 65 mm, nas profundidades de 0 a 10 cm e 20 a 30 cm, totalizando 48 amostras, para as quais foram realizadas medidas de macroporosidade e diâmetro de poros usando TC. As resoluções de 109 μm e 138 μm foram identificadas como sendo as resoluções mais altas a serem alcançadas para os diâmetros de 50 e 65 mm, respectivamente. Os autores afirmam que apesar de menores diâmetros de amostra permitirem maior resolução espacial, menores tamanhos de amostra aumentam o potencial de influência do processo de amostragem do solo sobre a sua estrutura, particularmente próximo as bordas; esta afirmação é corroborada por Pires et al. (2004).

No trabalho de Rab et al. (2014), as imagens correspondentes às amostras de interesse, após terem sido devidamente tratadas, foram divididas em uma série de cinco subvolumes concêntricos, de geometria retangular, com uma altura vertical fixa, representando 100% (V1); 80% (V2); 60% (V3); 40% (V4) e 20% (V5) do volume total da amostra. A porosidade medida para cada um destes volumes foi então subtraída do prisma adjacente para determinar o efeito da distância das bordas sobre a porosidade (*i.e.* porosidade de V1–V2; V2–V3; V3–V4; V4–V5, totalizando quatro volumes iguais, correspondentes a 20% do volume da amostra original). No trabalho desses autores, não foram observadas diferenças significativas para a macroporosidade medida nos volumes variando de 20 a 100% do volume original e nem mesmo entre os quatro volumes iguais com o aumento da distância a partir da borda da amostra até a região de solo analisada, para ambos os diâmetros de amostras considerados. Os autores explicam que este resultado pode sugerir que a hipótese prévia por eles adotada, a respeito da influência do tamanho do amostrador sobre as características do solo, pode não ser uma regularidade.

Razavi; Muhunthan e Hattamleh (2007) também fizeram uso dos atuais avanços da caracterização microestrutural para quantificar as características do VER de areias (meio heterogêneo) e grânulos esféricos de vidro (meio homogêneo). Para tanto, utilizaram a tomografia computadorizada de raios X na obtenção de imagens 3D, as quais foram devidamente processadas com o uso de um programa computacional interativo desenvolvido

especialmente para este fim. Em especial, o que diferencia este trabalho dos demais é o fato de que, com este programa, um volume elementar de geometria esférica foi selecionado, com seu raio variando de zero até o limite apresentado pela amostra.

No último trabalho citado, elaborou-se um gráfico da variação da porosidade para cada incremento de raio do volume elementar esférico. Os resultados obtidos pelos referidos autores mostraram as características de três regiões diferentes, dependendo da partícula constituinte: uma região de flutuações microscópicas, uma região constante, e uma região crescente ou decrescente, as quais podem ser associadas às regiões indicadas na Figura 1. As amostras de grânulos de vidro homogêneos apresentaram o caso clássico de flutuação microestrutural seguida de um platô, enquanto as areias naturais apresentaram as três regiões mencionadas. Razavi; Muhunthan e Hattamleh (2007) ressaltam que o VER é essencial para a determinação de valores médios de propriedades de meios homogêneos em que a hipótese clássica do contínuo é válida, mas que por outro lado, é inevitável encontrar traços de heterogeneidade em solos naturais. Como resultado disso, com o aumento dos subvolumes é provável que se encontre características da região III (Figura 1) onde a hipótese do contínuo é falha, de modo que se faz necessária a realização de medidas contínuas não locais para uma descrição mais detalhada dos efeitos de escala em meios não homogêneos.

Costanza-Robinson; Estabrooke e Fouhey (2011) avaliaram a habilidade em estimar o VER determinístico para a porosidade (VER - ϕ), umidade de saturação (VER - S_w) e área total de interface ar-água (VER - A_I) para um conjunto de 49 imagens microtomográficas, para esferas de vidro e meios porosos naturais. Nesse trabalho, duas geometrias de subvolumes foram avaliadas, sendo uma delas a geometria cúbica tradicional centrada em um único voxel, que permitiu a estimativa do VER cúbico em duas posições, ligeiramente sobrepostas, na parte superior e inferior de cada imagem e a terceira avaliação do VER consistia em expandir simetricamente, no plano horizontal, um núcleo de altura fixa igual à altura da imagem. As três configurações mencionadas resultaram em 147 casos de estudo, os quais foram classificados como “homogêneo” ou “heterogêneo”, com relação a cada variável, com base em uma avaliação que levava em conta o fato de o VER exibir ou não um platô nítido.

No trabalho supracitado, para casos homogêneos com relação à variável de interesse, o VER foi determinado usando o critério proposto em Li et al. (2009) - ε_g (valor do gradiente do erro relativo para a variável medida) $< 0,2$, de modo que o VER - ϕ para a geometria cúbica variou entre 0,37 e 2,00 mm ($0,05 - 8 \text{ mm}^3$), dependendo do meio poroso, equivalente

a aproximadamente 1 – 7 diâmetros de grão, enquanto o VER - ϕ para o núcleo variou de 0,12 a 0,36 mm (0,07 – 0,6 mm³), representando uma espessura menor do que um único diâmetro de grão para alguns meios. Os autores explicam que mesmo uma variação discreta na porosidade com a profundidade é suficiente para influenciar o VER - cubo; a geometria de núcleo, por sua vez, tende a equilibrar na média esta variação com a profundidade. Nos casos em que a umidade de saturação era uniforme com a profundidade (*i.e.* meios homogêneos), os VERs - S_w e - A_I foram, na média, duas vezes maiores do que VER - ϕ . Em contraste, na presença de grandes gradientes de S_w ao longo da profundidade (*i.e.* meios heterogêneos), as condições do sistema foram suficientemente heterogêneas para que os VERs - S_w e - A_I não pudessem ser estabelecidos deterministicamente (ausência de platô).

Os resultados obtidos por Costanza-Robinson; Estabrooke e Fouhey (2011) sugerem que, para sistemas com distribuição de umidade homogênea, o uso do VER - ϕ como um requisito foi bastante útil para excluir dados medidos dentro de flutuações aleatórias da região I (Figura 1) e que tanto a geometria de cubo quanto a de núcleo, bem como o critério ε_g usados serviram suficientemente bem a este propósito. Por outro lado, para esses sistemas, os autores ressaltam que os dados ficaram escassos e muito espaçados quando o VER - S_w e - A_I foram utilizados como requisitos, representando mais uma perda de informações confiáveis do que uma melhora na qualidade dos dados. Isto significa que as estimativas para o VER - S_w e - A_I feitas neste trabalho são muito grandes e a isto os autores atribuem a dificuldade de estabelecer deterministicamente VERs em sistemas reais.

Apesar do uso de tomógrafos computadorizados de segunda e terceira gerações, com resolução micrométrica, estar se tornado comum nos últimos anos, Pires e Bacchi (2010) citam o tamanho da amostra a ser analisada como um dos problemas envolvendo o uso de tais equipamentos. Estes autores afirmam que embora os tomógrafos computadorizados de raios gama forneçam apenas imagens com resolução milimétrica, a sua vantagem reside no fato de ser possível trabalhar com amostras com dimensões superiores a 10 cm de comprimento, utilizando-se fontes de ¹³⁷Cs. Ainda segundo os autores, estes tomógrafos apresentam a desvantagem de não possibilitar a investigação de distribuições de tipos e tamanhos de poros, mas são eficientes para inferir sobre modificações da porosidade da amostra, com base em valores médios de densidade.

Borges e Pires (2012) apresentam um estudo a respeito da definição da AER, para medidas da densidade de amostras de torrão de solo, a partir de dados obtidos via TC de raios gama, adotando-se o método do torrão parafinado (MTP) como método padrão. Neste

trabalho, foram analisadas 18 amostras de torrão de um solo do tipo argiloso, classificado como Nitossolo Vermelho, coletadas na camada superficial (0-15 cm) do solo, sendo que o volume de tais amostras variava de 50 a 100 cm³. Nas imagens tomográficas investigadas, foram selecionadas áreas quadrangulares concêntricas a um pixel central, até a maior área delimitada no interior da amostra, sem a influência das bordas e também uma área de contorno irregular abrangendo praticamente toda a imagem, denominada área livre (AL). A densidade do solo foi determinada para cada uma das áreas mencionadas e os critérios estabelecidos pelos referidos autores para a determinação da AER, como uma função de ρ_s , foram os seguintes: i) Desvio relativo do valor médio de ρ_s entre a última e cada uma das áreas não superior a 5%, 4%, 3%, 2% e 1%; ii) Que pelo menos três áreas consecutivas não apresentassem valores de ρ_s diferentes, de acordo com o critério de variação do item i.

Borges e Pires (2012) apontam que a maioria dos valores de ρ_s obtidos pelo MTP superestimavam os obtidos via TC, embora houvesse uma tendência notável dos valores médios de ρ_s (TC) àqueles obtidos pelo método padrão, ρ_s (MTP), com o aumento da área de estudo. Os autores observaram que, em amostras consideradas mais homogêneas a partir de uma análise qualitativa das imagens tomográficas, a AER é atingida rapidamente para todos os critérios de variação. Entretanto, para o desvio de 2% e 1%, somente 72% e 22% das amostras atingiram a AER, respectivamente. De acordo com os autores citados, isto se deve ao fato de que algumas amostras eram menores com relação às outras e, portanto, o número de áreas selecionadas no seu interior era menor, de modo que o tamanho das áreas selecionadas não foi suficiente para que as variações ocorressem dentro do critério estabelecido. O critério adotado nesse trabalho como referência para determinação da AER foi o de 4% e, assim, concluiu-se que amostras com seção transversal de área igual a 640,1 mm² fornecem valores representativos de densidade de amostras de torrão do solo analisado.

No estudo realizado por Borges, Pires e Pereira (2012), referente à estimativa de AER para medidas de porosidade (ϕ) do solo, foram utilizadas as mesmas amostras e imagens tomográficas relacionadas no trabalho de Borges e Pires (2012). A diferença na metodologia empregada em Borges, Pires e Pereira (2012) se dá, em princípio, na etapa de conversão das matrizes de dados de UTs, as quais, nesse caso, foram convertidas em matrizes de dados de ϕ . Repetiu-se também o processo de seleção de áreas bem como de cálculo da variável de interesse, ϕ , para cada uma delas.

Levando em consideração o critério usado por VandenBygaart e Protz (1999), Borges, Pires e Pereira (2012) adotaram os seguintes critérios de análise para a definição da

AER, como uma função de ϕ : i) determinação da frequência dos valores de ϕ dentro de cada área; ii) elaboração de gráficos representando a distribuição da frequência de ϕ (%) para cada área; iii) determinação da largura a meia altura (FWHM) destas distribuições, as quais foram submetidas a ajustes Gaussianos; iv) determinação dos desvios relativos entre os valores de FWHM correspondentes a distribuição de ϕ para a última área retangular e cada uma das áreas anteriores; v) a AER para a ϕ é atingida quando três áreas consecutivas não apresentam desvios maiores que 10%; vi) elaboração de gráficos dos valores de FWHM para cada área das amostras (inclusive pra a AL) com a indicação da área para a qual a AER foi atingida.

As curvas de distribuição de ϕ , obtidas no trabalho supracitado, exibem certa variabilidade nos limites inferior e superior, o que, segundo os autores, têm influência desprezível sobre os valores de FWHM. Além disso, o coeficiente de determinação obtido para cada uma das distribuições indicou uma boa concordância entre os dados. De acordo com os critérios adotados, somente 14 das 18 amostras atingiram a AER para a ϕ e isto foi associado à variabilidade espacial apresentada por esta propriedade física. Borges, Pires e Pereira (2012) concluíram que amostras com uma seção de área de pelo menos 882,1 mm² fornecem valores representativos de ϕ para o solo estudado.

Poucos são os trabalhos encontrados na literatura que abordem a estimativa de MERs, especialmente de AERs, para amostras de solo indeformadas. No Brasil, os primeiros trabalhos envolvendo estudos com este viés, por meio de análise de imagens tomográficas, são recentes (BORGES; PIRES, 2012; BORGES; PIRES e PEREIRA, 2012). Nos trabalhos desses últimos autores foram feitas análises da AER e medidas de densidade e distribuição de poros do solo. Essas medidas foram realizadas em amostras coletadas na forma de torrão para um único tipo de solo. Porém, o presente trabalho envolve análises da AER para medidas de densidade do solo de amostras coletadas em anéis volumétricos. A importância desse tipo de estudo reside no fato de que amostras coletadas em anéis podem apresentar deformações em sua estrutura afetando a qualidade das medidas de densidade. Por esse motivo se torna importante uma análise de tamanhos elementares representativos para amostras coletadas em anéis volumétricos. Nesse trabalho também foram analisados três diferentes solos representando importantes grupos largamente empregados na produção agrícola brasileira. Dois novos esquemas para definição da AER também foram abordados.

2. OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa possui como objetivo principal:

- Utilizar a técnica de tomografia computadorizada (TC) de raios gama como técnica auxiliar para a definição de áreas elementares representativas (AERs) em medidas de densidade de amostras de solo coletadas em anéis volumétricos.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Analisar se solos com diferentes classes texturais irão apresentar diferentes valores de AER;
- Verificar possíveis diferenças na definição da AER quando se utiliza os valores de densidade do solo obtidos pelo método do anel volumétrico como referência e a densidade obtida pelo método da TC como referência;
- Avaliar se diferentes esquemas de construção de área adjacentes na imagem tomográfica irão apresentar distintos valores de AER;
- Desenvolver novos critérios para a definição da AER baseados nos resultados que utilizam os métodos do anel volumétrico e da TC como referência.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. COLETA DAS AMOSTRAS

Primeiramente, é importante frisar que os dados e as amostras utilizadas no presente trabalho são provenientes de um banco de dados relacionado ao trabalho de tese de Pires (2006). A seguir são apresentadas informações, detalhes das técnicas empregadas e procedimentos essenciais para o entendimento do estudo realizado.

Amostras de três solos, com texturas diferentes, caracterizados como: latossolo vermelho-amarelo (LVA), nitossolo vermelho (NV) e latossolo vermelho escuro (LVE), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (EMBRAPA, 2006), foram coletadas, nos anos de 2005-2006, nas Fazendas Sertãozinho (LVA) e Areão (NV) (USP/ESALQ) e na Fazenda do IAC (LVE), situadas em Piracicaba (22°4' S; 47°38' O; 580 m acima do nível do mar). Dezoito amostras (3,0 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno e volume aproximado de 55 cm³), seis para cada solo, foram coletadas na camada superficial do solo (0-10 cm) usando-se anéis volumétricos. A Tabela 1 apresenta algumas características físicas dos três mencionados. De acordo com o diagrama triangular de classificação textural do solo (REICHARDT; TIMM, 2004), o solo LVA é classificado como um solo Franco Argilo Arenoso (textura média), o LVE e NV como solos Argilosos.

Tabela 1: Características físicas da camada de 0 – 10 cm para o latossolo vermelho amarelo (LVA), nitossolo vermelho (NV), latossolo vermelho escuro (LVE).

Característica	LVA	NV	LVE
Areia (%)	66	24	26
Silte (%)	6	33	26
Argila (%)	28	43	48
Densidade de partícula (g.cm⁻³)	2,55	2,68	2,54

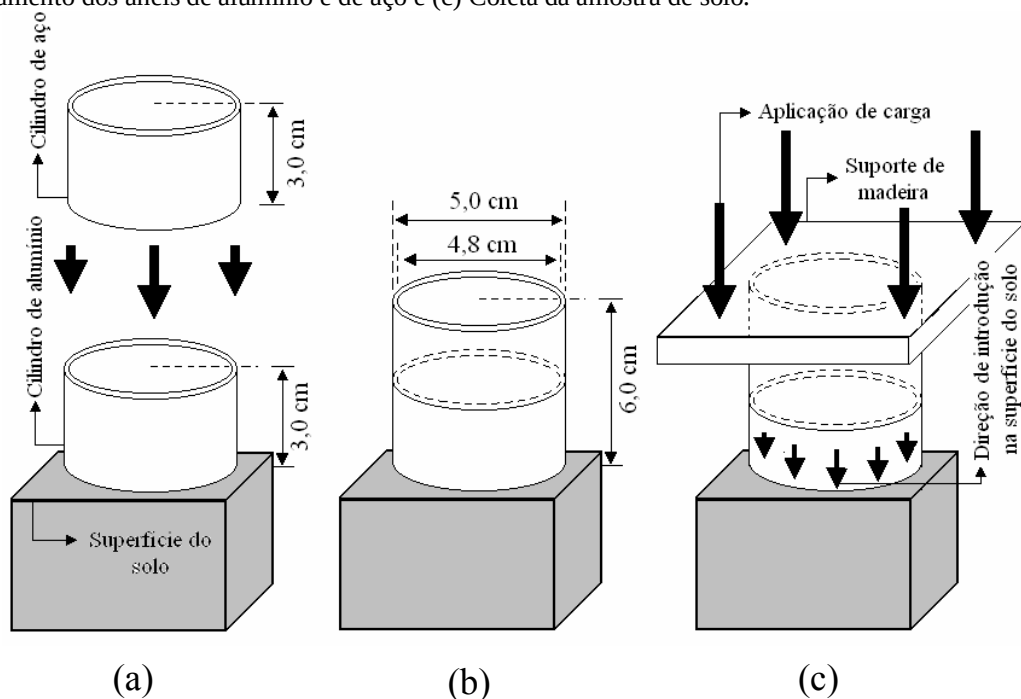
Fonte: (Pires; Bacchi e Reichardt, 2004)

A fim de garantir que as amostras coletadas estariam livres de possíveis raízes mortas ou pedaços de objetos indesejáveis, realizou-se uma limpeza prévia da área onde se introduziram os anéis. Buscou-se atenuar os efeitos da variabilidade espacial do solo coletando-se amostras espaçadas por poucos centímetros umas das outras. Uma vez posicionados na camada superficial, os anéis foram introduzidos alguns poucos milímetros no solo, evitando-se inclinações, as quais poderiam tornar a amostragem problemática no que se refere, por exemplo, à compactação da amostra devido às dimensões do anel volumétrico (PIRES et al., 2004).

Para evitar o problema de compactação, uma pequena tábua plana foi posicionada sobre a parte superior do anel, onde foram desferidos golpes com o auxílio de um martelo de borracha. Após o anel penetrar estes poucos milímetros na superfície do solo, um segundo anel de aço semelhante ao primeiro, porém com as bordas um pouco mais largas, foi posicionado acima deste (Figura 2). Uma vez alinhados os dois anéis, o conjunto foi lentamente introduzido, com o auxílio do martelo de borracha, desferindo-se golpes sobre a tábua plana, até que o primeiro anel, no qual a amostra de solo foi coletada, estivesse a aproximadamente 3 cm da superfície do solo.

Após o procedimento de inserção dos anéis, com o auxílio de uma pequena espátula, o primeiro anel foi retirado por meio de escavações cautelosas em torno deste, tomando-se o devido cuidado para que não houvesse sobras em suas extremidades. Posteriormente, o excesso de solo foi removido em laboratório a fim de que o volume da amostra fosse igual ao volume interno do anel volumétrico.

Figura 2: Diagrama esquemático do procedimento de amostragem. (a) Anéis volumétricos de alumínio e aço; (b) Acoplamento dos anéis de alumínio e de aço e (c) Coleta da amostra de solo.



Fonte: Pires, 2006.

3.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO

As amostras coletadas em anel volumétrico foram submetidas a dois métodos para determinação da sua densidade: método do anel volumétrico (AV) e baseado na tomografia computadorizada.

3.2.1 Método do Anel Volumétrico (MAV)

Dentre os métodos de determinação da densidade do solo, o do anel volumétrico é o método de maior utilização e também é considerado padrão. Este método consiste na amostragem do solo com estrutura indeformada num anel (cilindro metálico) de massa e volume conhecidos. Um aspecto importante refere-se à amostragem. Na retirada do anel volumétrico, deve-se tomar o cuidado para não compactar a amostra e para preencher todo o espaço do anel com solo (PIRES; ROSA; TIMM, 2011).

O procedimento realizado foi adaptado de EMBRAPA (1997) e consistiu nos seguintes passos:

- a) Determinou-se o volume do anel que continha a amostra;
- b) A massa do conjunto (anel + amostra) foi medida;
- c) A massa da amostra seca foi obtida por pesagem em balança analítica, após remoção da umidade em estufa a 105°C por 24 h;
- d) Calculou-se a densidade do solo (ρ_s – AV) pela seguinte relação:

$$\rho_s = \frac{m_{amostra\ seca}}{V_{anel}}. \quad (1)$$

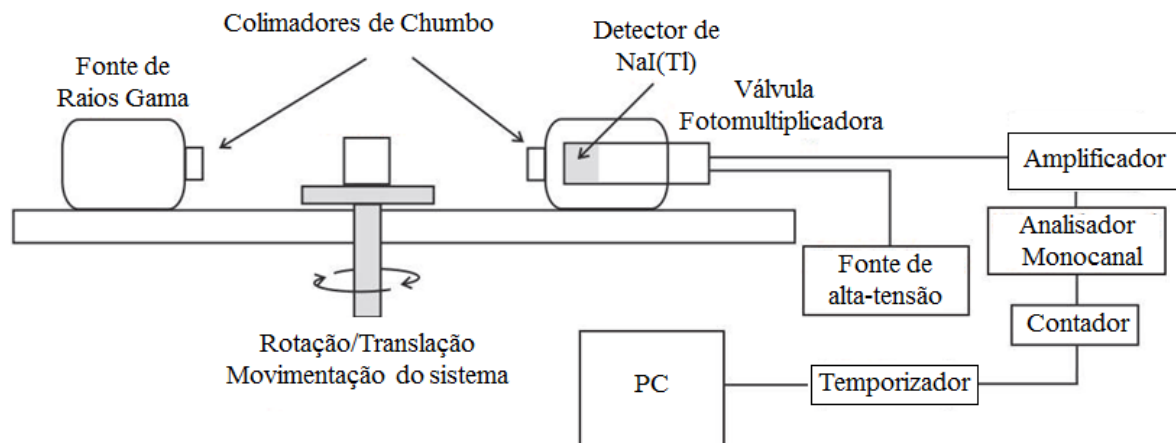
3.2.2 Método da Tomografia Computadorizada (MTC)

3.2.2.1 Sistema Tomográfico

O sistema tomográfico usado neste trabalho é de primeira geração com um arranjo de fonte e detector fixos, com movimentos de rotação e translação da amostra (Figura 3). O tomógrafo foi montado a partir da compra das fontes radioativas, blindagem, módulos da eletrônica e mesa de medida. Os programas responsáveis pelo controle do módulo responsável pela rotação e translação das amostras e reconstrução da imagem foram desenvolvidos pelos técnicos da EMBRAPA/CNPDI (São Carlos, SP). A fonte radioativa é de ²⁴¹Am, cuja atividade é de aproximadamente 3,7 GBq e emite fótons monoenergéticos de 59,54 keV. A detecção dos fótons gama é feita através de um detector de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. Colimadores de chumbo com dimensões de 1,0 mm e 4,5 mm

de diâmetro foram fixados na saída da fonte e na entrada do detector, respectivamente, com a finalidade de evitar a detecção de fótons secundários.

Figura 3: Esquema do sistema tomográfico localizado no Laboratório de Física dos Solos do CENA/USP.



Fonte: Adaptado de Pires et al. (2011a).

O tamanho de “pixel” obtido, que corresponde à resolução das imagens, foi de 1,1 x 1,1 mm, o qual foi calculado pela razão entre o diâmetro interno da amostra de solo e o número de “pixels” da matriz de reconstrução. Os passos angulares das amostras de solo foram de 2,25° até uma varredura de 180°, com passos lineares de 0,11 cm.

De acordo com Crestana et al. (1992), a cada combinação de um movimento de rotação e translação, são feitas as contagens num tempo determinado (segundos ou minutos) do feixe colimado que chega ao detector, após interagir com o objeto; neste caso com a amostra de solo. Cada fóton que chega ao detector gera um pulso proporcional à sua energia. Um sistema nuclear composto de pré-amplificador, amplificador, analisador monocanal, contador e temporizador conta os pulsos e os armazena na memória de um microcomputador.

3.2.2.2 Calibração do sistema tomográfico

A tomografia computadorizada por transmissão de raios X ou gama é uma técnica que fornece imagens de seções transversais de objetos através do princípio da atenuação da radiação nos meios materiais (CRESTANA et al., 1992). A determinação de propriedades físicas do solo como a densidade e a umidade através da TC depende da calibração deste sistema, que consiste basicamente em se encontrar a relação existente entre as unidades tomográficas (UT) e os coeficientes de atenuação linear (μ) para alguns materiais “homogêneos” (PIRES et al., 2011b; PIRES et al., 2004).

Na calibração do tomógrafo foram utilizadas amostras dos seguintes materiais homogêneos: acrílico, etanol, água, nylon e glicerina. As amostras líquidas foram acondicionadas em caixas de acrílico. A amostra de álcool (C_2H_5OH) apresentava 99,3% de pureza e a amostra de glicerina ($C_3H_5(OH)_3$) apresentava 87% de pureza. A água usada era destilada. O tempo total gasto por amostra usada na calibração para realização das tomografias foi de 101 h (peça de acrílico), 62 h (água destilada), 44 h (álcool), 71 h (peça de nylon) e 50 h (glicerina). As amostras foram mantidas fixas na mesa de medidas com o auxílio de fita adesiva. Somente uma varredura por amostra foi realizada (PIRES et al., 2011b, CRESTANA et al., 1992).

O valor médio de μ , para cada material, é determinado diversas vezes em posições distintas. As matrizes de dados, responsáveis por gerar imagens 2D de seções transversais centrais das amostras destes materiais, fornecem os valores de UTs. O valor médio de UT, adotado para cada material que se deseja utilizar na calibração do equipamento, é obtido a partir da seleção de uma matriz contida na matriz original, escolhida longe das bordas das amostras para se evitar artefatos (Figura 4). Uma vez obtidos todos os coeficientes de atenuação linear e as unidades tomográficas para os respectivos materiais, elabora-se um gráfico de UT versus μ . Uma descrição detalhada do processo de calibração de sistemas tomográficos de primeira geração pode ser encontrada no trabalho de Crestana et al. (1992).

Figura 4: Esquema de uma matriz de unidades tomográficas (UT). Os números destacados em vermelho representam a matriz selecionada para a determinação do valor médio de UT dos materiais usados na calibração do tomógrafo. Os números 0 representam a atenuação pelo ar e os números 80 a atenuação pelas bordas do recipiente que possam conter as amostras.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	80	80	80	80	80	80	80	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	80	80	80	80	80	80	80	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Pires (2006)

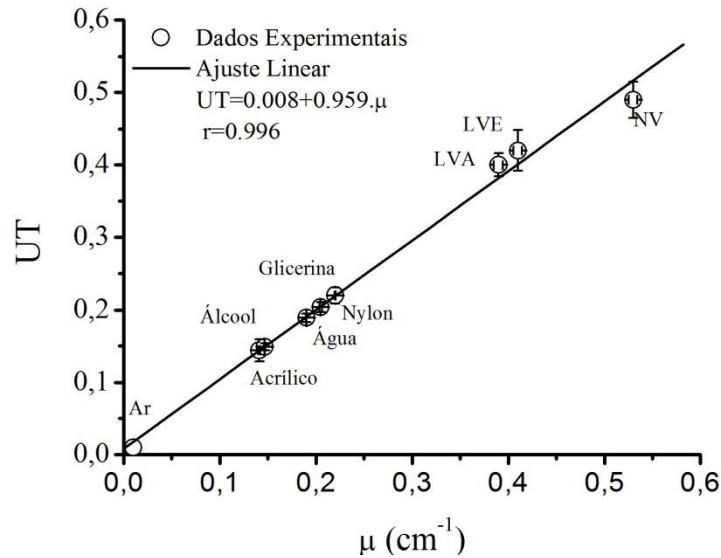
Na calibração, encontra-se uma relação linear entre a UT e o μ do material que está sendo submetido à tomografia:

$$UT(E_\gamma) = \alpha \cdot \mu(E_\gamma), \quad (2)$$

onde α (coeficiente angular) é obtido na correlação entre as diferentes UTs e μ dos materiais usados na calibração.

A curva de calibração obtida para o sistema tomográfico de primeira geração é apresentada na Figura 5. Nota-se um alto coeficiente de correlação ($r=0,99$), o qual é de suma importância para garantir a confiabilidade dos dados tomográficos.

Figura 5: Gráfico dos dados de unidades tomográficas (UT) obtidos nas medidas de TC, para fótons de ^{241}Am , dos materiais (água, álcool, “nylon”, acrílico, glicerina e amostras dos solos LVA, LVE e NV) usados na calibração do sistema em função de seus respectivos coeficientes de atenuação linear (μ).



Fonte: Pires et al. (2011b)

3.2.2.3 Coeficiente de Atenuação

A relação entre os fótons transmitidos através de um determinado meio homogêneo e sem a presença do mesmo é dada pela lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{(-\mu x)} . \quad (3)$$

Quando o meio é composto de regiões de espessura e coeficientes de atenuação linear diferentes, a lei de Beer-Lambert passa a ser escrita como:

$$I = I_0 e^{-\sum_{j=1}^n \mu_j x_j} . \quad (4)$$

Para o solo, considerando-se somente as fases sólida e líquida, uma vez que o ar tem contribuição insignificante, obtém-se:

$$I = I_0 e^{-x(\mu_{ms}\rho_s + \mu_{mag}\rho_{ag}\theta)} , \quad (5)$$

onde μ_{ms} e μ_{mag} (cm^2g^{-1}) são os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, respectivamente, ρ_s (g cm^{-3}) a densidade do solo e θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) a umidade volumétrica.

Para a avaliação do coeficiente de atenuação de massa (μ_m), do solo e da água, procedeu-se da seguinte maneira:

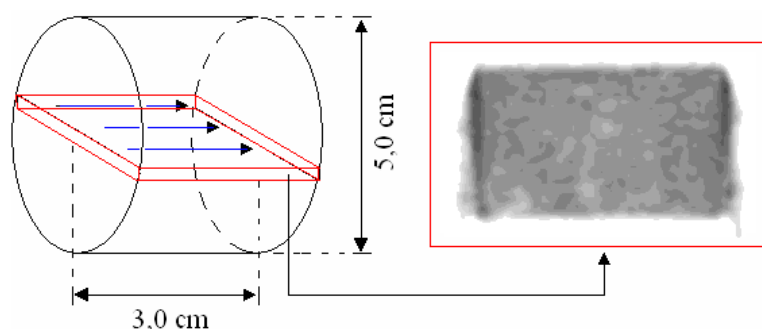
- As amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C e passadas em peneira com malha de 2,0 mm;
- O solo foi transferido para uma caixa com dimensões de 4,9 cm x 5,1 cm x 5,5 cm, a qual possuía finas paredes de acrílico;
- As intensidades dos fótons monoenergéticos, com energias de 59,54 keV, foram obtidas em três posições diferentes da caixa de acrílico, com cinco repetições para cada posição;
- μ_{ms} foi calculado dividindo-se μ_s pelo valor de ρ_s referente a cada amostra, a qual, por sua vez, foi determinada por meio da razão entre a massa de solo contida na caixa de acrílico e o volume interno da mesma;
- μ_{mag} foi calculado dividindo-se μ_{ag} pelo valor de ρ_{ag} ($1,00 \text{ gcm}^{-3}$).

Os valores dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para cada solo e para a água, μ_{ms} e μ_{mag} , foram de $0,24922 \pm 0,00001$ (LVA), $0,3064 \pm 0,0003$ (LVE) e $0,328 \pm 0,003$ (NV) e $0,1989 \pm 0,0007 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (água). Tais valores estão em concordância com aqueles encontrados na literatura, como em Ferraz e Mansell (1979).

3.2.2.4 Procedimentos para a Aquisição das Imagens Tomográficas

Neste trabalho, as amostras de solo foram coletadas em anéis volumétricos como descrito anteriormente e as imagens tomográficas das amostras foram obtidas ao longo de sua profundidade com o feixe passando ao longo de sua região central (Figura 6).

Figura 6: Imagem esquemática para um cilindro (anel volumétrico) com volume aproximado de 55 cm^3 . A região em vermelho na parte central do cilindro representa a fatia ao longo da profundidade da amostra de solo varrida pelo feixe de radiação gama (setas azuis), que por sua vez fornece a imagem tomográfica apresentada ao lado direito.



Fonte: Pires (2006).

Uma imagem obtida pela técnica da TC nada mais é que um mapa de coeficientes de atenuação de uma dada seção da amostra. Para uma mesma amostra de solo atravessada por um feixe de radiação monoenergético, tais coeficientes de atenuação lineares são dependentes da densidade e umidade. Neste caso é dispensável a determinação da espessura da amostra, obtendo-se uma distribuição bidimensional da densidade e da umidade da amostra de solo, numa dada seção previamente escolhida (CRESTANA et al., 1992).

No caso do solo, a UT é resultante da contribuição das partículas minerais, da matéria orgânica, da água e do ar, fazendo com que o μ obtido para cada caminho cruzado pelo feixe de radiação seja diferente (PIRES et al., 2005). Sendo assim, quando o solo é considerado como meio absorvedor, a relação dada pela Equação (2) pode ser reescrita como:

$$UT = \alpha(\mu_{ms}\rho_s + \mu_{mag}\rho_{ag}\theta) . \quad (6)$$

Conhecendo-se os valores da equação anterior, com exceção da densidade, é possível determinar esse parâmetro físico por meio de:

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_{ms}} \left(\frac{UT}{\alpha} - \mu_{mag}\rho_{ag}\theta \right) . \quad (7)$$

Sendo assim, a matriz de dados de UT foi convertida em uma matriz constituída de valores de densidade e as imagens tomográficas foram reconstruídas a partir de ambas as matrizes (UT e ρ_s). A reconstrução das imagens tomográficas se deu por meio dos programas Microvis (2000), desenvolvido pela EMBRAPA/CNPDIA (São Carlos, SP), e Surfer (1997), desenvolvido pela Golden Software (Colorado, EUA). Neste trabalho, para a reconstrução das imagens tomográficas, adota-se uma escala de tons de cinza, na qual regiões mais escuras correspondem a maiores valores de densidade e de UT.

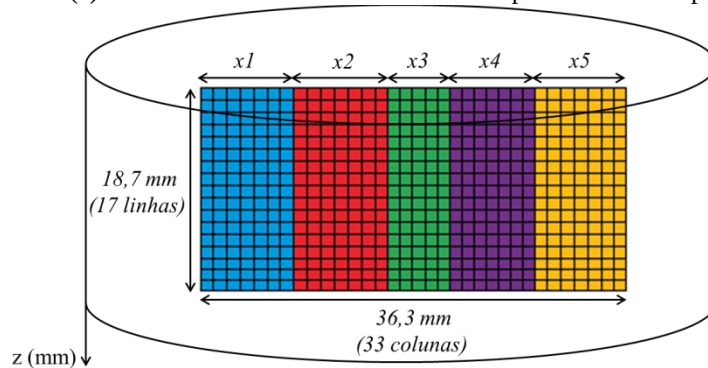
Delimitou-se então a maior área possível no interior da imagem tomográfica referente a cada amostra, a fim de evitar as regiões próximas às bordas do anel, e definiu-se a maior área em comum a todas elas. Vale ressaltar a importância de reconstruir as imagens tomográficas para todas as amostras, neste momento inicial, a fim de que a interferência das bordas seja de fato eliminada em todas as repetições, pois podem ocorrer pequenas variações recorrentes do processo de fixação da amostra na mesa de medidas do tomógrafo. As bordas são evitadas devido à possibilidade de existir artefatos na interface amostra-ar/amostra-alumínio, nas imagens, que afetam a análise de propriedades físicas de materiais via TC (CRUVINEL et al., 1990; KAK; SLANEY, 1999).

3.3 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA AER

Uma vez que a maior área comum a todas as amostras (equivalente a uma matriz de ordem 17 x 33) foi identificada e demarcada nas matrizes de UTs (80 x 80), as quais foram posteriormente convertidas em matrizes de ρ_s , buscou-se analisar a variabilidade espacial deste parâmetro físico ao longo da profundidade (z) das amostras de solo. Para isso, a imagem tomográfica resultante foi separada em cinco diferentes divisões (x1, x2, x3 e x5), sendo quatro divisões com 7,7 mm somadas a uma divisão central com 5,5 mm (Figura 7).

Calculou-se o valor médio da ρ_s para as 17 espessuras das divisões mencionadas e, para cada divisão, foram elaborados gráficos da densidade em função da profundidade (z) das amostras. Estes gráficos foram construídos com a finalidade de auxiliar na interpretação conjunta dos dados qualitativos e quantitativos obtidos no presente estudo.

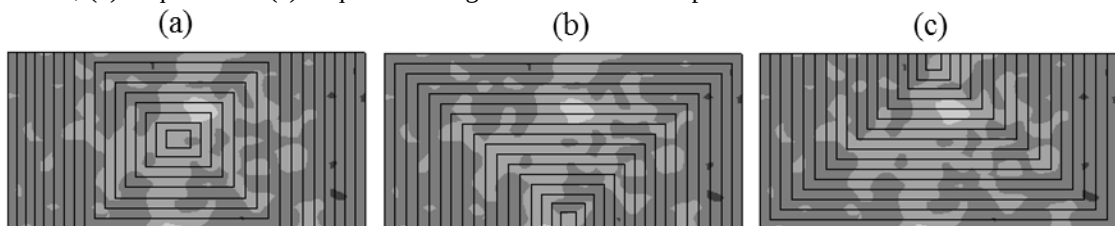
Figura 7: Divisões (x1...x5) feitas na imagem tomográfica para a análise da variabilidade da densidade em função da profundidade (z) das amostras de solo. O cilindro sobreposto indica sua posição em relação à imagem.



Fonte: A autora.

Para a determinação da AER em função ρ_s , foram selecionadas, nas imagens tomográficas, áreas partindo do centro (esquema 1), sem extrapolar a área máxima anteriormente selecionada (Figura 8a). Da mesma forma, foram também selecionadas áreas consecutivas partindo das bordas inferior (esquema 2) e superior (esquema 3) das amostras, respectivamente (Figura 8b,c). A ρ_s via TC foi determinada para cada área e corresponde à média aritmética dos valores ali contidos.

Figura 8: Esquemas de construção das áreas concêntricas e consecutivas sobre as imagens tomográficas: (a) Esquema 1, (b) Esquema 2 e (c) Esquema 3. Regiões mais escuras representam maiores valores de densidade.



Fonte: A autora.

As 18 amostras utilizadas apresentaram passos lineares fixos de 1,1 mm durante a varredura, de modo que a área inicial foi obtida, em todos os casos, a partir de uma matriz quadrada de ordem 1 x 1 (1,1 mm x 1,1 mm). As Tabelas 2 e 3 apresentam as medidas das áreas selecionadas concentricamente e a partir das bordas, respectivamente.

Tabela 2: Relação das áreas selecionadas de acordo com o esquema 1 adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER).

Área (mm ²)	Área (mm ²)	Área (mm ²)
01 → 1,1 x 1,1 = 1,2	07 → 14,3 x 14,3 = 204,5	13 → 27,5 x 18,7 = 514,3
02 → 3,3 x 3,3 = 10,9	08 → 16,5 x 16,5 = 272,3	14 → 29,7 x 18,7 = 555,4
03 → 5,5 x 5,5 = 30,3	09 → 18,7 x 18,7 = 349,7	15 → 31,9 x 18,7 = 596,5
04 → 7,7 x 7,7 = 59,3	10 → 20,9 x 18,7 = 390,8	16 → 34,1 x 18,7 = 637,7
05 → 9,9 x 9,9 = 98,0	11 → 23,1 x 18,7 = 432,0	17 → 36,3 x 18,7 = 678,8
06 → 12,1 x 12,1 = 146,4	12 → 25,3 x 18,7 = 473,1	--

Fonte: A autora.

Tabela 3: Relação das áreas selecionadas de acordo com o esquemas 2 e 3 adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER).

Área (mm ²)	Área (mm ²)	Área (mm ²)
01 → 1,1 x 1,1 = 1,2	07 → 14,3 x 7,7 = 110,1	13 → 27,5 x 14,3 = 393,3
02 → 3,3 x 2,2 = 7,3	08 → 16,5 x 8,8 = 145,2	14 → 29,7 x 15,4 = 457,4
03 → 5,5 x 3,3 = 18,2	09 → 18,7 x 9,9 = 185,1	15 → 31,9 x 16,5 = 526,4
04 → 7,7 x 4,4 = 33,9	10 → 20,9 x 11,0 = 229,9	16 → 34,1 x 17,6 = 600,2
05 → 9,9 x 5,5 = 54,5	11 → 23,1 x 12,1 = 279,5	17 → 36,3 x 18,7 = 678,8
06 → 12,1 x 6,6 = 79,9	12 → 25,3 x 13,2 = 334,0	--

Fonte: A autora.

A partir dos resultados obtidos via AV e TC, a determinação da AER em função de ρ_s , para os três diferentes esquemas de seleção de áreas, foi feita com base nos trabalhos de VandenBygaart e Protz (1999), Borges e Pires (2012) e Borges; Pires e Pereira (2012). A seguir, são listados os critérios adotados (itens a, b e c) e também as análises realizadas (itens d - f):

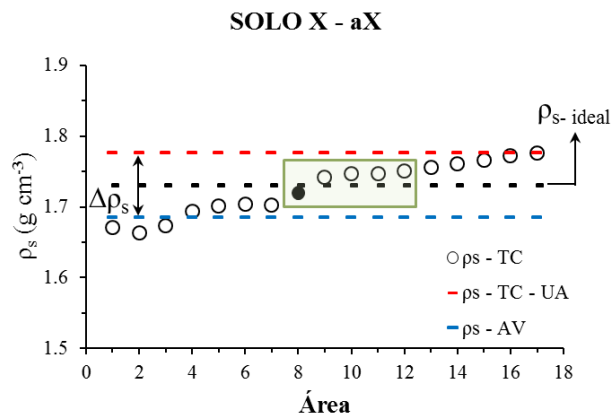
- Desvio relativo entre o valor médio de ρ_s obtido pelo AV e o valor obtido via TC para cada uma das áreas selecionadas na imagem tomográfica não superior a 10, 8, 6, 4 e 2%;
- Desvio relativo entre o valor médio de ρ_s obtido, via TC, para a última área (UA) selecionada na imagem tomográfica e aquele obtido para cada uma das demais áreas igualmente não superior a 10, 8, 6, 4 e 2%;
- Que pelo menos três áreas consecutivas não devem diferir entre si nos valores de ρ_s , utilizando os critérios de variação dos itens a e b;

Nos itens *a* e *b* o desvio relativo (DR) foi calculado como segue:

$$DR = \frac{(\rho_s \text{ via AV ou TC para UA}) - (\rho_s \text{ via TC para cada área})}{(\rho_s \text{ via AV ou TC para UA})} \quad (9)$$

- d) Elaboração de gráficos que evidenciem a variação dos valores de ρ_s em função das áreas para cada amostra. Tais gráficos foram duplicados e diferenciados com a inserção de uma linha de referência de acordo com os itens *a* e *b*. Consta também nestes gráficos a demarcação das áreas para as quais a AER foi atingida, de acordo com os critérios *a + c* e *b + c*, respectivamente;
- e) Elaboração de gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras que atingiram a AER para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2%, em função da área selecionada no interior da amostra;
- f) União dos critérios *a* e *b* (desconsiderando o critério *c* como um requisito) com o objetivo de estabelecer intervalos de áreas representativas que sejam válidos, simultaneamente, para ambas as técnicas utilizadas neste estudo. Nesse caso, somente o DR de 4% foi avaliado para ambos os critérios. Para essa análise, definiu-se o intervalo $\Delta\rho_s$ entre os valores de referência ($\rho_s\text{-TC}_{UA}$ e $\rho_s\text{-AV}$), bem como o valor de ρ_s correspondente ao valor médio desse intervalo ($\rho_{s\text{-ideal}}$). A área para a qual $\rho_s\text{-TC}$ mais se aproximava do valor médio de $\rho_{s\text{-ideal}}$ foi indicada como sendo um tamanho de área ótimo para ambas as técnicas, conforme a Figura 9.

Figura 9: Esquema ilustrativo para a definição de uma área ótima válida simultaneamente para o método do anel volumétrico e para a tomografia de raios gama, para uma amostra de um solo arbitrário.



Fonte: A autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DENSIDADE DO SOLO AVALIADA PELO MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO

Os valores de densidade encontrados para os solos LVA, LVE e NV, pelo método tradicional do anel volumétrico, foram, respectivamente, $1,67 \pm 0,07 \text{ g cm}^{-3}$, $1,33 \pm 0,06 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,64 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$. Os resultados estão coerentes com valores encontrados na literatura para esses tipos de solos na região onde foram coletadas as amostras (ROVERATTI, 2006; TIMM et al., 2006; TIMM et al., 2005; ARTHUR, 2005; FOLEGATTI et al., 2001).

Folegatti et al. (2001) realizaram um estudo de avaliação dos efeitos de cinco diferentes equipamentos de coleta de amostras na determinação da ρ_s do solo, para dois diferentes solos, sendo um deles um LVA (textura arenosa) e um NV (textura argilosa), coletados na mesma área experimental das amostras desse estudo. Os autores observaram que diferentes diâmetros de amostradores causam mudanças distintas na estrutura do solo. Para o solo de textura arenosa, os valores de ρ_s obtidos com a utilização de todos os equipamentos variou de 1,67 a $1,77 \text{ g cm}^{-3}$ estando esses valores condizentes com o encontrado no presente estudo.

Timm et al. (2005) realizaram um estudo de comparação entre os métodos de medida de densidade convencionais, sendo eles o método do torrão parafinado, método de anel volumétrico e os métodos nucleares como tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e sonda de superfície nêutron-gama. Foram utilizadas amostras coletadas na mesma região onde foram coletadas as amostras do solo NV do presente estudo. Os autores encontraram valores médios de ρ_s variando de 1,49 a $1,71 \text{ g cm}^{-3}$, em que estes valores mínimo e máximo correspondem aos diferentes métodos de medida de densidade.

Ainda na mesma área experimental do NV, Timm et al. (2006) realizaram um estudo de variabilidade espacial de umidade e densidade do solo. Esses autores analisaram uma transeção com 200 m de comprimento sendo obtidos 200 valores de ρ_s do solo para três diferentes épocas do ano. Os valores médios de ρ_s para cada época foram 1,53; 1,52 e $1,50 \text{ g cm}^{-3}$. No entanto, dentro da transeção foram encontrados valores de ρ_s em torno de $1,70 \text{ g cm}^{-3}$, cujo valor está próximo do valor médio encontrado no presente estudo. É importante frisar que existem solos de um mesmo tipo que apresentam texturas distintas e isso irá influenciar nos valores de densidade (HILLEL, 2004). Possíveis explicações para os resultados do NV podem ser compactação no processo de coleta e pelo tráfego de implementos agrícolas.

Arthur et al. (2005) trabalharam com amostras do solo LVE coletadas na mesma região onde foram coletadas as amostras do presente estudo. Esses autores encontraram valores de ρ_s próximos de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ estando estes próximos aos resultados obtidos no presente estudo.

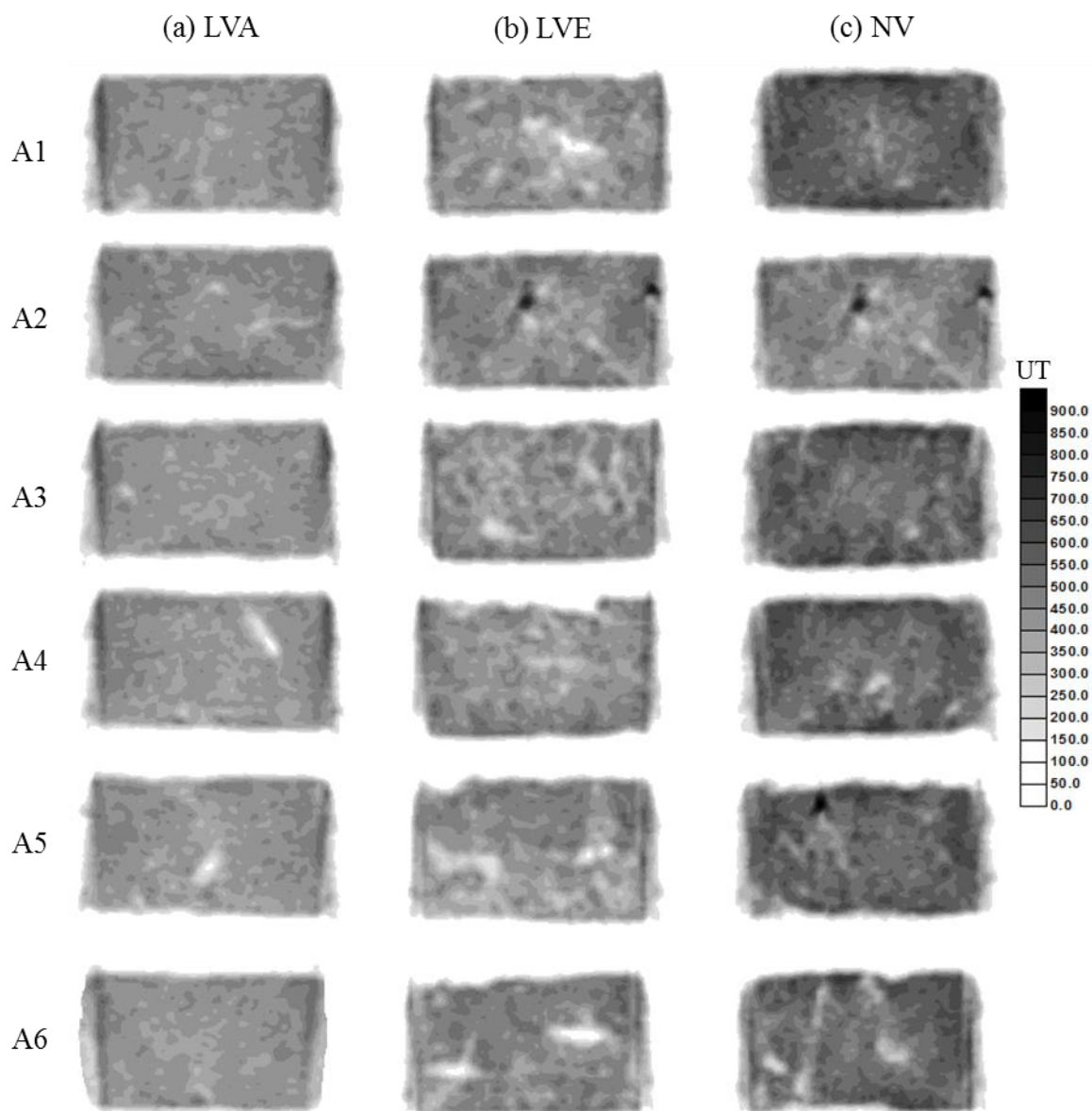
Rab et al. (2014), por meio de um estudo realizado com o uso da técnica de tomografia computadorizada de raios X, concluíram que, para um solo de textura similar àquela apresentada para o LVA, cuja amostragem se deu em tubos de PVC de 50 e 65 mm, não houve um aumento significativo de densidade próximo às bordas do cilindro conforme se esperava. No entanto, resultados contrários aos desses autores foram obtidos por Folegattiet al. (2001) e Pires et al. (2004).

Marcolin (2006) indica que os valores de ρ_s para solos arenosos pode variar de 1,30 a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto para os solos argilosos esta variação pode ir de 0,90 a $1,60 \text{ g cm}^{-3}$. Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004 apud MARCOLIN, 2006) apresenta para um solo argiloso, com umidade de $0,66 \text{ g g}^{-1}$, o valor de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que para um solo arenoso, com umidade de $0,32 \text{ g g}^{-1}$, um valor de $1,77 \text{ g cm}^{-3}$. Reinert (2001 apud SECCO, 2003) estabelece alguns valores críticos de densidade para solos sob compactação: horizonte de textura argilosa, com mais de 55% de argila = $1,45 \text{ g cm}^{-3}$; horizonte de textura média, com argila entre 20 e 55% = $1,55 \text{ g cm}^{-3}$; horizonte de textura arenosa, com menos de 20% de argila = $1,65 \text{ g cm}^{-3}$.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS

As imagens tomográficas referentes as 18 amostras estudadas são apresentadas na Figura 10. Nas imagens em escala de cinza, as regiões mais escuras indicam maiores valores de UT, as quais correspondem a maiores valores de coeficiente de atenuação.

Figura 10: Imagens tomográficas obtidas em escala de cinza para as amostras do solo (a) LVA (b) LVE (c) NV.



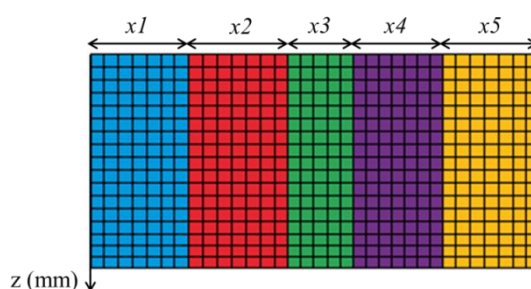
A partir da figura acima é possível avaliar a variabilidade espacial da estrutura de cada solo. Percebe-se que o solo de textura arenosa, como era de se esperar, apresenta uma estrutura mais homogênea em relação aos demais solos. Por sua vez, o solo LVE apresenta a maior heterogeneidade, contando com uma quantidade maior de vazios, em praticamente todas as amostras, provavelmente bioporos ou espaços deixados por raízes e minhocas. É importante frisar que as amostras do LVE foram coletadas em região de mata.

No interior das amostras 2 e 4, representativas do solo NV, nota-se a presença de pontos de alta densidade, pedregulhos, bem como no interior da amostra 2 para o solo LVE. Como as amostras foram coletadas na camada superficial (0-10 cm) é comum encontrar tais pedregulhos em seu interior. As bordas à esquerda e à direita das amostras apresentam uma região de densidade mais elevada, a qual é atribuída à atenuação do feixe de radiação pelas paredes do anel volumétrico utilizado na coleta das amostras.

4.3 DETERMINAÇÃO DA AER EM FUNÇÃO DE ρ_s PARA TRÊS DIFERENTES ESQUEMAS DE SELEÇÃO DE ÁREAS

Na Figura 12, e posteriormente nas Figuras 16 e 20, são apresentadas as imagens tomográficas com escala de cores, evidenciando a distribuição de densidades presente na região equivalente a maior área selecionada para as análises de AER, referentes, respectivamente, às seis amostras dos solos LVA, LVE e NV. Ao lado das imagens tomográficas, são apresentados os gráficos dos valores médios de ρ_s para cada divisão (x1, x2, x3, x4 e x5) – definidas na seção 3.3 e apresentadas novamente na Figura 11 - em função da profundidade (z) das respectivas amostras. As cores que representam as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 nesses gráficos estão de acordo com a Figura 11.

Figura 11: Divisões (x1, x2, x3, x4 e x5) feitas na imagem tomográfica para a análise da variabilidade da densidade em função da profundidade (z) das amostras de solo.



Pires; Bacchi e Reichardt (2004), em um estudo acerca dos efeitos de diferentes diâmetros de amostradores, usando TC de raios gama, concluíram que estes instrumentos de medida são responsáveis por compactar as amostras de solo e, por conseguinte, modificar a sua estrutura, o que se reflete em alterações significativas da densidade do solo. Os autores destacam que o menor efeito de compactação é causado por um amostrador de 5,3 cm de altura e 4,9 cm de diâmetro interno (100 cm³ de volume). O amostrador correspondente ao que foi utilizado no presente trabalho apresentou um grau de compactação intermediário sobre a amostra de solo, causando valores de ρ_s significativamente mais elevados no incremento de área selecionado próximo às suas bordas. No entanto, é importante frisar que o estudo

conduzido por esses autores foi em um solo de textura arenosa e que provavelmente diferentes texturas devem apresentar resultados distintos. Os métodos de amostragem também foram diferentes do utilizado no presente estudo.

De qualquer maneira, assim como realizado por Baveye et al. (2002), os possíveis artefatos gerados pela interface solo-ar ou solo-alumínio foram desconsiderados, visto que a maior área foi selecionada a alguns milímetros de distância das bordas laterais, superiores e inferiores de todas as amostras. Esta seleção acabou por desconsiderar, pelo menos parcialmente, a região que, segundo Pires et al. (2004), sofreria o maior efeito de compactação pelas paredes do anel volumétrico.

Os gráficos obtidos por meio do estudo da variação dos valores de densidade obtidos via tomografia ($\rho_s - TC$) em função dos diferentes tamanhos de áreas selecionadas, de acordo com os esquemas 1, 2 e 3 - definidos na seção 3.3 - são apresentados nas Figuras 13 – 15, 17 – 19, 21 – 23, referentes aos solos LVA, LVE e NV, respectivamente. Cada trio de figuras representa o esquemas de seleção de áreas a partir do centro (esquema 1), da face inferior (esquema 2) e da face superior (esquema 3), nesta sequência. A linha tracejada que aparece nos gráficos da coluna à esquerda - caso 1(a) -, em cada figura, é referente ao valor individual de densidade obtido pelo método do anel volumétrico ($\rho_s - AV$); à direita - caso 1(b) -, esta linha tracejada é associada ao valor de densidade obtido para a última área de cada amostra pela TC ($\rho_s - TC_{UA}$). Nos gráficos, a numeração das áreas de 1 a 17, para as áreas selecionadas a partir do centro e das faces (A01, A02,... A17), corresponde aos valores apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, as quais estão contidas nas figuras a seguir para facilitar a interpretação dos gráficos. As barras de erro apresentadas representam o desvio padrão da média, o qual foi obtido considerando os valores de ρ_s contidos em cada uma das áreas nas matrizes de dados.

Cada solo será analisado separadamente nesta primeira avaliação. Para tanto, os seguintes conjuntos de Figuras: 12 - 15 (LVA), 16 – 19 (LVE) e 20 - 23 (NV) serão intercalados por uma discussão a respeito dos resultados neles apresentados, cujo foco será a complementação entre os dados quantitativos e qualitativos obtidos neste estudo.

Figura 12: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo LVA. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo LVA.

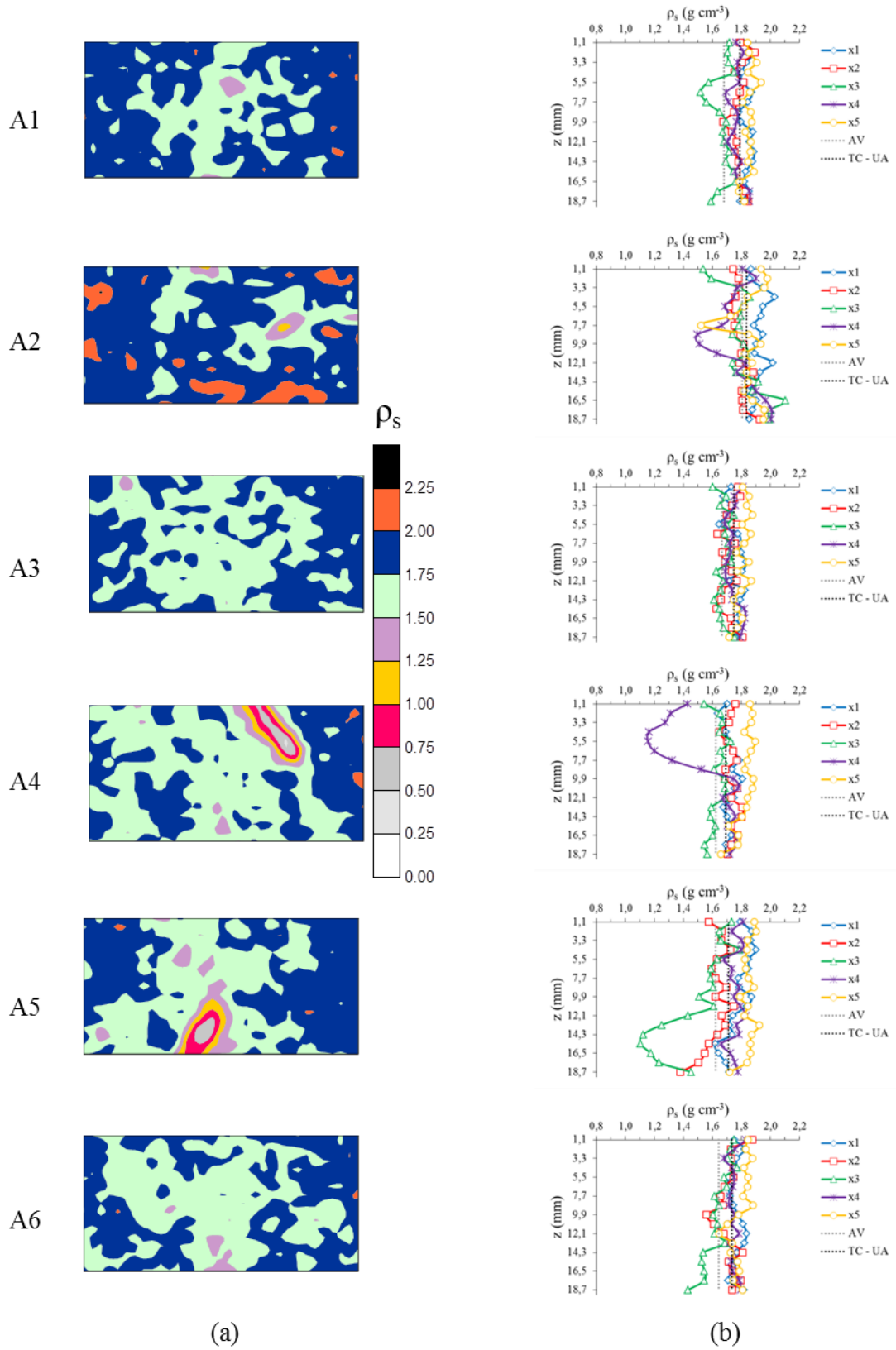


Figura 13: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.

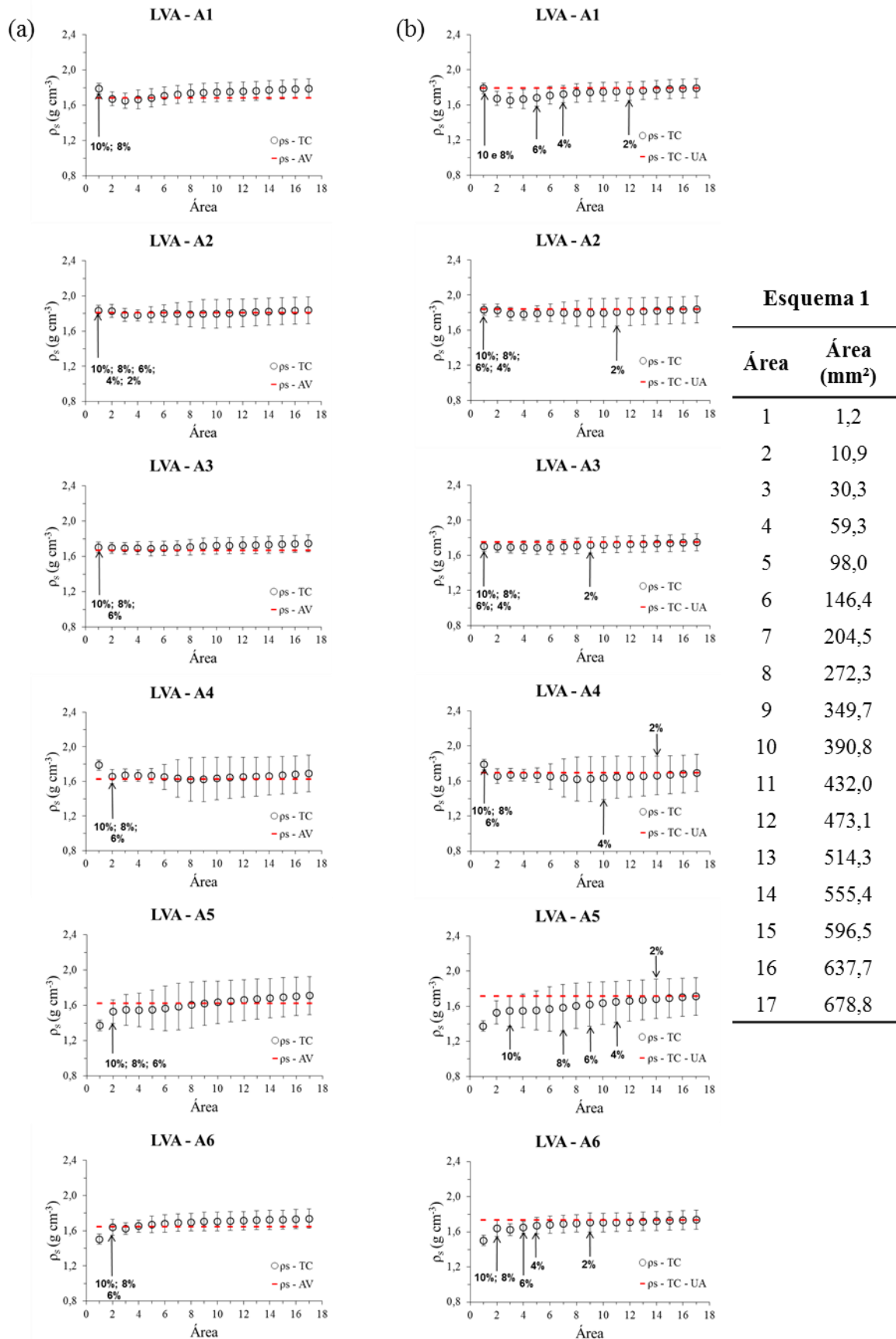


Figura 14: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.

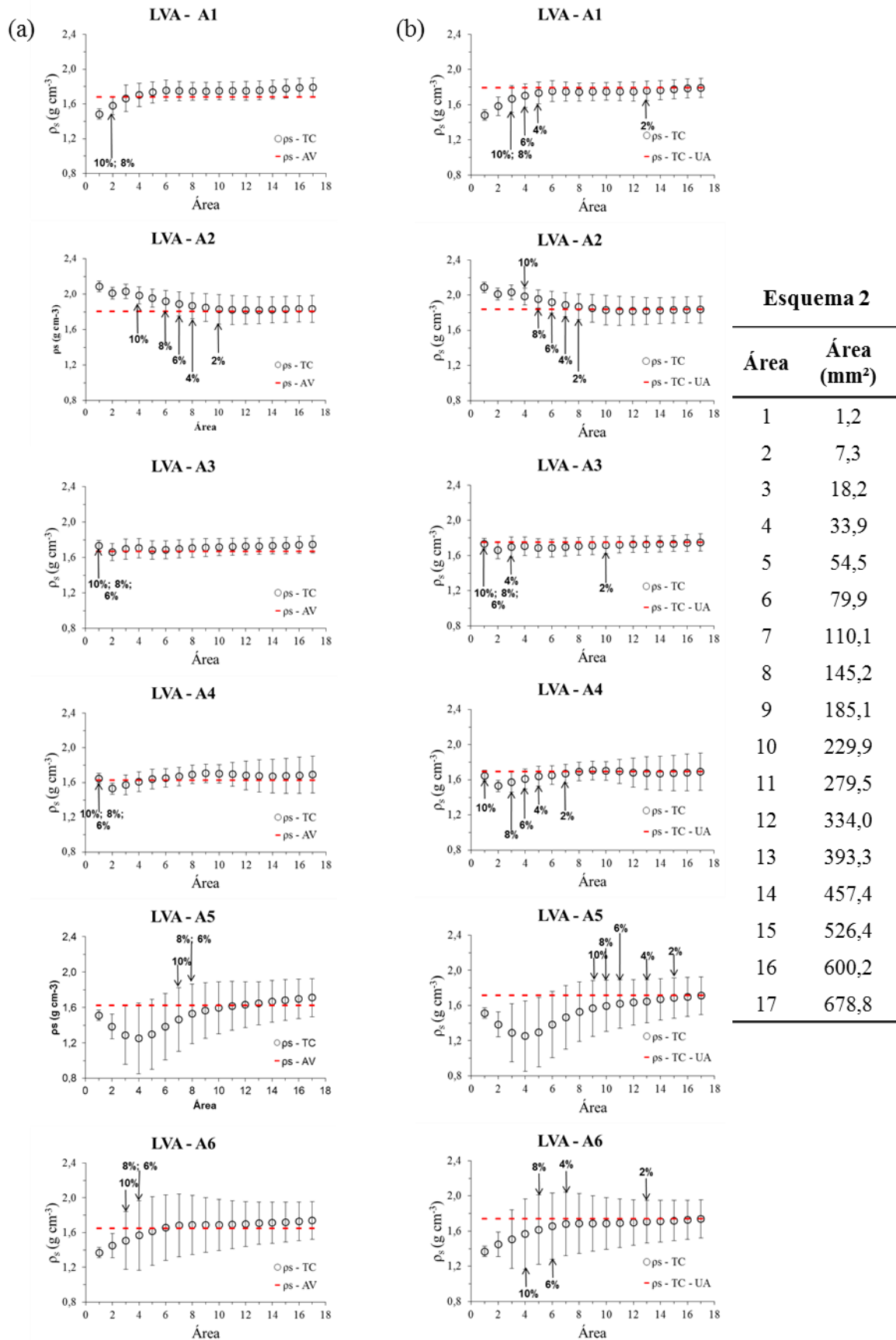
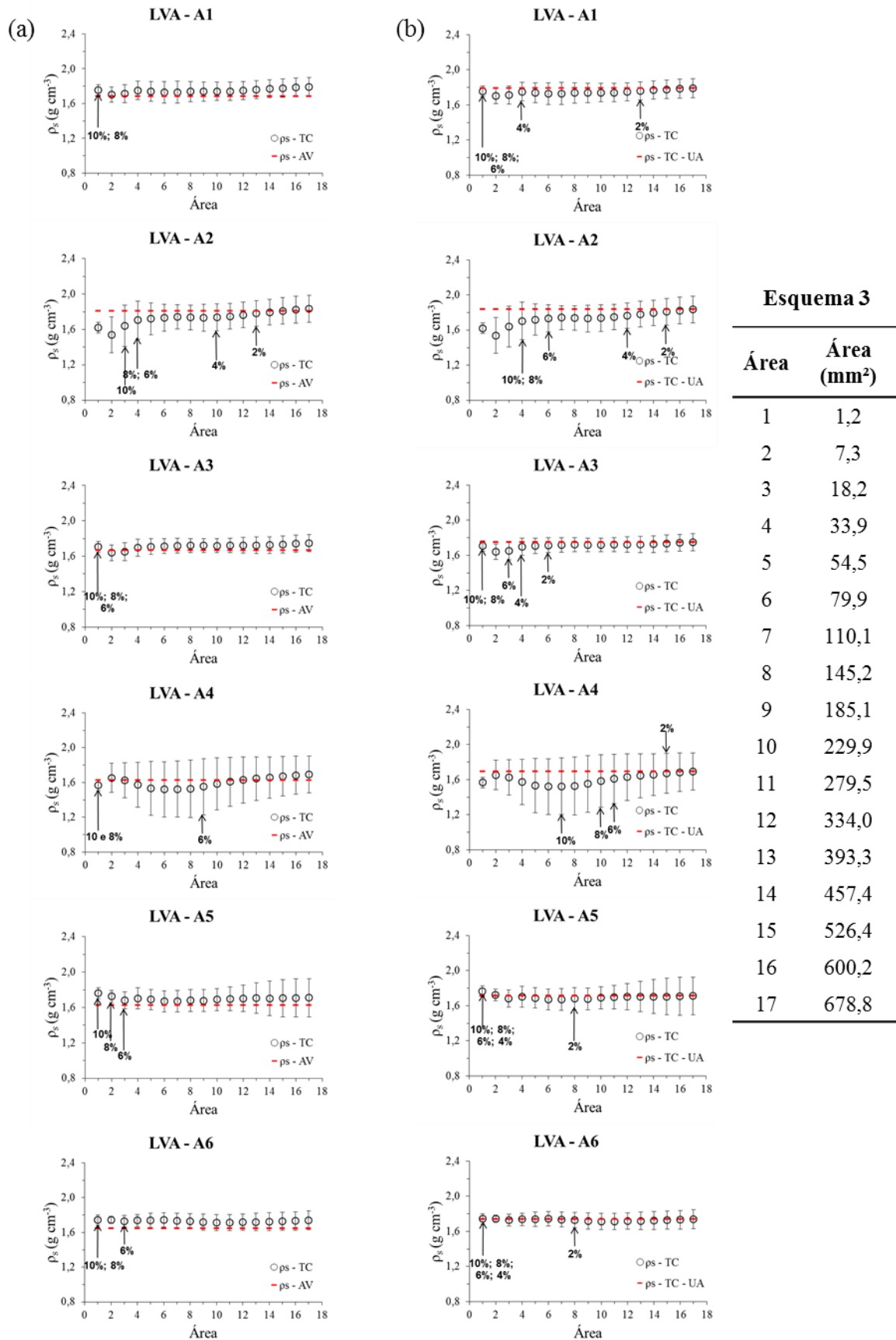


Figura 15: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVA, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.



Dentre as amostras do solo LVA, a partir das imagens tomográficas (Figura 12a), nota-se que a amostra 3 é a mais homogênea em comparação com as demais. O gráfico da Figura 12b, referente a esta mesma amostra, confirma esta homogeneidade por toda a sua extensão, uma vez que a ρ_s da amostra se comportou de maneira regular ao longo de sua profundidade, para todas as divisões. Ressalta-se que, neste caso, a homogeneidade é entendida como a distribuição espacial de densidades apresentada pela imagem.

Os gráficos referentes à amostra 3, apresentados nas figuras 12-14, também evidenciam esta característica homogênea pelo fato de exibirem o platô mais bem definido dentre os demais, para todos os casos estudados. Ainda assim, percebe-se que, no caso 1/2/3(a), a partir de uma determinada área, independente do esquema, os valores de $\rho_s - TC$ superestimam os valores de $\rho_s - AV$; ao contrário do que ocorre para os casos 1/2/3(b), em que os valores de $\rho_s - TC$ começam subestimados e se aproximam progressivamente de $\rho_s - TC_{UA}$. Este comportamento é observado em grande parte das amostras, para os três diferentes solos.

A homogeneidade da amostra 3 é verificada ainda pelo rápido alcance da AER para os critérios mais rigorosos, nos casos 1/2/3(b), em que o critério de 4% foi atingido nas áreas 1, 3 e 4, e o critério de 2% nas áreas 9, 10 e 6, respectivamente. O alcance da AER em uma área menor para o esquema 3 do que para o esquema 2, sugere que a parte superior desta amostra é ligeiramente mais homogênea que a sua parte inferior. Vale ressaltar que, os valores de $\rho_s - TC$ determinados por meio dos esquemas 2 e 3 apresentaram uma pequena oscilação, muito similar, nas áreas iniciais (4 primeiras áreas).

A amostra 6, que a primeira vista parece ser tão homogênea quanto a amostra 3, uma vez que as imagens tomográficas destas amostras são similares, é caracterizada por menores valores de ρ_s para as áreas iniciais determinadas pelos esquemas 1 e 2, mais acentuados para o esquema 2. Ainda assim, os desvios de 10, 8 e 6% são atingidos até a 4ª área, para os casos 1/2/3(a). Nos casos 1/2/3(b), a AER para os desvios de 4 e 2% são atingidas nas áreas 5, 7, 1 e 9, 13, 8, respectivamente. Isto sugere, novamente, que a região superior desta amostra é mais homogênea que a sua região inferior, o que se confirma pelo gráfico da Figura 12b, referente a amostra 6, onde é possível notar que a divisão central (x3) se destoa das demais na região inferior. Na imagem tomográfica da amostra 6, observa-se de fato a presença de pequenas regiões de menores densidades, na região inferior da divisão x3.

Os dados de $\rho_s - TC$ para a amostra 1 (Figuras 12-14) apresentam um comportamento semelhante ao da amostra 6, exceto pelo fato de que, nos casos 1/2/3(b), o critério de 2% foi atingido em áreas de tamanhos próximos, isto é, nas áreas 12, 13, 13,

respectivamente, indicando um grau de homogeneidade similar em todas as direções de crescimento das áreas. O gráfico da Figura 12b, da amostra 1, mostra uma pequena diferença entre a divisão x3 e as demais divisões, com relação ao comportamento dos valores de ρ_s ao longo da profundidade. Porém, para o crescimento de áreas por meio dos esquemas 1, 2 e 3, esta diferença não afetou os resultados significativamente.

Para a amostra 5, os dados de $\rho_s - TC$, nos esquemas 1 e 2, apresentam um comportamento razoavelmente semelhante para as maiores áreas, marcado por um crescimento progressivo destes valores, sem a presença de um platô marcante. Tais valores são inicialmente subestimados com relação a $\rho_s - AV$ e posteriormente passam a superestimá-lo. Este fato é visualizado pelo alcance progressivo das AERs associadas a cada um dos critérios. Já para o esquema 3, nota-se um platô bem definido confirmado pelo rápido alcance de todos os critérios. O critério de 2%, por exemplo, para os casos 1/2/3(b), foi atingido nas áreas 14, 15 e 8, indicando que a região superior desta amostra é significativamente mais homogênea que a região inferior. Esta característica se confirma pelo gráfico da Figura 12b, referente à amostra 5, o qual mostra que o comportamento da ρ_s ao longo da profundidade se diferencia principalmente para as divisões x2 e x3, a partir de 9,9 mm de profundidade, aproximadamente. Esta maior diferença observada ao longo da profundidade da amostra 5, se deve a presença de um macroporo na região inferior da mesma, que pode ser visualizado em sua respectiva imagem tomográfica (Figura 12a).

Um detalhe importante evidenciado no comportamento dos dados para a amostra 5 diz respeito ao fato de que, apesar de os esquemas 2 e 3 fornecerem uma ideia da distribuição de densidades ao longo da profundidade, eles o fazem por meio de áreas progressivamente maiores. Sendo assim, as áreas iniciais contam com valores de ρ_s locais e, à medida que aumentam, os valores mais próximos (e mais elevados) das bordas das imagens se equilibram com os mais baixos, elevando ou mantendo o valor médio da densidade. Ressalta-se que, dentre todos os casos estudados para o solo LVA, a área 9 foi a maior área para a qual o critério menos rigoroso (10%) foi atingido, indicando que a amostra 5 seria a mais heterogênea.

A amostra 2 apresenta um comportamento variável de acordo com o esquema adotado. Para o esquema 1, identifica-se um platô nítido, em concordância com ambos os valores de referência adotados nos casos (a e b), isto é, $\rho_s - AV$ e $\rho_s - TC_{UA}$. Para o esquema 2, nota-se que as primeiras áreas são associadas a maiores valores de $\rho_s - TC$ seguidas de um platô, também em concordância com as duas referências adotadas nos casos (a e b). Já para o esquema 3, observa-se uma oscilação nas primeiras áreas, seguida de um platô intermediário,

e de um tênue crescimento nas áreas finais. O platô intermediário não concorda com qualquer das referências utilizadas. O critério de 2%, para os casos 1/2/3(b) foi atingido nas áreas 11, 8 e 15, respectivamente, indicando uma homogeneidade maior na região inferior desta amostra, o que está de acordo com a sua respectiva imagem (Figura 12a). Em contraste com a amostra 5, que possuía um macroporo na sua região inferior, a amostra 2 é visualmente caracterizada por uma densidade mais elevada nesta região. Esta característica se confirma pelo gráfico da Figura 12b, referente à amostra 2, a partir do qual se conclui que os valores médios de ρ_s , obtidos para as divisões consideradas, são mais similares na região inferior da amostra do que na região superior.

Figura 16: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo LVE. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo LVE.

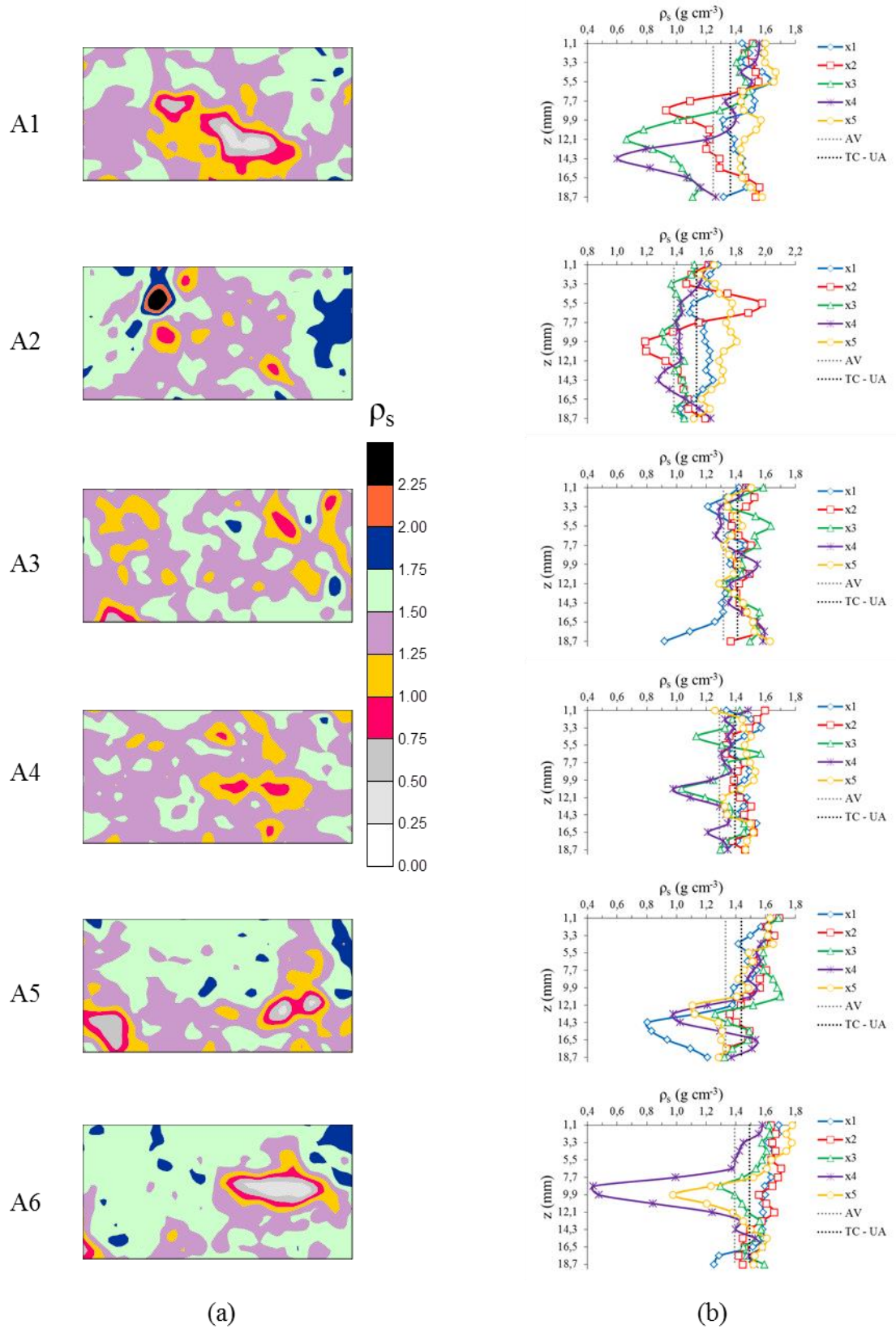


Figura 17: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.

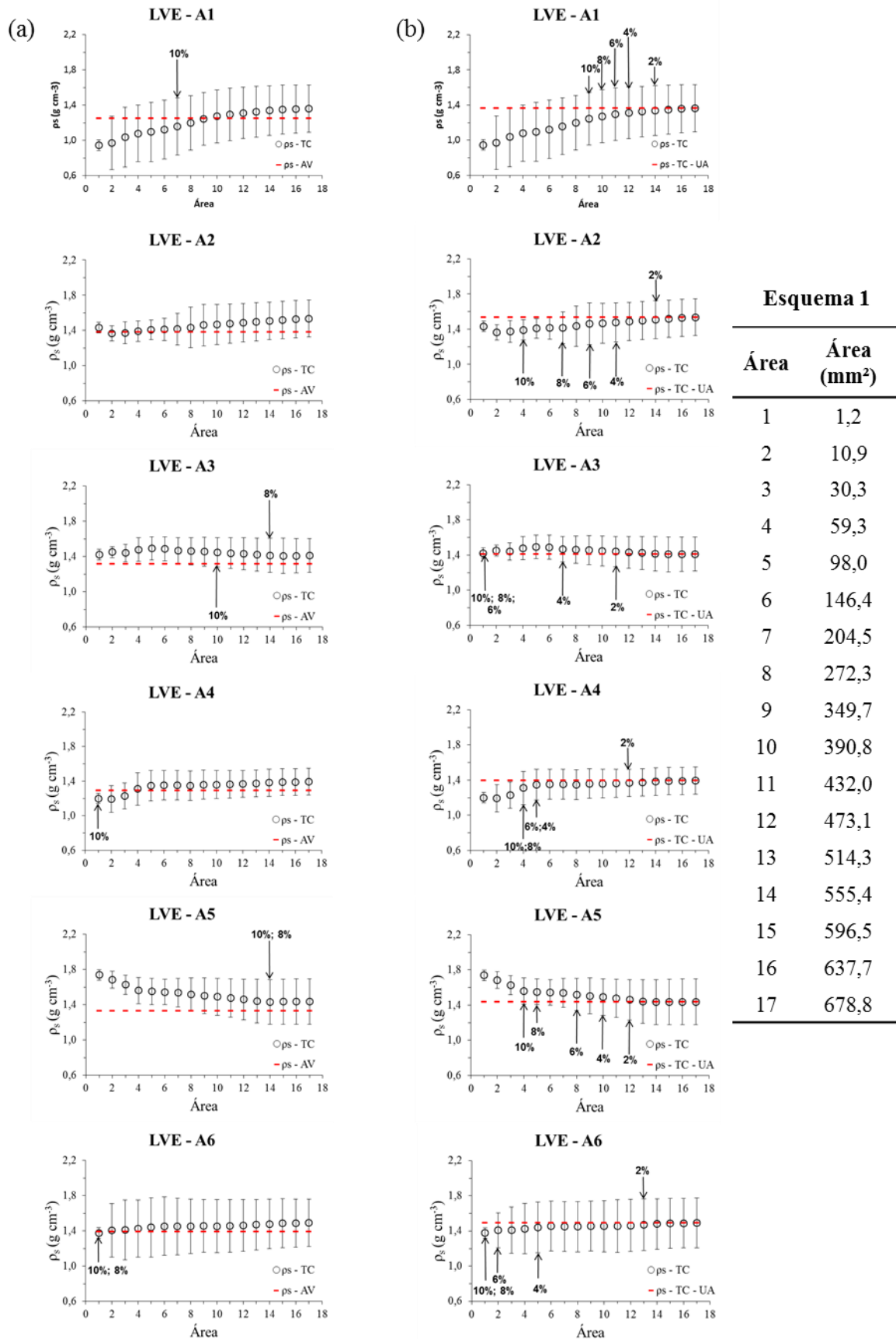


Figura 18: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.

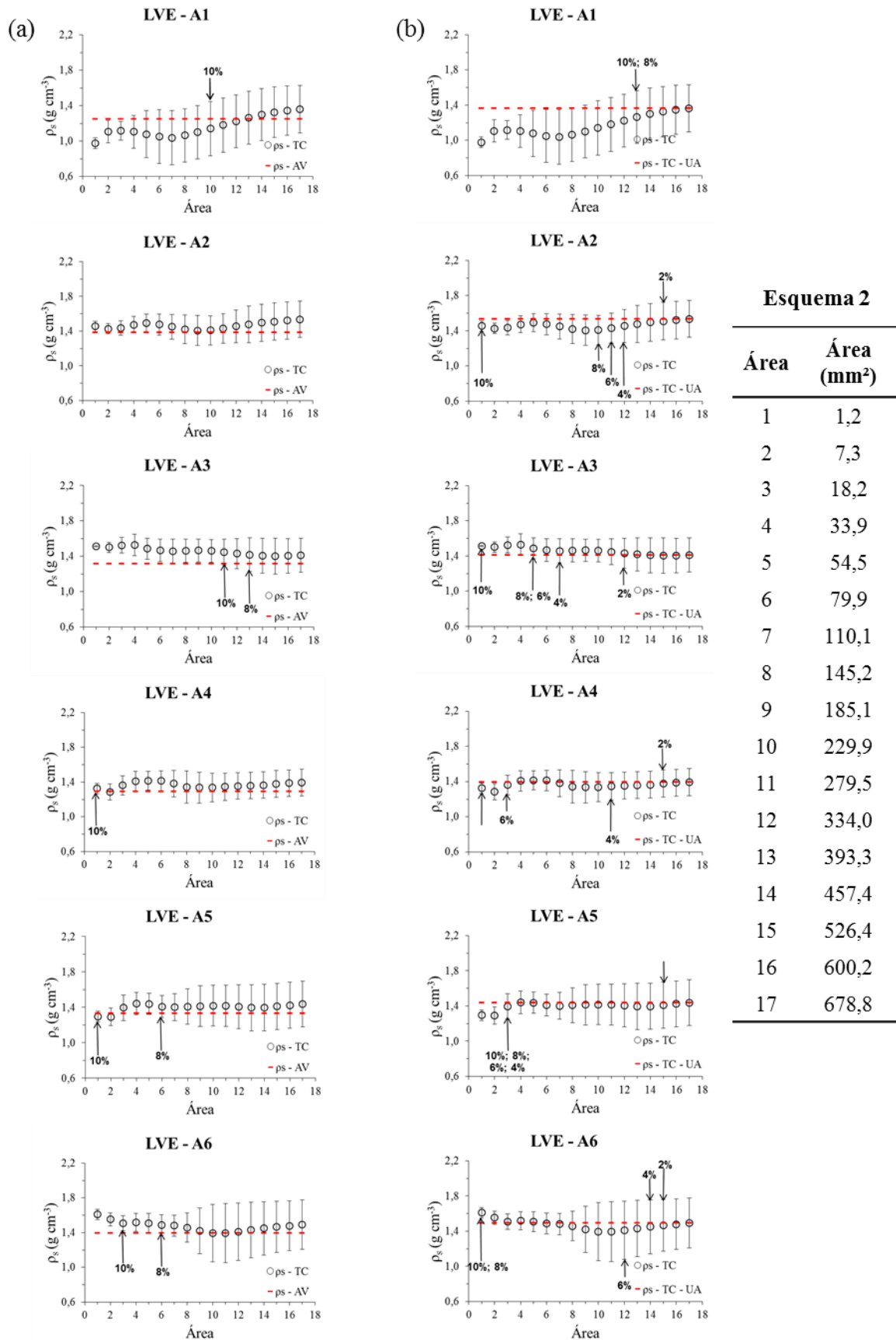
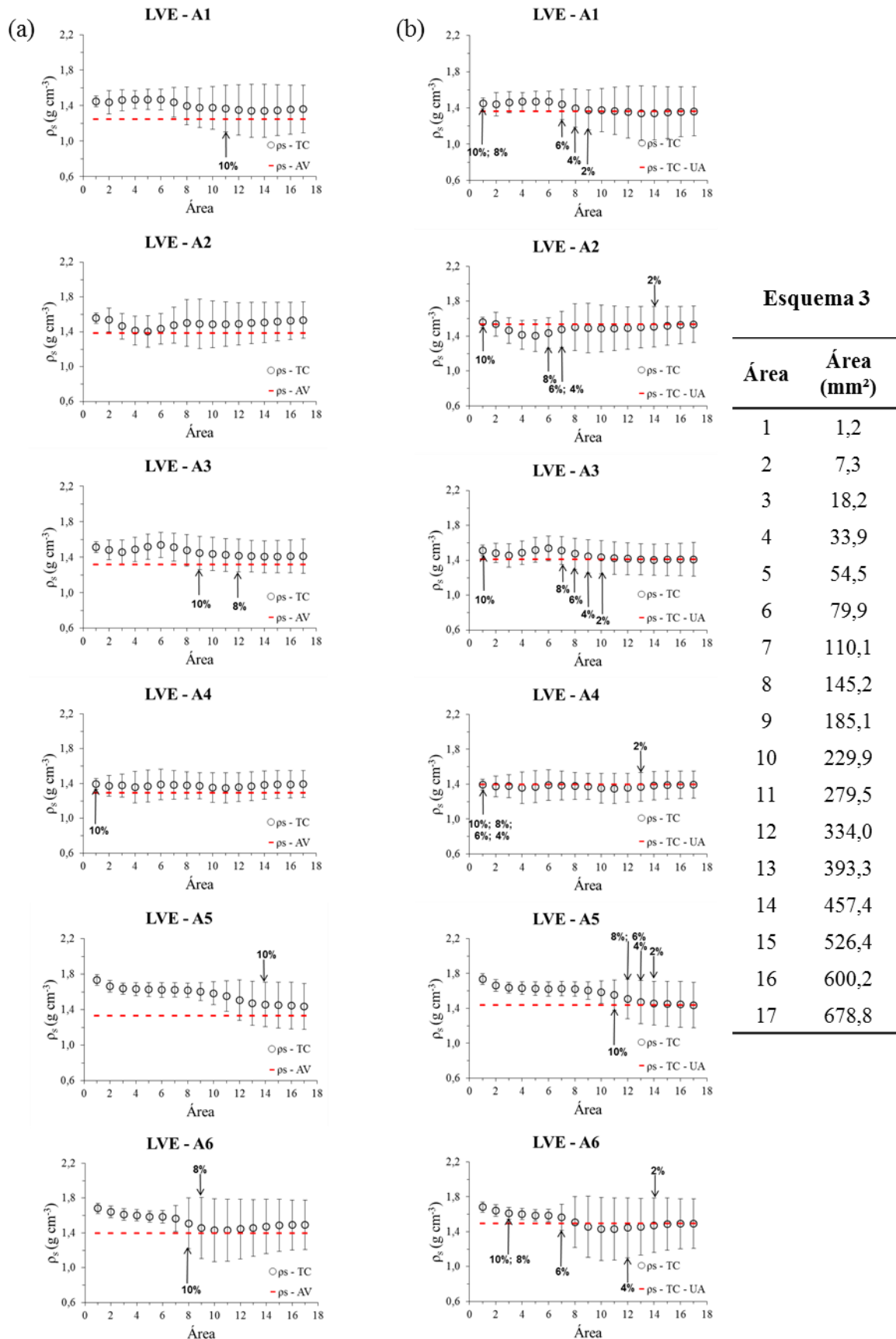


Figura 19: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo LVE, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.



Quanto ao solo LVE, que em geral se trata de um solo mais heterogêneo, faz-se interessante interpretar inicialmente as amostras que apresentam o maior grau de heterogeneidade. Ao analisar os dados quantitativos das distribuições de densidade, nas Figuras 17-19, destacam-se facilmente os gráficos nos quais o critério menos rigoroso (10%) é alcançado nas maiores áreas. Estes gráficos correspondem às amostras 1 e 5, cujas imagens (Figura 16a) auxiliam na identificação de uma estrutura mais heterogênea. Estas amostras contam com regiões de densidades muito baixas, provavelmente associadas à presença de matéria orgânica ali acumulada e bioporos. No entanto estas regiões possuem uma coloração cinza, que de acordo com a escala, não corresponderiam a vazios. Porém, podem ocorrer artefatos nas regiões de interface do solo com o ar, de modo que a hipótese de que estas regiões em cinza sejam de fato vazios, é plausível (CRUVINEL et al., 1990).

Observa-se que para a amostra 1 (Figuras 16-18), os valores de $\rho_s - TC$ passam de subestimados para superestimados com relação ao valor de $\rho_s - AV$, nos casos 1/2(a). Já para o caso 3(a), os valores de $\rho_s - TC$ começam superestimados e apresentam uma tendência aos valores de $\rho_s - AV$, atingindo somente o desvio de 10%, assim como para os casos anteriores. Para os casos 1/2/3(b), o desvio de 2% é atingido nas áreas 14, 0, 9, o que significa que o crescimento segundo o esquema 3, mesmo sob as condições de heterogeneidade da amostra, ainda assim permite que a AER seja atingida, para o critério mais rigoroso, em uma área de tamanho relativamente pequena. O gráfico da Figura 16b, correspondente à amostra 1, revela que os valores de ρ_s , obtidos para as cinco diferentes divisões, comportam-se de maneira uniforme até uma profundidade de aproximadamente 5,5 mm, a partir da qual os valores diminuem significativamente para as divisões x2, x3 e x4.

Para a amostra 5, casos 1/3(a), observa-se o mesmo comportamento para os valores de $\rho_s - TC$ comentado no caso 3(a) (amostra 1), com alcance do desvio de 10% já nas áreas finais, enquanto que no caso 2(a) para a amostra 5, os valores de $\rho_s - TC$ permanecem oscilando acima de $\rho_s - AV$ sem se estabilizarem. Nos casos 1/2/3(b), o desvio de 2% é satisfeito nas áreas 12, 15, 14, indicando um grau de heterogeneidade similar em todas as direções de crescimento. O gráfico da Figura 16b, referente à amostra 5, mostra que, apesar de existir uma diferença evidente entre os valores de ρ_s obtidos nas regiões superior e inferior desta amostra, em que a região superior conta com valores mais altos de ρ_s , estes valores não variam significativamente entre as divisões, com exceção da divisão 1, para cada profundidade. Isto explica o alcance do critério de 2% em áreas de tamanhos semelhantes para os três esquemas de seleção.

Pode parecer atípico o fato de o critério de 10%, para a amostra 6, ter sido satisfeito nas primeiras áreas para os três esquemas adotados, sendo que esta amostra também apresenta uma grande região de baixas densidades (Figura 16a). No entanto, para tal análise é preciso considerar a distribuição espacial de densidades ao longo de toda a área de estudo. Desta maneira, percebe-se que apesar da amostra 6 conter um grande macroporo, a sua distribuição de densidades no restante da imagem é praticamente uniforme, quando comparada às demais amostras do solo LVE. Esta característica é verificada quantitativamente a partir do gráfico da Figura 16b, associado à amostra 6, o qual indica uma grande alteração nos valores de ρ_s obtidos para as divisões x4 e x5, em profundidades intermediárias, mas as divisões x1, x2 e x3 não diferem consideravelmente entre si. Sendo assim, à medida que a área aumenta, segundo os esquemas 1, 2 e 3, a mesma passa a englobar partes dessa região de baixa densidade gradativamente, de modo que os seus efeitos na média não são tão significativos.

Os casos 2/3(a) para a amostra 6 também podem ser comparados ao caso 3(a) (amostra 1). No caso 1(a), $\rho_s - TC$ apresenta um suave crescimento, superestimando $\rho_s - AV$. O critério de 2% é atingido nas áreas 13, 15, 14, para os casos 1/2/3(b), indicando o mesmo grau de heterogeneidade identificado para a amostra 5, de acordo com mesmos esquemas de seleção.

A amostra 2 apresenta um pedregulho em sua estrutura, localizado na região superior da imagem tomográfica (Figura 16a). O gráfico da variação da ρ_s em função da profundidade, relacionado à amostra 2 (Figura 16b), confirma a presença de valores mais elevados de ρ_s na divisão x2, onde o pedregulho se encontra. Nota-se que os valores de ρ_s para as diferentes divisões são similares no topo e na base da amostra, mas diferem entre si em profundidades intermediárias. Analisando os gráficos das Figuras 16-18, para esta amostra, percebe-se que este pedregulho não foi responsável por elevar os valores de $\rho_s - TC$, nas áreas em que ele é contabilizado (áreas 9 a 12 aproximadamente) para o esquema 3, que teria a maior chance de detectar alguma influência. Os valores de $\rho_s - TC$, em geral, superestimam os de $\rho_s - AV$ nos casos 1/2/3(a), e o desvio de 2% é satisfeito nas áreas 14, 16, 14, evidenciando uma forte heterogeneidade em todas as direções de crescimento.

Em termos de homogeneidade, os valores de $\rho_s - TC$ para as amostras 3 e 4 apresentam menores oscilações do que para as demais (Figuras 16-18). Não são observados platôs tão estáveis quanto os identificados para as amostras 3 e 6 do solo LVA, mas é possível notar certa estabilização dos valores de $\rho_s - TC$. Para a amostra 3, o desvio de 2% é atingido nas áreas 11, 12, 10 e para a amostra 4 nas áreas 12, 11, 13, nos casos 1/2/3(b), respectivamente. Este fato, somado ao menor desvio padrão associado às amostras 3 e 4,

confirma a característica mais homogênea das amostras 3 e 4 quando comparadas às demais. O mesmo se verifica nos gráficos da Figura 16a, referentes às amostras 3 e 4, a partir dos quais se nota uma maior uniformidade dos valores de ρ_s obtidos ao longo da profundidade dessas amostras, em comparação com as demais. Ressalta-se que nos casos 1/2/3(a), de maneira geral, $\rho_s - TC$ superestima $\rho_s - AV$ em praticamente todas as áreas.

Figura 20: (a) Imagens tomográficas obtidas para a região equivalente à maior área selecionada para as análises de AER de medidas de ρ_s para as amostras do solo NV. (b) Gráficos dos valores médios de ρ_s para as divisões x1, x2, x3, x4 e x5 em função da profundidade (z) das amostras do solo NV.

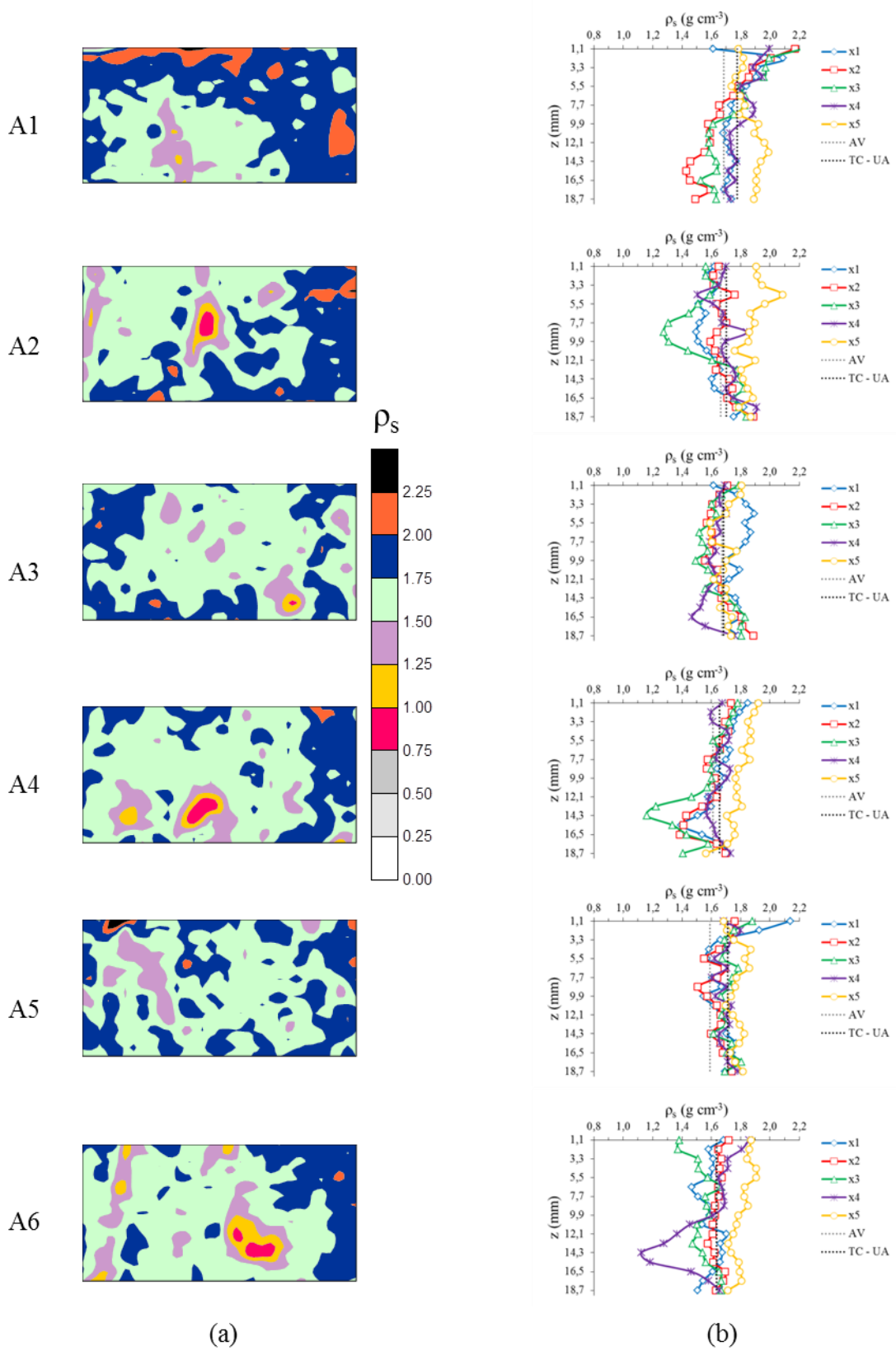


Figura 21: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 1. (a) Caso 1(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 1(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.

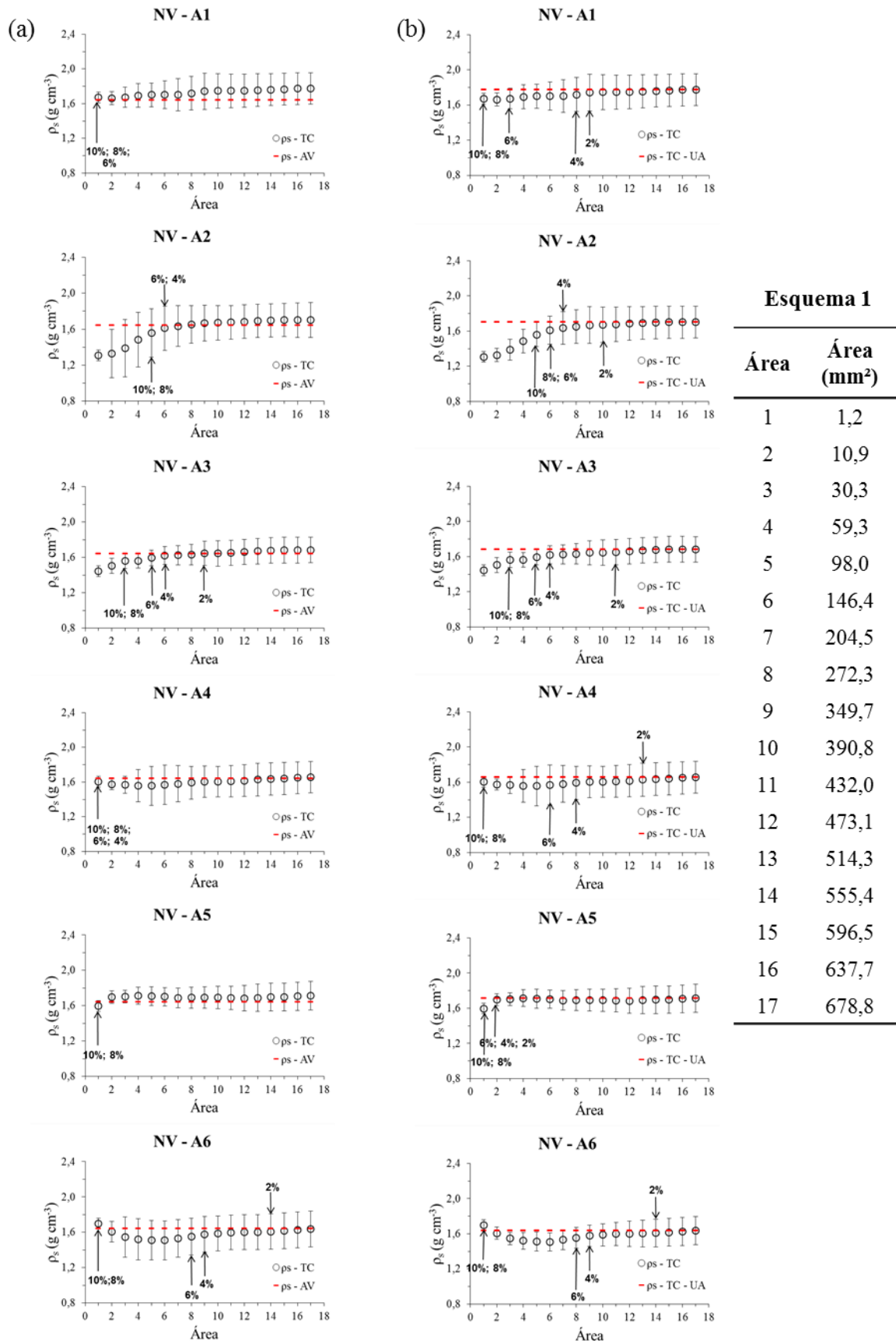
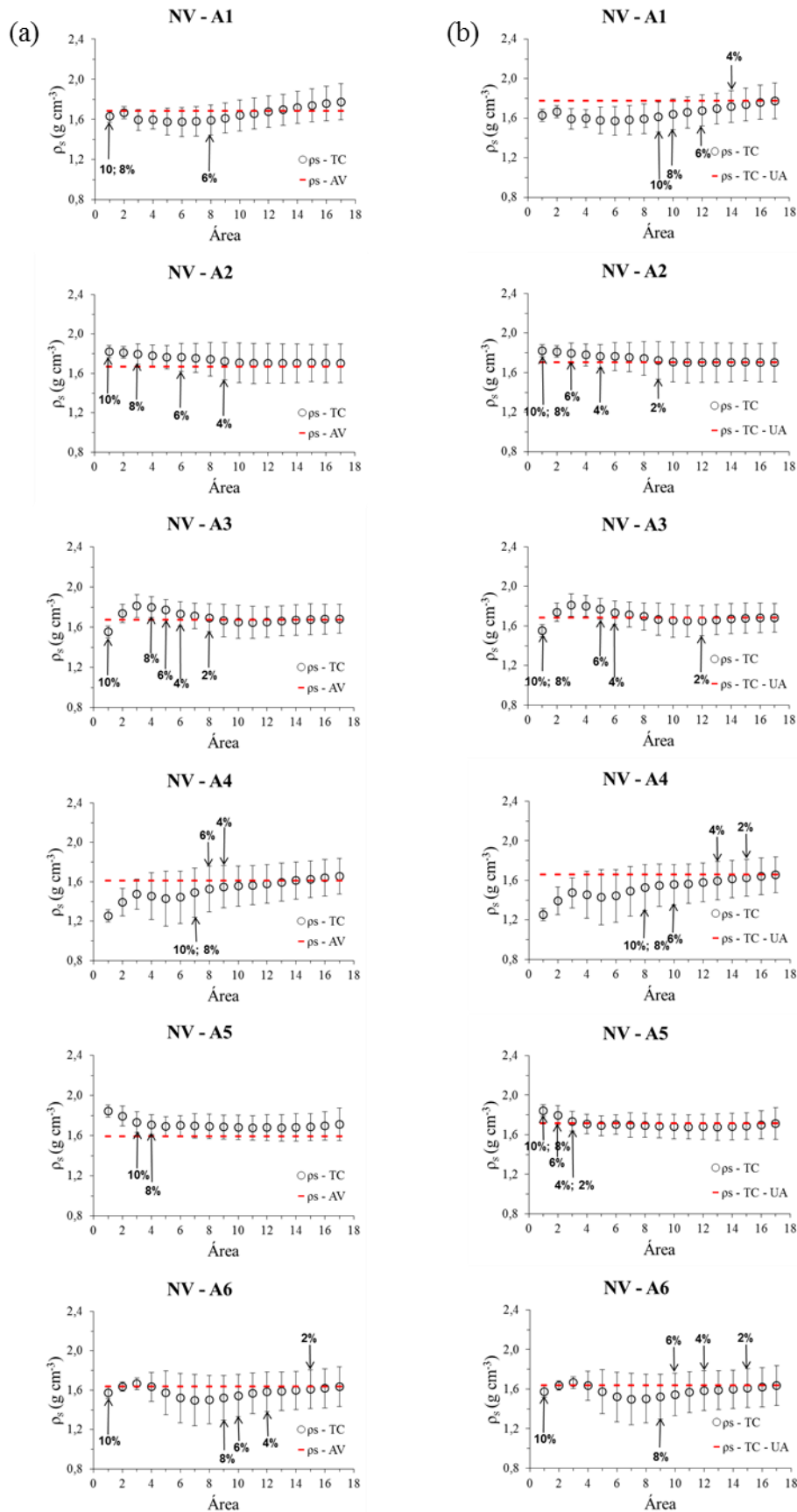


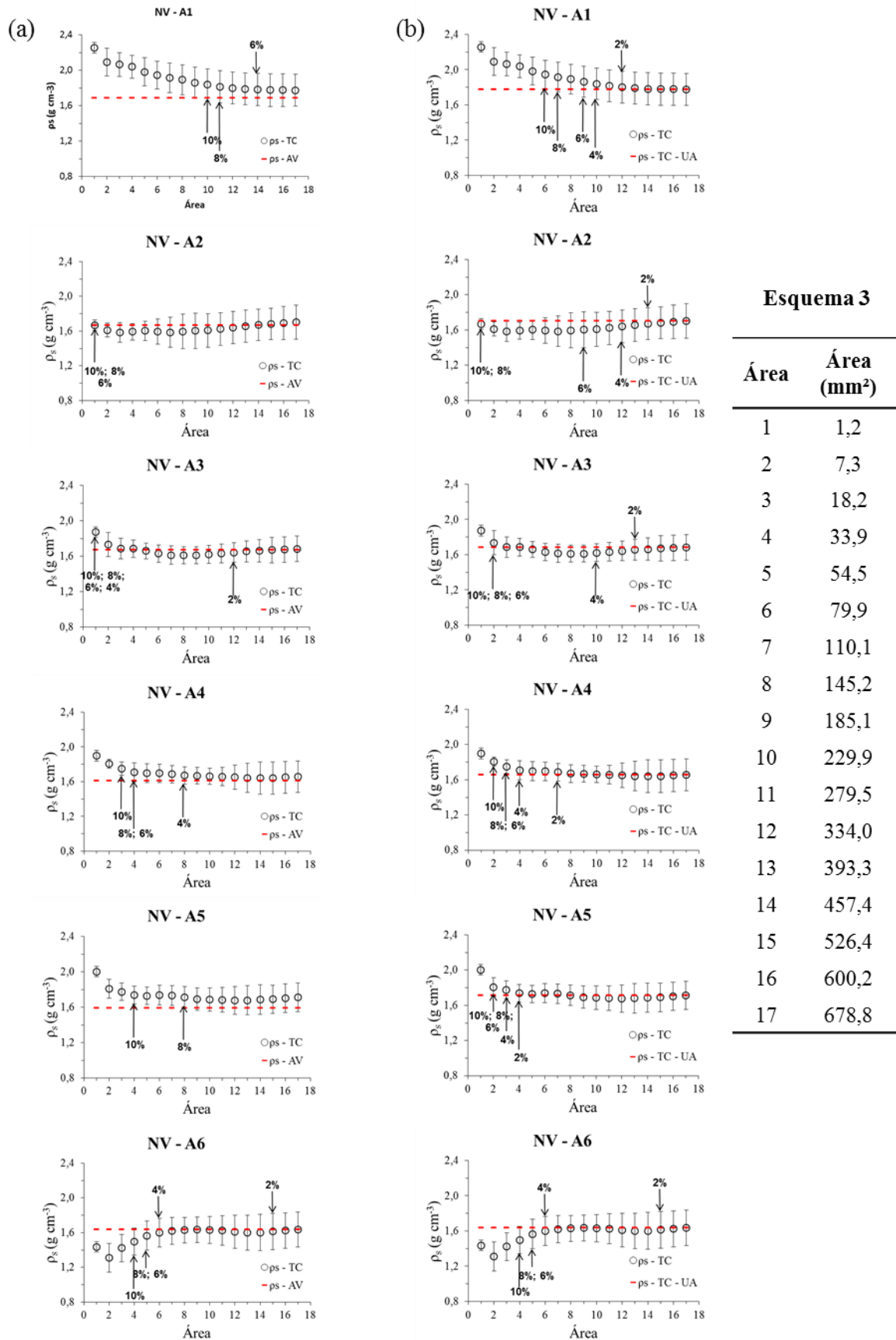
Figura 22: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 2. (a) Caso 2(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - AV; (b) Caso 2(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s - TC_{UA}.



Esquema 2

Área	Área (mm ²)
1	1,2
2	7,3
3	18,2
4	33,9
5	54,5
6	79,9
7	110,1
8	145,2
9	185,1
10	229,9
11	279,5
12	334,0
13	393,3
14	457,4
15	526,4
16	600,2
17	678,8

Figura 23: Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s -TC) em função da área para as 6 amostras do solo NV, para a seleção e áreas segundo o esquema 3. (a) Caso 3(a): A linha tracejada representa o valor de ρ_s -AV; (b) Caso 3(b): A linha tracejada representa o valor de ρ_s -TC_{UA}.



Uma análise geral dos gráficos apresentados nas Figuras 20-22, para as amostras do solo NV, permite concluir que as menores áreas para as quais o critério mais rigoroso é atingido são associadas à amostra 5. São elas, áreas 2, 3, 4 para os casos 1/2/3(b), o que caracteriza esta amostra como a mais homogênea. Entretanto, para os casos 1/2/3(a), somente os desvios de 10 e 8% são atingidos. O comportamento dos valores de $\rho_s - TC$, nos casos 1(a e b), é caracterizado por um platô bem definido que superestima os valores de $\rho_s - AV$ e coincide com $\rho_s - TC_{UA}$ em todas as áreas, com exceção da primeira. Nos casos 2/3(a e b), os valores de $\rho_s - TC$ para as primeiras áreas são mais elevados e decrescem progressivamente atingindo um platô, que da mesma forma superestima $\rho_s - AV$ e concorda com $\rho_s - TC_{UA}$.

A partir do gráfico da Figura 20b, referente à amostra 5, percebe-se que os valores de ρ_s obtidos para as cinco divisões, ao longo da profundidade da amostra, apresentam uma forte concordância entre si, com exceção da divisão x5, que destoa para valores mais altos que as demais. Nota-se também os valores associados às divisões, de fato, aproximam-se mais do valor de $\rho_s - TC_{UA}$ do que do valor de $\rho_s - AV$.

O caso 1(a) para a amostra 3 é semelhante ao caso 1(a) para a amostra 5, porém o platô de $\rho_s - TC$ inicia em uma área de tamanho maior e apresenta uma melhor concordância com $\rho_s - AV$. Consequentemente, o caso 1(b) da amostra 3, também apresenta o mesmo comportamento do caso 1(b) para a amostra 5, porém com o início do platô em uma área intermediária. As mesmas diferenças são observadas para os casos 3(a e b) para a amostra 3 em comparação aos casos 3(a e b) para a amostra 5. Para o esquema 2, $\rho_s - TC$ sofre um aumento significativo nas primeiras áreas seguido de um decréscimo até atingir um platô coincidente com o valor de $\rho_s - AV$ e também com o valor de $\rho_s - TC_{UA}$. Na imagem tomográfica, referente a amostra 3 (Figura 20a), identifica-se realmente uma região de densidade mais elevada próxima à face inferior. O gráfico da Figura 20b, associado a esta amostra, mostra que a única divisão cujos valores de ρ_s não são mais elevados na parte inferior da amostra é a região 4.

A AER para o desvio de 2%, casos 1/2/3(b) para a amostra 3, é atingida nas áreas 11, 12, 9, fato que indica que o crescimento de áreas a partir da face superior da imagem gera uma condição mais homogênea do que quando crescidas a partir da face inferior ou do centro da mesma. Para esta amostra, o desvio de 2% com relação ao valor de $\rho_s - AV$, casos 1/2/3(a), é atingido nas áreas 9, 8, 12, respectivamente. Esta é uma característica interessante para esta amostra, pois poucos são os casos que atingem a AERs para critérios mais rigorosos quando se toma $\rho_s - AV$ como referência, de acordo com os resultados apresentados até aqui.

Os valores de $\rho_s - TC$ da amostra 4, para o esquema 1, se comportam de maneira relativamente estável e apresentam a mesma concordância com $\rho_s - AV$ e $\rho_s - TC_{UA}$, casos 1(a e b), respectivamente. Este mesmo comportamento relativo é observado para os casos 2(a e b) da amostra 4, exceto pelo fato de que os valores de $\rho_s - TC$ oscilam até uma determinada área e a partir disso crescem progressivamente, tendendo aos seus respectivos valores de referência, $\rho_s - AV$ e $\rho_s - TC_{UA}$. Para o esquema 3, o comportamento de $\rho_s - TC$ é bem semelhante ao apresentado pela amostra 5, nesta mesma condição. A concordância com $\rho_s - AV$, em contraste com a amostra 5, é melhor e a concordância com $\rho_s - TC_{UA}$ é praticamente a mesma.

O critério de 2%, nos casos 1/2/3(b), para a amostra 4, é atingido nas áreas 13, 15, 7, respectivamente, indicando que a região superior da amostra 4 é mais homogênea do que a sua região inferior. O gráfico correspondente à amostra 4, da Figura 20b, confirma esta característica, uma vez que os valores de ρ_s para as divisões x1, x2 e x3 sofrem um decréscimo a partir da profundidade equivalente a 12,1 mm, aproximadamente. Com base na imagem tomográfica da amostra 4 (Figura 20a) verifica-se que isto se deve a presença de regiões associadas a baixas densidades localizadas na parte inferior das divisões x1, x2 e x3.

Para o esquema 1, quando a amostra 2 é analisada, percebe-se que $\rho_s - TC$ parte de baixos valores e cresce progressivamente até atingir um platô em uma área intermediária, a partir da qual o mesmo coincide com ambos os valores de referência, nos casos 1(a e b). A imagem tomográfica (Figura 20a) da respectiva amostra revela que isto se deve a presença de uma região de baixos valores de densidade localizada exatamente no centro da amostra, ou seja, sobre a divisão x3. Para os casos 1/2/3(b), o critério mais rigoroso é satisfeito nas áreas 10, 9, 14, representando a maior homogeneidade da região inferior da imagem. O gráfico da Figura 20b, relacionado à amostra 2, mostra que os valores de ρ_s obtidos, exceto para a divisão x5, são similares no topo da amostra e passam a diferir significativamente, entre as cinco divisões, ao longo de sua profundidade; a partir da profundidade equivalente a 12,1 mm, aproximadamente, os valores voltam a coincidir, porém são mais elevados que aqueles obtidos no topo.

Para a amostra 1, de acordo com o esquema 1, $\rho_s - TC$ sofre um ligeiro aumento em função da área, atingindo um platô que superestima $\rho_s - AV$ no caso 1(a) e coincide com $\rho_s - TC_{UA}$ no caso 1(b). Já para o esquema 2, os valores de $\rho_s - TC$ sofrem uma oscilação seguida de um aumento progressivo, superestimando $\rho_s - AV$ no caso 2(a) e tendendo a $\rho_s - TC_{UA}$ no caso 1(b), sem a presença de um platô. Já para o esquema 3, $\rho_s - TC$ começa com valores bem altos e diminui progressivamente, delineando um platô para as áreas finais, que superestima a

referência no caso 3(a) e coincide com a referência no caso 3(b). O desvio de 2% é satisfeito para as áreas 9, 0, 12, para os casos 1/2/3(b), respectivamente. Isto sugere que o crescimento de áreas partindo da face inferior da amostra gera uma condição extrema de heterogeneidade.

Estas diferenças encontradas entre os esquemas 2 e 3 são claramente retratadas na imagem tomográfica da amostra 1 (Figura 20a), em que se vê de fato regiões de densidades bem diferentes entre a sua parte superior e inferior. A partir do gráfico da Figura 20b, que corresponde a essa mesma amostra, é possível perceber que os valores de ρ_s , obtidos para as diferentes divisões, apresentam certa uniformidade do topo da imagem até a profundidade de 5,5 mm, aproximadamente. Os valores de ρ_s , para cada divisão, começam então a se dispersar ao longo da profundidade até a base da amostra.

Em suma, para os três solos considerados, verifica-se que quando regiões localizadas de baixas/altas densidades estão sobrepostas às primeiras áreas referentes a cada esquema utilizado, estas sofrem uma maior influência do que quando as mesmas passam a ser contabilizadas gradativamente. No último caso, os valores tendem a se equilibrar com o todo contrabalanceando a variação de ρ_s . Percebeu-se que a ρ_s dos solos estudados varia ao longo da profundidade das amostras coletadas. Em solos mais heterogêneos, como o solo LVE, a dificuldade de se obter um platô definido para os valores de ρ_s é maior.

Da mesma forma ao observado por Baveye et al. (2002), os resultados aqui obtidos mostram que independentemente do ponto de partida de crescimento das áreas (centro ou superfície), os esquemas de seleção se sobrepõem gradativamente a partir de uma determinada área, como era de se esperar, de modo que qualquer dos esquemas fornece um valor praticamente igual para a densidade.

As Figuras 24 - 26 apresentam os gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área, que informam o número de amostras que atingiram os critérios de 10, 8, 6, 4 e 2% em cada uma das áreas, para os diferentes esquemas de seleção. Estes gráficos foram elaborados com base nos dados obtidos quando $\rho_s - TC_{UA}$ foi utilizada como referência.

Figura 24: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVA que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - TC_{UA}$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.

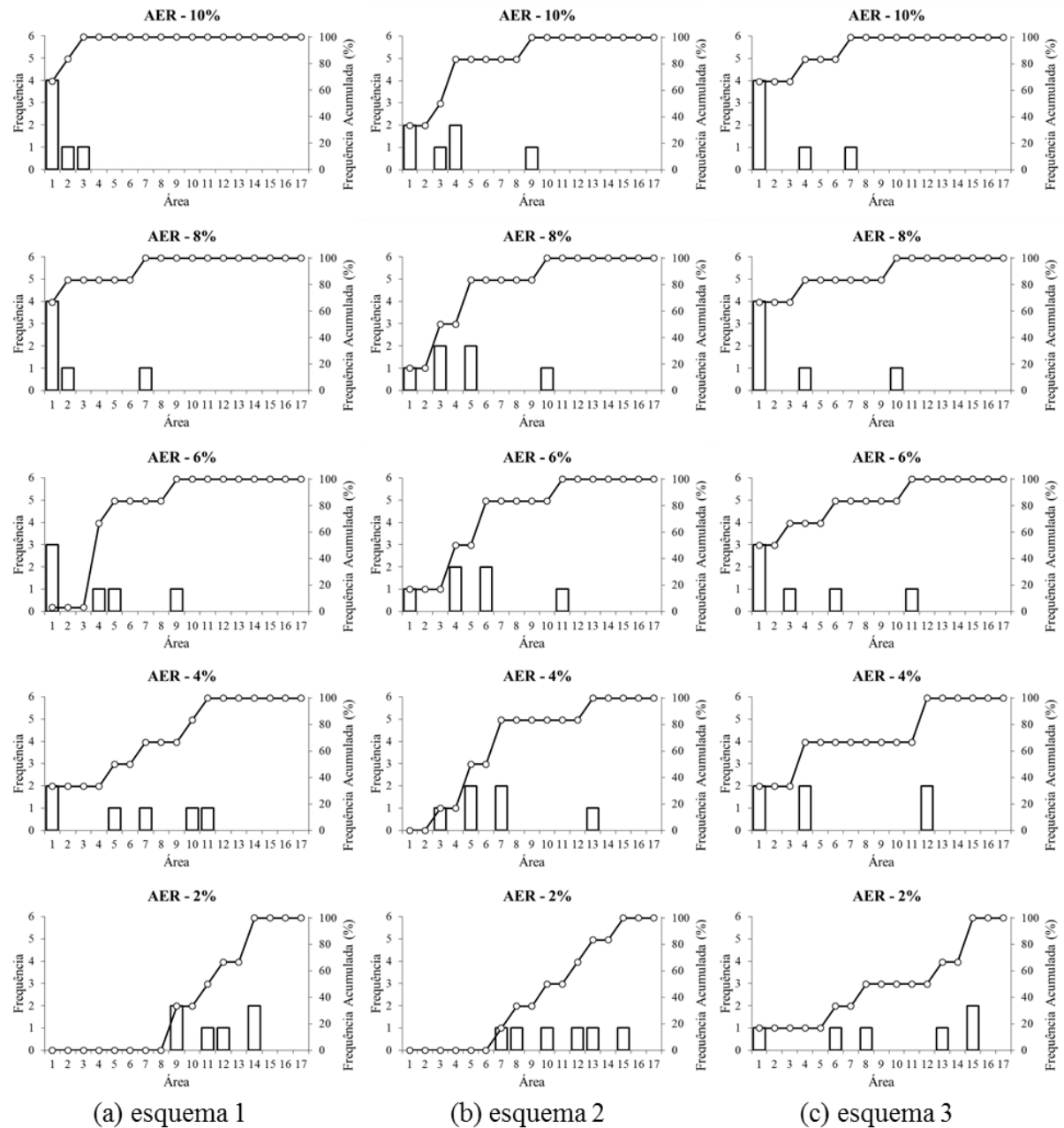


Figura 25: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVE que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - TC_{UA}$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.

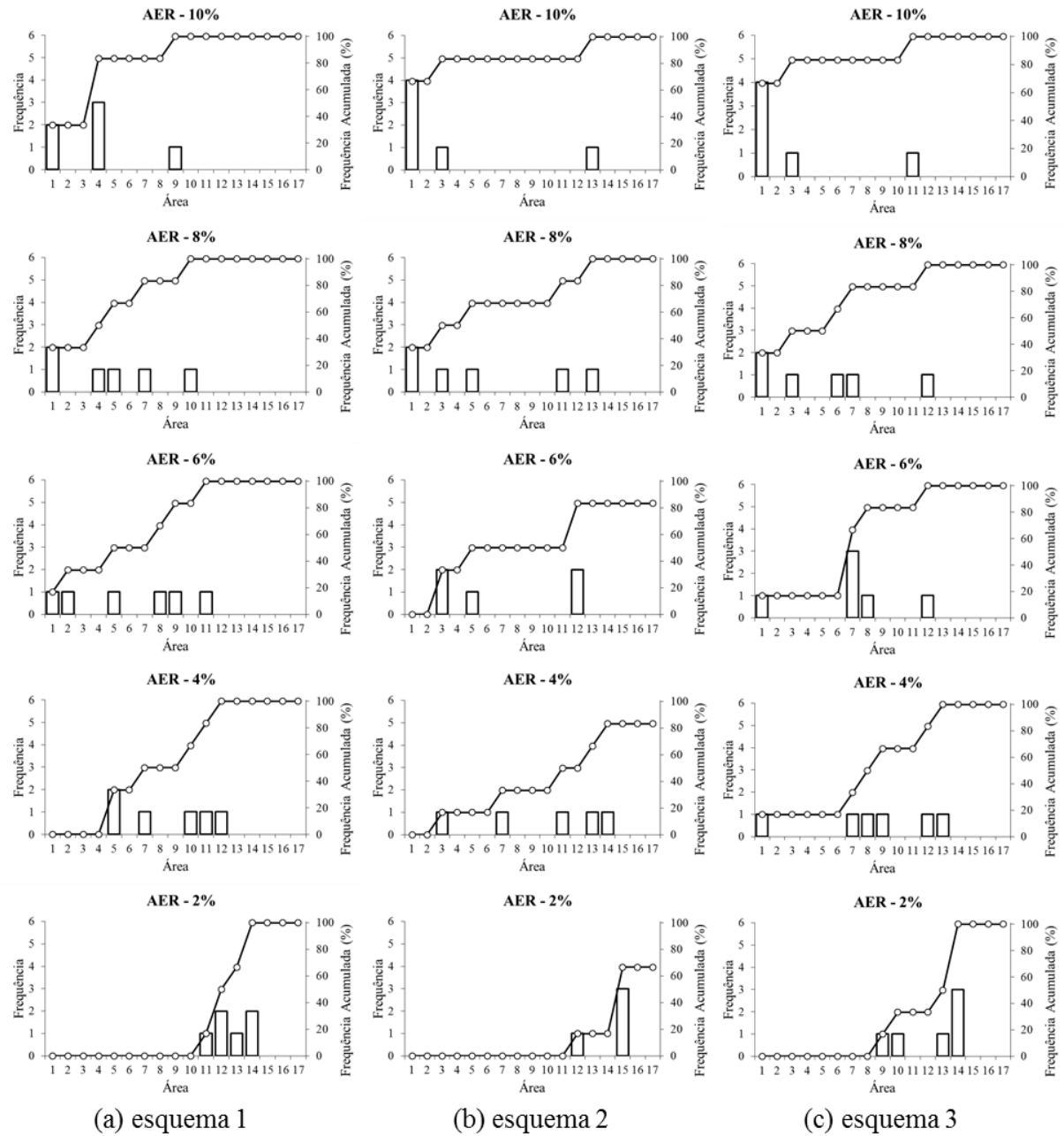
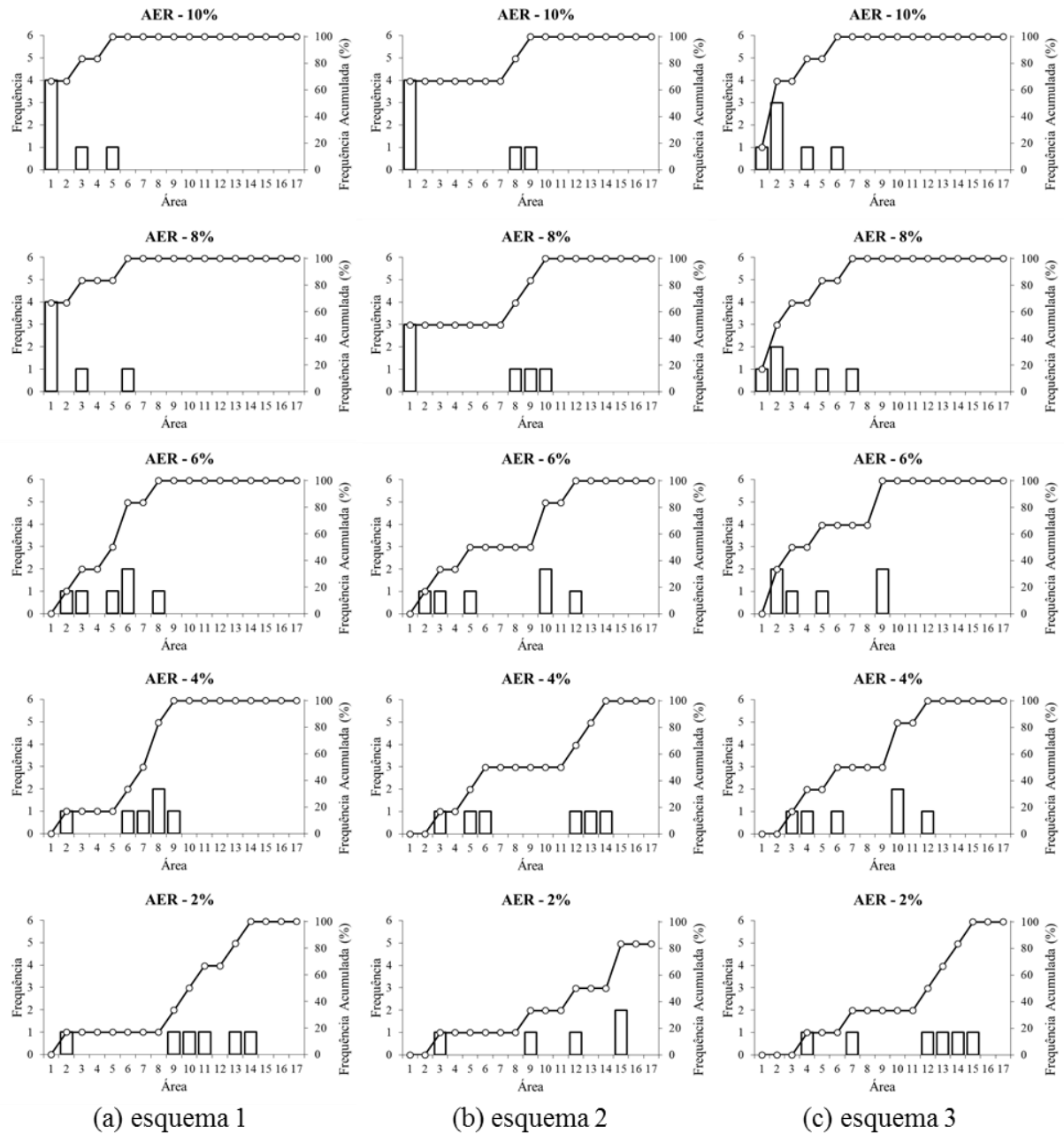


Figura 26: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo NV que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - TC_{UA}$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.



É válido lembrar que as áreas adotadas como sendo as AERs, associadas a cada um dos desvios (10%, 8%, 6%, 4% ou 2%), são àquelas em que o desvio considerado foi atingido para cada amostra. Sendo assim, os gráficos aqui apresentados mostram que a AER é variável entre as amostras avaliadas sob o mesmo critério, ou seja, poucos são os casos em que o desvio é atingido em uma mesma área para duas amostras, e ainda mais raro para mais do que duas. Casos como este são encontrados com mais frequência somente para o desvio de 10%, considerado como o menos rigoroso dentre os demais, para todos os três solos de interesse.

Este fato pode ser explicado pela heterogeneidade das amostras de solo. Pires et al. (2005b) analisaram os diferentes valores de UTs obtidos dentro de uma mesma amostra, dividida em 15 áreas adjacentes. Os autores observaram uma variação significativa entre as UTs, refletindo variações na estrutura do solo resultantes de processos naturais ou artificiais. A maior diferença obtida entre as áreas de uma mesma amostra foi de 111 UTs e, a menor, de 40 UTs. As características particulares de cada amostra puderam ser visualizadas e quantificadas nas imagens tomográficas de forma não destrutiva, o que não pode ser feito por meio de métodos tradicionais de medida de ρ_s como o método do anel volumétrico e do torrão parafinado. As imagens revelaram amostras que continham pequenos pedregulhos, regiões de altas/baixas densidades e até mesmo alguns macroporos (bioporos).

A Tabela 4 apresenta a AER atingida para cada solo sob cada esquema de seleção de áreas estudado. No trabalho de VandenBygaart e Protz (1999) foi estabelecido o critério de 10% para a AER em medidas de propriedades micromorfológicas do solo. Se este critério fosse aqui adotado, mesmo para o solo mais heterogêneo (LVE), todas as amostras atingiriam a AER em áreas de no máximo 349,7; 393,3 e 279,5 mm², para áreas crescendo a partir do centro, da face superior e da face inferior das amostras, respectivamente.

No entanto, as propriedades micromorfológicas avaliadas pelos últimos autores apresentam maior variabilidade do que a ρ_s , investigada neste trabalho, de modo que foram escolhidos critérios mais rigorosos para a definição da AER. De acordo com Jury e Horton (2004), o intervalo de coeficientes de variação de ρ_s é de 3-26%, tendo como referência trabalhos encontrados na literatura. O valor do CV das medidas de ρ_s realizadas pelo método do anel volumétrico está dentro desse intervalo para os solos analisados, de modo que se adotou o critério de 4% como referência para a estimativa da AER de cada solo.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, foi possível estabelecer que amostras com áreas superiores ou iguais a 432,0 mm² (LVA), 473,1 mm² (LVE) e 349,7 mm² (NV) fornecem valores representativos de ρ_s quando as áreas são selecionadas a partir do centro. Quando a seleção das áreas é feita a partir da face inferior e superior das amostras, áreas superiores ou iguais a 393,3 mm² e 457,4 mm²; 457,4 mm² e 334,0 mm²; 393,3 mm² e 334,0 mm² fornecem valores representativos de ρ_s para o LVA, LVE e NV, respectivamente.

Tabela 4: Resumo dos dados apresentados nas Figuras 24, 25 e 26, contendo informações a respeito da maior área na qual cada critério foi atingido entre as amostras de cada solo (AER), bem como as medidas de tais áreas, de acordo com cada esquema de seleção.

Desvios	Esquema 1			Esquema 2			Esquema 3		
	AER	Medida (mm ²)	n° amostras	AER	Medida (mm ²)	n° amostras	AER	Medida (mm ²)	n° amostras
LVA									
10%	3	30,3	6	9	185,1	6	7	110,1	6
8%	7	204,5	6	10	229,9	6	10	229,9	6
6%	9	349,7	6	11	279,5	6	11	279,5	6
4%	11	432,0	6	13	393,3	6	12	334,0	6
2%	14	473,1	6	15	526,4	6	15	526,4	5
LVE									
10%	9	349,7	6	13	393,3	6	11	279,5	6
8%	10	390,8	6	13	393,3	6	12	334,0	6
6%	11	432,0	6	12	334,0	5	12	334,0	6
4%	12	473,1	6	14	457,4	5	13	393,3	6
2%	14	555,4	6	15	526,4	4	14	457,4	6
NV									
10%	5	98,0	6	9	185,1	6	6	79,9	6
8%	6	146,4	6	10	229,9	6	7	110,1	6
6%	8	272,3	6	12	334,0	6	9	185,1	6
4%	9	349,7	6	14	457,4	6	12	334,0	6
2%	14	555,4	6	15	526,4	5	15	526,4	6

Bouma (1983, apud SMITH e MULLINS, 2000), recomenda que uma amostra representativa deve conter ao menos 20 pedr (agregados) e o VER deve aumentar conforme a textura se torna mais fina e a estrutura se torna mais grosseira. Os resultados aqui obtidos estão de acordo com esta afirmação, uma vez que, independente do esquema de seleção adotado, as AERs obtidas para o solo LVA, de textura arenosa, são menores do que as obtidas para o solo LVE, de textura argilosa. Em contrapartida, somente o esquema 2 forneceu uma AER maior para as amostras do solo NV em comparação ao solo LVA, sendo menor e igual para os esquemas 1 e 3, respectivamente. Isto pode ser explicado pela influência da possível compactação sofrida por este solo.

Borges e Pires (2012), concluíram que para torrões de um NV coletado na mesma área experimental desse estudo, com áreas selecionadas concêntricamente em imagens tomográficas, quando a referência utilizada é a $\rho_s - TC_{UA}$, quanto mais rigoroso é o critério de variação de $\rho_s - TC$, maiores são as áreas necessárias para que a AER seja atingida. Essa característica também é observada para as amostras coletadas em anel volumétrico, para os três solos estudados (textura média e textura argilosa). O único caso que foge desta regularidade é o solo LVE quando avaliado segundo o esquema de seleção a partir da face

inferior, provavelmente devido a características mais heterogêneas deste solo uma vez que o mesmo foi coletado em área de mata conforme mencionado anteriormente.

Além disso pode-se observar, na Tabela 4, que a faixa de AERs atingidas entre os critérios de 10 e 2%, para os solos LVA e NV, é similar para os três diferentes esquemas e cobre um intervalo de valores maior do que para o solo LVE. Comparando apenas os esquemas de seleção 2 e 3, a faixa de áreas entre o critério mais rigoroso e o critério menos rigoroso para o esquema 3 é maior do que para o esquema 2, para os solos LVA e NV. Para o solo LVE, a faixa de áreas é igual para os dois esquemas, mas começa em duas áreas superiores para o esquema 2. Isto sugere que, de modo geral, a seleção de áreas a partir da face superior proporciona uma condição mais homogênea das amostras do que quando feita a partir da face inferior para estes solos. Especialmente, a AER estabelecida para 4%, que é o valor de referência aqui adotado, reflete esta característica.

Para o desvio de 4% (Tabela 4) percebe-se que 100% das amostras atingiram a AER para a maioria dos casos, com exceção do solo LVE quando as áreas foram selecionadas a partir da face inferior, em que a AER foi atingida para apenas 67% das amostras. Ainda assim, isto indica que a AER estabelecida para este critério é confiável. Para o desvio de 2%, 100% das amostras atingiram a AER para áreas selecionadas a partir do centro, para os três solos. Já para áreas selecionadas a partir das faces, a AER foi atingida por uma parcela menor de amostras. Neste caso, o tamanho das áreas selecionadas no interior das amostras é insuficiente para que as variações ocorram dentro deste critério estabelecido para definir a AER.

As Figuras 27 - 29 apresentam os gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área informando o número de amostras que atingiram a AER para cada um dos desvios e para cada área quando o valor de ρ_s obtido pelo método do anel volumétrico foi utilizado como referência. Estes dados estão resumidos na Tabela 5 para facilitar a análise.

Figura 27: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVA que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.

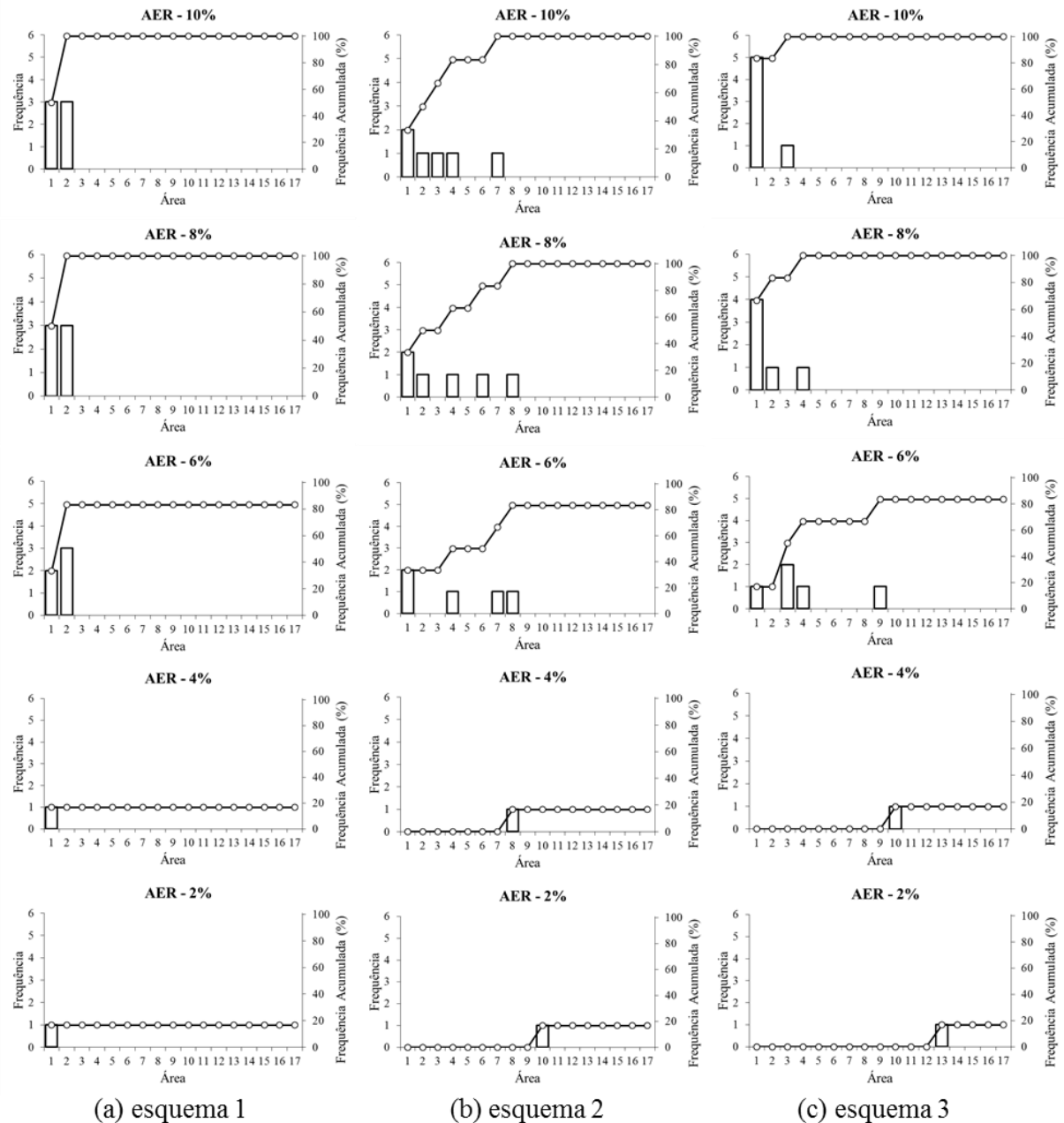


Figura 28: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo LVE que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.

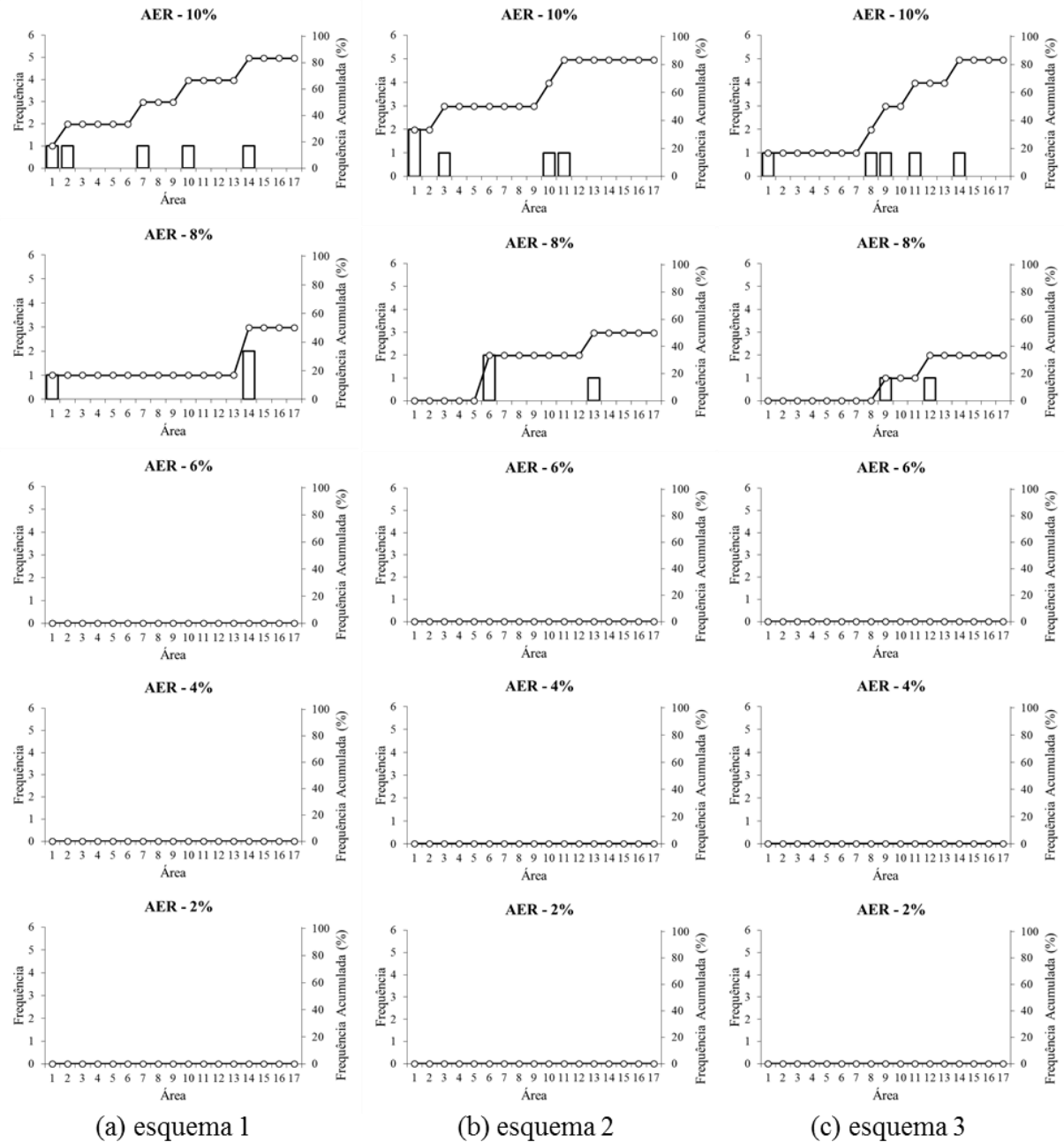


Figura 29: Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras do solo NV que atingiram a área elementar representativa (AER), com $\rho_s - AV$ como valor de referência, para os desvios de 10, 8, 6, 4 e 2% de acordo com (a) esquema 1; (b) esquema 2; (c) esquema 3.

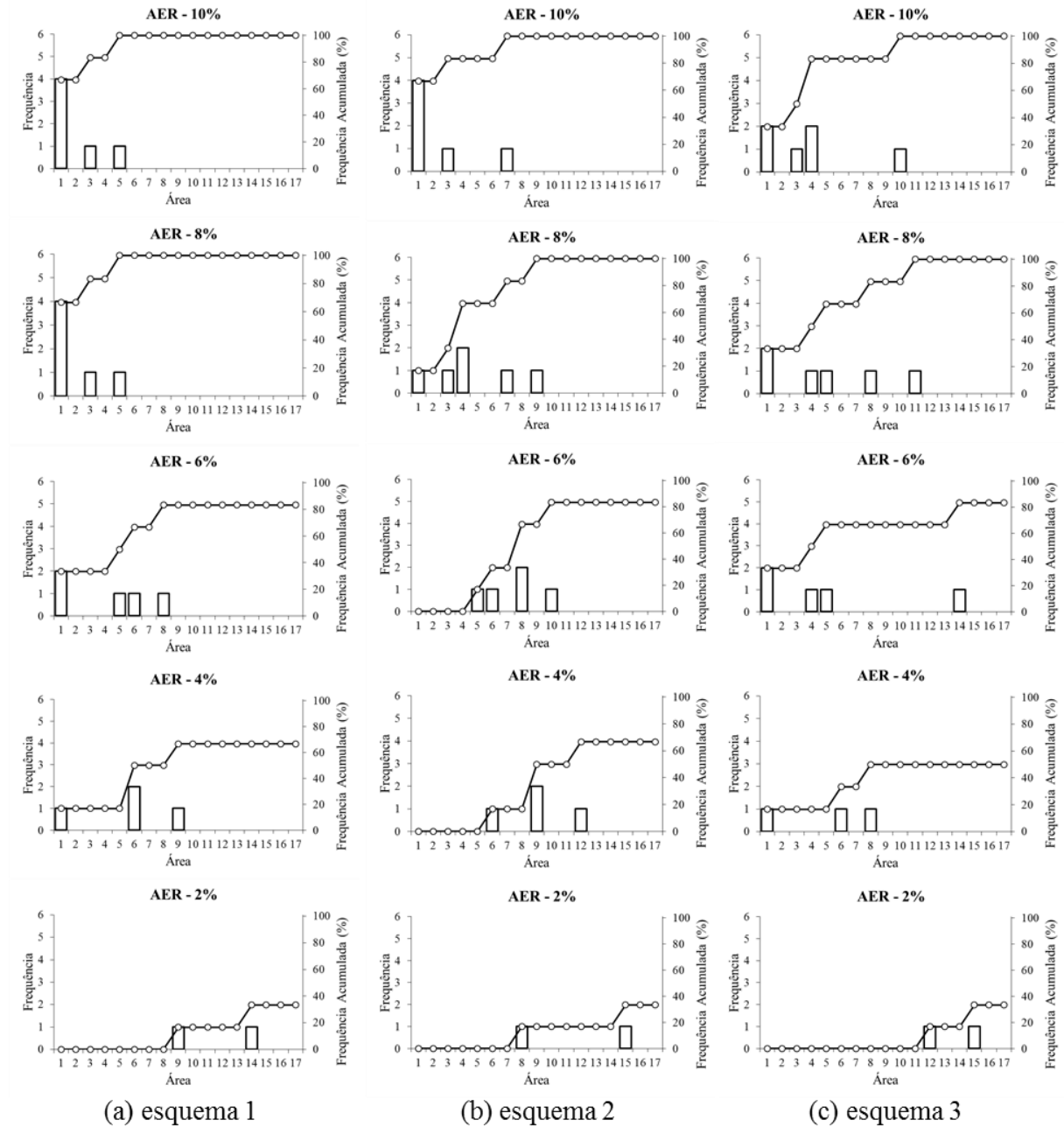


Tabela 5: Resumo dos dados apresentados nas Figuras 27, 28 e 29, contendo informações a respeito da maior área na qual cada critério foi atingido entre as amostras de cada solo (AER), bem como as medidas de tais áreas, de acordo com cada esquema de seleção.

Desvios	Esquema 1			Esquema 2			Esquema 3		
	AER	Medida (mm ²)	nº amostras	AER	Medida (mm ²)	nº amostras	AER	Medida (mm ²)	nº amostras
LVA									
10%	2	10,9	6	7	110,1	6	3	18,2	6
8%	2	10,9	6	8	145,2	6	4	33,9	6
6%	2	10,9	5	8	145,2	5	9	185,1	5
4%	1	1,2	1	8	145,2	1	10	229,9	1
2%	1	1,2	1	10	229,9	1	13	393,3	1
LVE									
10%	14	555,4	5	11	279,5	5	14	457,4	5
8%	14	555,4	3	13	393,3	3	12	334,0	2
6%	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4%	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2%	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NV									
10%	5	98,0	6	7	110,1	6	10	229,9	6
8%	5	98,0	6	9	185,1	6	11	279,5	6
6%	8	272,3	5	10	229,9	5	14	457,4	5
4%	9	349,7	4	12	334,0	4	8	145,2	4
2%	14	555,4	2	15	678,8	2	15	678,8	2

Da Tabela 5, nota-se que, quando o valor de $\rho_s - AV$ é utilizado como valor de referência para o cálculo dos desvios relativos, uma menor parcela das amostras atinge os critérios mais rigorosos em comparação com os resultados apresentados anteriormente, quando $\rho_s - TC_{UA}$ é a referência. O critério de 10% ainda fornece uma estimativa confiável para a AER de todos os três solos estudados, uma vez que, mesmo para o solo mais heterogêneo, 83% das amostras atingem este critério, para os três esquemas. Os critérios de 8% e 6% também fornecem AERs confiáveis para os solos LVA e NV, independente do esquema adotado; já para o solo LVE, o critério de 8% provê um valor duvidoso e o de 6% nem sequer é atingido, bem como os demais critérios para este solo. O critério de 4%, adotado como referência para a determinação da AER da densidade de cada solo foi atingido por, respectivamente, 17%, 0 e 67% das amostras dos solos LVA, LVE e NV. Por este motivo, não foi possível estabelecer AERs quando $\rho_s - AV$ foi utilizado como referência.

Analisando as AER obtidas para os critérios de 10%, as quais podem ser consideradas confiáveis para todos os solos, percebe-se que, assim como para o caso em que a referência era a $\rho_s - TC_{UA}$, os três esquemas de seleção adotados também fornecem AERs maiores para os solos de textura argilosa do que para o solo de textura arenosa, o que

confirma a validade de ambos os tipos de análise realizados neste trabalho. Anteriormente, concluiu-se que a seleção de áreas feita a partir da face superior proporcionava uma condição mais homogênea das amostras do que quando feita a partir da face inferior para os três solos, quando a referência adotada era o valor de $\rho_s - TC_{UA}$. No entanto, quando a $\rho_s - AV$ é usado como referência, para o critério de 10%, esta característica é observada, e bem acentuada neste caso, somente para o solo LVA.

É importante ressaltar que a densidade obtida pela TC corresponde à média dos valores contidos em um plano da amostra (imagem 2D), enquanto que a densidade do solo calculada pelo MAV leva em consideração o seu volume total. Sendo assim, de acordo com a seção transversal da amostra submetida à TC, é possível que sejam obtidos valores de densidade sub ou superestimados com relação ao valor obtido pelo método tradicional. Isto se deve principalmente a presença de macroporos ou pequenos pedregulhos no interior das possíveis seções submetidas a TC, como pode ser observado nas Figuras 12a, 16a e 20a. Isso irá ocorrer devido às diferenças inerentes a cada método, as quais podem ser responsáveis pelos resultados discrepantes obtidos de acordo com a referência utilizada no cálculo dos desvios relativos.

Pedrotti et al. (2004), em um estudo comparativo de medidas de ρ_s realizadas pelo MAV e pela TC de raios gama, com uso das mesmas amostras para a aplicação de cada método, obtiveram uma forte correlação linear entre estes dois métodos ($r=0,97$), indicando que os dados de TC são altamente confiáveis quando comparados aos dados obtidos pelo MAV. Em contrapartida, a relação entre os valores de ρ_s entre o MTC e MAV, obtidos por Pires; Rosa e Timm (2011), indica uma grande dispersão dos dados, com correlação praticamente nula ($r = 0,20$). No entanto, neste último trabalho, as amostras utilizadas na realização das medidas por meio de cada método não eram as mesmas.

Os métodos nucleares, tal como o MTC, possuem a vantagem de serem não invasivos e geralmente permitirem medidas rápidas de ρ_s em laboratório ou diretamente no campo, com o auxílio de equipamentos portáteis, ao passo que os métodos convencionais do torrão parafinado e anel volumétrico possuem a vantagem de serem mais baratos e acessíveis. Entretanto, estes últimos são métodos invasivos e ocasionam alterações na estrutura do solo dependendo da ferramenta de amostragem (MAV) e dimensões das amostras coletadas (PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2004).

4.4 DEFINIÇÃO DE INTERVALOS DE ÁREAS REPRESENTATIVAS VÁLIDOS PARA O MÉTODO DO ANEL VOLUMÉTRICO E PARA O MÉTODO DA TOMOGRAFIA

A abordagem do item 4.3 considera que a AER corresponde à área a partir da qual o critério em questão é atingido para todas as áreas restantes, com relação a cada uma das referências utilizadas para o cálculo dos desvios relativos. Neste sentido, foi possível estabelecer uma AER para a maior parte das amostras, de acordo com o critério de 4%, quando a referência era o valor de $\rho_s - TC_{UA}$. No entanto, com o uso do valor de $\rho_s - AV$ como referência, a AER para o critério de 4% somente foi possível para uma diminuta parcela de amostras de cada solo.

A partir de um enfoque diferenciado é possível estimar um intervalo de áreas representativas (IAR) para a ρ_s que seja válido tanto para o MAV quanto para o MTC. Os casos (*a e b*) das Figuras 13-15, 17-19 e 21-23, referentes aos esquemas 1, 2 e 3, para os solos LVA, LVE e NV, respectivamente, foram unidos e apresentados nas Figuras 30, 31 e 32. Assim, nos gráficos gerados a partir de tal união, os círculos referentes às áreas em que o critério de 4% foi atingido, para ambos os valores de referência, foram delimitadas por uma caixa e formam um IAR para a amostra em questão. A área associada ao valor de $\rho_{s-ideal}$ (definido no item 3.3f) será chamada de área ótima (AO) e é indicada nas figuras a seguir como um ponto preenchido.

Figura 30: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo LVA. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, ρ_s -TC_{UA} e ρ_s -AV. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra. A linha tracejada na vertical indica a área comum aos IARs.

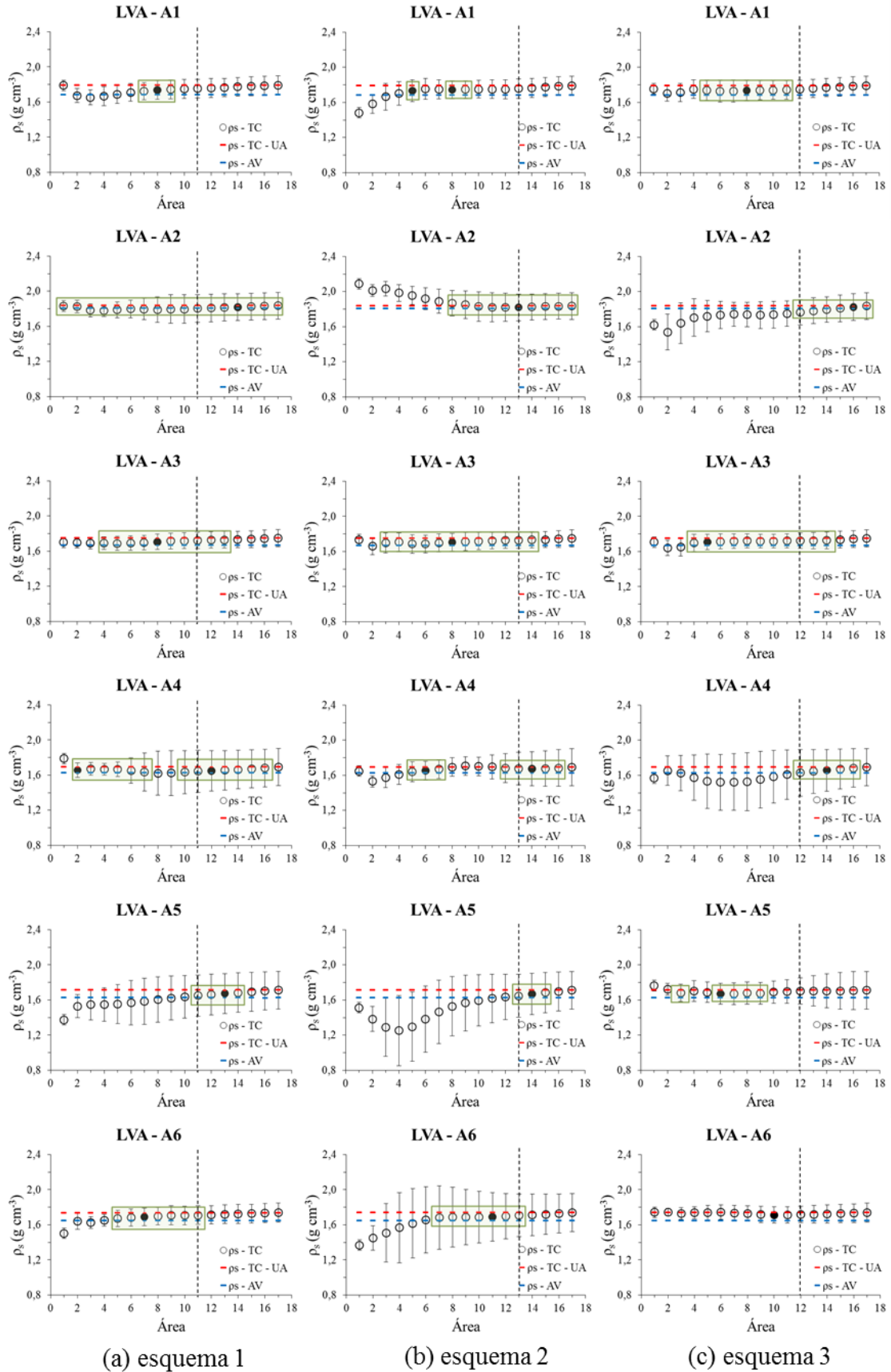


Figura 31: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo LVE. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, ρ_s -TC_{UA} e ρ_s -AV. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra.

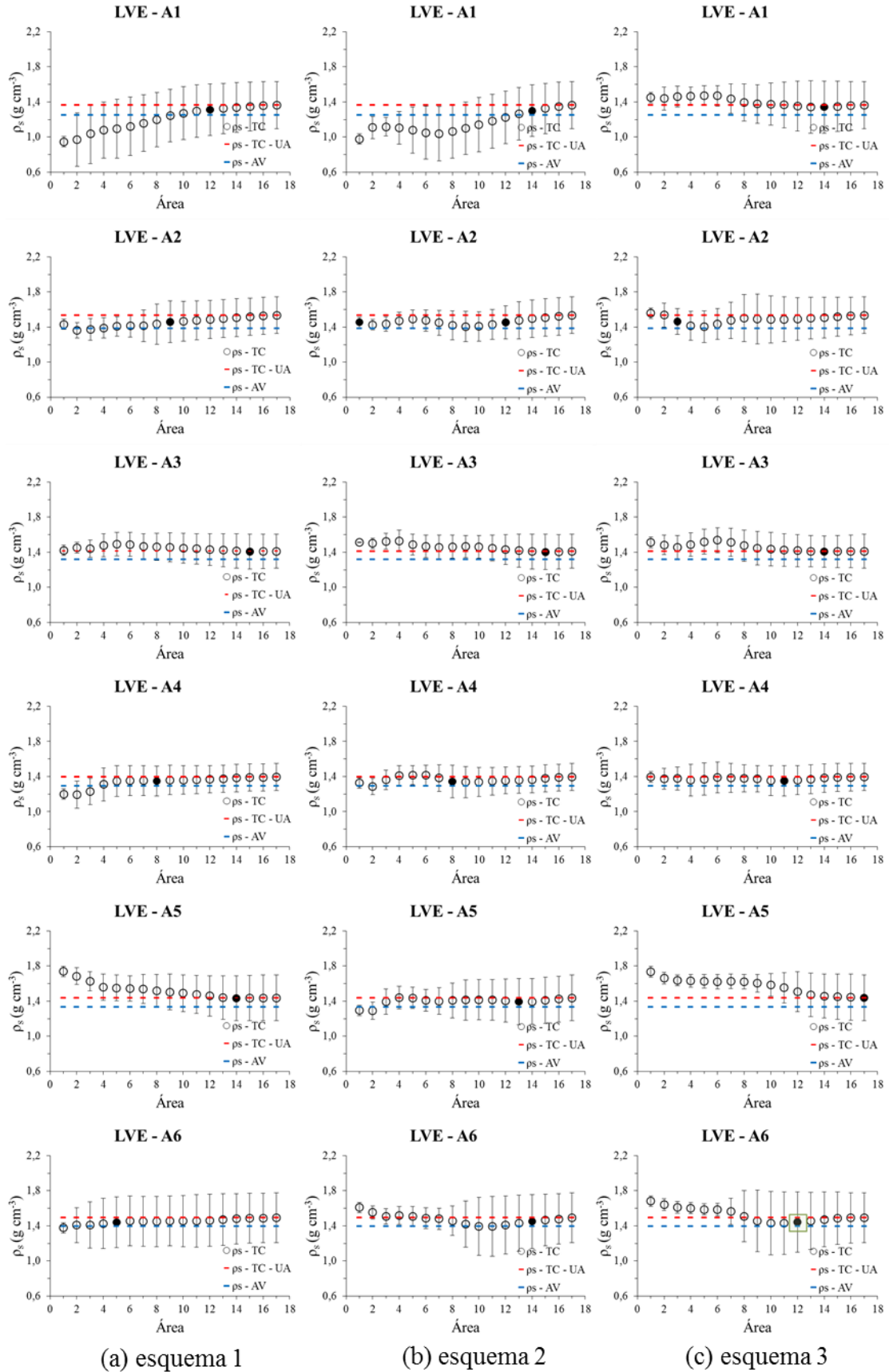
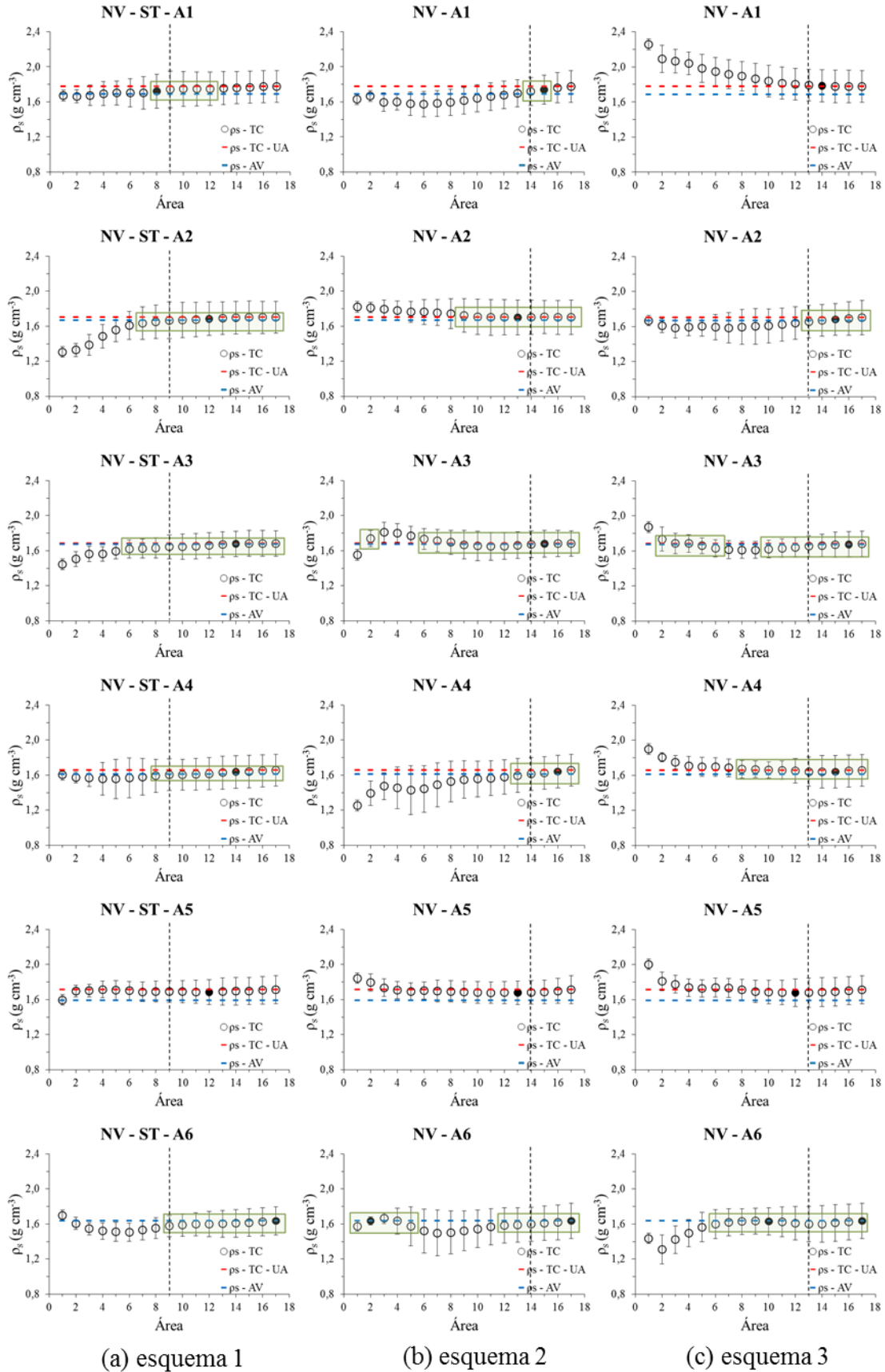


Figura 32: Gráficos dos valores de ρ_s -TC em função da área de acordo com (a) esquema 1, (b) esquema 2, (c) esquema 3, para as amostras do solo NV. As linhas tracejadas em vermelho e azul representam, respectivamente, ρ_s -TC_{UA} e ρ_s -AV. O círculo preenchido representa a área ótima e a caixa define o IAR válido para o MAV/MTC, para cada amostra. A linha tracejada na vertical indica a área comum aos IARs.



Nos casos em que foram encontrados mais de um IAR para a mesma amostra, aquele definido para as maiores áreas foi considerado o mais adequado. Os gráficos apresentados nas Figuras 30-32 mostram que, em geral, não existe uma regularidade entre as amostras para a definição do IAR. Contudo, algumas características notáveis, apresentadas a seguir, podem ser extraídas destas figuras.

A partir da Figura 30, nota-se que é possível encontrar um IAR formado de pelo menos 3, 2 e 4 áreas para todas as amostras do solo LVA segundo os esquemas 1, 2 e 3, respectivamente; com exceção da amostra 6 quando analisada sob o esquema 3, em que os valores de $\rho_s - TC$ se mantêm próximos da referência $\rho_s - TC_{UA}$, mas distantes da referência $\rho_s - AV$. Observa-se uma tendência em se encontrar a AO aproximadamente na área que corresponde ao valor médio do IAR. Isto é perceptível para nas amostras 1 e 3 (esquema 1), amostras 2, 3, 4 e 5 (esquema 2) e amostras 1 e 4 (esquema 3).

Ainda para o solo LVA, raros são os casos em que a AO é definida na mesma área para mais de uma amostra sob o mesmo esquema de seleção. Nem mesmo se encontra um IAR comum a todas as amostras para qualquer um dos esquemas. Porém, é possível determinar uma área comum (AC) aos IARs delimitados, considerada como a área ideal a ser utilizada para uma medida de ρ_s que seja confiável para ambas as referências. As áreas de número 11 e 13 foram definidas como as ACs para as amostras do solo LVA analisadas de acordo com os esquemas 1 e 2, respectivamente. Nestes casos, estas áreas estão contidas nos IAR de 83% das amostras. Já para o esquema 3, é possível encontrar uma AC para somente 50% das amostras (área 12), o que não constitui uma estimativa apropriada.

Para o solo LVE (Figura 31), nota-se que não foi possível determinar um IAR para nenhuma das amostras estudadas, sob nenhum esquema de seleção de áreas; a única exceção identificada é a amostra 6, quando analisada de acordo com o esquema 3, em que o desvio de 4% é alcançado para ambas as referências. A AO estimada para cada amostra/esquema equivale à área para a qual o valor de $\rho_s - TC$ mais se aproximou de $\rho_{s-ideal}$, mas isso não significa que o critério de 4% foi atingido para ambas as referências nesta área. Observa-se que para as amostras 2, 4 e 6 deste solo, a AO está localizada dentro de $\Delta\rho_s$, para os três esquemas adotados, superestimando $\rho_s - AV$ e subestimando $\rho_s - TC_{UA}$, praticamente na mesma proporção. Para a amostra 3, em contrapartida, a AO superestima $\rho_s - AV$ e coincide com $\rho_s - TC_{UA}$. Estes resultados refletem mais uma vez a heterogeneidade mais acentuada deste solo. Em decorrência disso, a diferença entre a análise de uma seção 2D e do volume 3D, de amostras do solo LVE, pode ser bastante crítica para a o tipo de análise aqui pretendida.

Com relação ao solo NV (Figura 32), percebe-se que a única amostra para a qual não foi possível delimitar um IAR, sob qualquer um dos esquemas, foi a amostra 5. Neste caso, $\rho_s - TC$ superestima $\rho_s - AV$. Em contrapartida, foi possível definir até mesmo um IAR comum a 83% das amostras, limitado entre as áreas A9-13 para o esquema 1 e A14-15 para o esquema 2. Para o esquema 3, o IAR comum definido por A13-17 foi possível para 67% das amostras. A amostra 1 apresenta o menor IAR para os esquemas 1 e 2 e nenhum IAR pôde ser definido por meio do esquema 3, para esta amostra. Neste último esquema, o menor IAR foi obtido para a amostra 2, de acordo com o esquema 3. A AC determinada para os esquemas 1, 2 e 3 correspondem às áreas de número 9 (83% das amostras), 14 (83%) e 13 (67%), respectivamente.

Tabela 6: Área para a qual AC, considerada como área ideal, foi determinada, de acordo com cada solo/esquema de seleção de áreas, suas respectivas medidas e o número de amostras em que a AC foi encontrada.

Solo	Esquema 1			Esquema 2			Esquema 3		
	AC	Medida (mm ²)	Nº amostras	AC	Medida (mm ²)	Nº amostras	AC	Medida (mm ²)	Nº amostras
LVA	11	432,0	5	13	393,3	5	12	334,0	3
LVE	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NV	9	349,7	5	14	457,4	5	13	393,3	4

A partir da Tabela 6, observa-se que a AC definida para os solos LVA e NV (esquemas 1 e 2) oferece uma confiabilidade razoável, uma vez que foi definida para 83% das amostras. Já para o esquema 3, estes valores podem ser duvidosos. Nota-se ainda que, assim como ocorreu para a AER definida para os solos LVA e NV, quando $\rho_s - TC_{UA}$ foi utilizada como referência, a AC obtida pelo esquema 3 também é menor do que a obtida via esquema 2. Lembrando que esta área é válida também com relação à $\rho_s - AV$. Isto confirma o fato de que, devido às características das amostras destes solos, a seleção de áreas com início na face superior indica a existência de setores mais homogêneos em comparação com a seleção feita a partir da face inferior para estes solos.

4.5 AER E ÁREA IDEAL, VÁLIDA PARA OS MÉTODOS DO AV E TC, ADOTADAS COMO RESULTADOS OFICIAIS PARA MEDIDAS DE DENSIDADE DOS SOLOS LVA, LVE E NV

Nota-se que grande parte dos trabalhos encontrados na literatura, que dizem respeito à estimativa de MERs, inclusive os trabalhos nos quais o presente estudo está fundamentado (VANDENBYGAART; PROTZ, 1999; BORGES; PIRES, 2012; BORGES; PIRES; PEREIRA, 2012), utilizam uma seleção de tamanhos (áreas ou volumes) consecutivos e *concêntricos* como método para a definição do tamanho representativo do meio poroso que está sendo considerado.

Desta forma, com base nos resultados apresentados até o momento, é possível estabelecer, para amostras dos solos LVA, LVE e NV coletadas em anel volumétrico, respectivamente, as seguintes AERs para medidas de densidade: 432,0 mm², 473,1 mm² e 349,7 mm². Esses valores foram obtidos por meio do esquema 1 de construção de áreas, o qual tem sua origem em um ponto central da imagem tomográfica, usando o valor de densidade obtido via MTC para a última área ali selecionada como referência para o cálculo do desvio relativo de 4%. O uso do valor de densidade obtido via MAV como referência não permitiu a definição de AERs confiáveis, devido ao fato de que este critério não foi atingido para um número suficiente de amostras sob essa condição.

As áreas ideais estabelecidas para medidas de densidade, válidas para o cálculo do DR de 4%, com o uso simultâneo dos valores de densidade obtidos via MTC e MAV como referência, por meio do esquema 1 de construção de áreas, são: 432,0 mm² e 349,7 mm², para os solos LVA e NV, respectivamente, sendo que não foi possível definir uma área ideal para o solo LVE com base no critério de 4%. Percebe-se que esses tamanhos de área ideais para os referidos solos estão em consonância com aqueles supracitados. Isso significa que, considerando o crescimento de áreas de forma concêntrica, a área ideal para medidas de densidade é coincidente com o tamanho da AER para os solos LVA e NV. O que diferencia estes dois resultados é o fato de que a área ideal consiste em um único tamanho de área, válido para ambos os métodos empregados, enquanto a AER representa um tamanho de área mínimo para medidas de densidade, de maneira que qualquer tamanho de área maior do que este é válido para medidas de densidade, de acordo com as condições impostas.

5. CONCLUSÃO

- 1) A aplicação da técnica tomográfica neste estudo possibilitou a análise qualitativa com resolução da ordem de milímetros da distribuição espacial da densidade das amostras, auxiliando na compreensão dos resultados quantitativos obtidos;
- 2) Foram definidas AERs distintas, para a densidade, para solos de textura arenosa e argilosa. Nestes casos, a AER definida para amostras de um solo com textura arenosa, em geral, é menor do que aquela definida para um solo de textura argilosa;
- 3) Observou-se que diferentes esquemas de construção de áreas consecutivas, para um mesmo solo, fornecem diferentes AERs para o parâmetro analisado. As AERs obtidas para a densidade de acordo com uma seleção de áreas partindo do centro, face inferior e face superior das imagens tomográficas foram 432,0; 393,3 e 334,0 mm² (solo LVA), 473,1; 457,4 e 393,3 mm² (solo LVE) e 349,7; 457,4 e 334,0 mm² (solo NV), respectivamente. Os resultados obtidos por meio da seleção de áreas partindo do centro das imagens tomográficas foram adotados como valores oficiais de AER dos solos estudados;
- 4) Foram verificadas diferenças na definição da AER, para a densidade, de acordo com a referência utilizada para o cálculo dos desvios relativos. Somente foi possível determinar AERs quando a referência utilizada foi o valor de densidade obtido pelo método da TC;
- 5) Desenvolveu-se um novo critério de análise de dados que possuam natureza semelhante aos estudados neste trabalho. Nesse sentido, foi possível delimitar um intervalo de áreas representativas, para cada amostra dos solos estudados, válido simultaneamente para os métodos do AV e da TC. Entretanto, este método de análise dos dados não foi eficiente para o solo LVE, o que se associa ao fato de que este é um solo de características mais heterogêneas em comparação com os solos LVA e NV. A partir dos IARs delimitados para as amostras dos solos LVA e NV, foram definidas, respectivamente, as seguintes áreas ideais para medidas de densidade do solo: 432,0 mm² e 349,7 mm².

REFERÊNCIAS

- ARTHUR, R. C. J. **Determinação do raio de influência de extratores de solução do solo e de tensiômetros utilizando a técnica de tomografia computadorizada de raios gama.** 2005, 66 f. Tese (Doutorado em Energia nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BARTZ, M. L. C. et al. As minhocas e o manejo do solo: o caso do plantio direto do arroz irrigado. **Revista Plantio Direto**, v. 1, p. 4–8, 2009.
- BAVEYE, P.; BOAST, C. W. Physical scales and spatial predictability of transport processes in the environment. In: D. L. Corwin; K. Loague; T. R. Ellsworth (Eds.); **Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone**. p.261–280, 1999. Washington: American Geophysical Union.
- BAVEYE, P. et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: Simulation with x-ray tomography data. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 775-784, 2002.
- BEAR, J.; CHENG, A. H. D. **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport**. New York: Springer Verlag, 2010. 834 p.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil Tillage Research**, v. 123, p. 43–49, 2012.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; PEREIRA, A. B. Computed Tomography to Estimate the Representative Elementary Area for Soil Porosity Measurements. **The Scientific World Journal**, v. 2012, 10 p., 2012.
- COSTANZA-ROBINSON, M. S.; ESTABROOK, B. D.; FOUHEY, D. F. Representative elementary volume estimation for porosity, moisture saturation, and air-water interfacial areas in unsaturated porous media: Data quality implications. **Water Resources Research**, v. 47, n. 7, 12 p., 2011.
- CRESTANA, S. et al. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 161-167, 1992.
- CRUVINEL, P. E. et al. X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750, 1990.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. **Geoderma**, v. 120, n. 3, p. 201–214, 2004.
- DOWNING, D.; CLARK, J. **Estatística Aplicada**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2000. 351p.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CNPS, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA – CNPS, 2006. 286p.

FOLEGATTI, M. V.; BRASIL, R. P. C. DO; BLANCO, F. F. Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandiuclalfic Eutrudox and a Typic Hapludox. **Scientia Agricola**, v.58, n.4, p.833-838, 2001.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. 494 p.

HORN, R.; BAUMGARTL, T. Physical Properties of Primary Particles. In: WARRICK, A. W. **Soil Physics Companion**. CRC Press LLC, 2002. cap 2. p. 17-43.

JURY, W. A.; HORTON, R. **Soil physics**. 6. ed. New Jersey: Wiley, 2004. 370 p.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEEE Press, 1999, 327p.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Physical Properties of Primary Particles. In: WARRICK, A. W. **Soil Physics Companion**. CRC Press LLC, 2002. cap 7. p. 249-283.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2nd ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

MARCOLIN, C. D. **Propriedades físicas de nitossolo e Latossolos argilosos sob plantio direto**. 2006, 110 f. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária) – Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 349–354, 2011.

PAGE, J. B. Role of Physical Properties of Clays in Soil Science. **Clays and Clay Minerals**, v. 1, n. 1, p. 167–176, 1952.

PEDROTTI, A. et al. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, v. 80, p. 115-123, 2005.

PIRES, L. F. et al. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. **Brazilian Journal of Physics**, v. 34, n. 3A, p. 728–731, 2004.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, n. 7, p. 857–863, 2004.

PIRES L. F. et al. Application of gamma-ray computed tomography to the analysis of soil structure before density evaluations. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 63, p. 505-511, 2005.

PIRES L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo**. 2006, 229 f. Tese (Doutorado em Energia nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Soil structure changes evaluated with computed tomography. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 45, n. 4, p. 391–400, 2010.

PIRES, L F; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparison of methods to evaluate soil bulk density. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 161–170, 2011.

PIRES, L. F. et al. Gamma-Ray Computed Tomography in Soil Science: Some Applications. In: L. Saba (Ed.); **Computed Tomography - Special Applications**. p. 293–318, 2011a.

PIRES, L F. et al. Representative Gamma-ray Computed Tomography Calibration for Applications in Soil Physics. **Brazilian Journal of Physics**, v. 41, p. 21–28, 2011b.

RAB, M. A.; HALING, R. E.; AARONS, S. R.; et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**, v. 213, p. 460–470, 2014.

RASA, K. **Physical properties of a boreal clay soil under differently managed perennial vegetation**. 2011, 45 f. Tese (MTT Agrifood Research Finland) - Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Finland.

RAZAVI, M.R., MUHUNTHAN, B.; HATTAMLEH, O. Representative elementary volume analysis of sands using X-ray computed tomography. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, n. 3, v. 30, p. 212-219, 2007.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 500p.

ROVERATTI, R. **Análise da variabilidade espacial e temporal de clima e das propriedades do solo cultivado com café**, 2006, 118 f. Tese (Doutorado em Energia nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SKOPP, J. M. Physical Properties of Primary Particles. In: WARRICK, A. W. **Soil Physics Companion**. CRC Press LLC, 2002. cap 1. p. 1-15.

SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil and Environmental Analysis: Physical Methods, Revised, and Expanded**, 2000. 656p.

STARR, J. L.; PARKIN, T. B.; MEISINGER, J. J. Influence of Sample Size on Chemical and Physical Soil Measurements. In: Annual meeting, Erosion impact on soil productivity. **Conference paper**, Soil Science Society of America, v. 59, p.713–718, 1995.

TIMM, L. C. et al. State-space approach to evaluate the relation between soil physical and chemical properties. In: Joint Meeting of the Czech Society of Soil Science and the Soil Science Society of America and International Conference of the Czech Society of Soil Science. **Conference paper**, Soil Science: Past, Present and Future. Praga: Czech University of Agriculture, 2001.

TIMM, L. C. et al. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 97-103, 2005.

TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; ROVERATTI, R.; et al. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 1, p. 55–64, 2006.

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, Amsterdam, v.89, p. 333-346, 1999.

ZHANG, D. et al. Pore scale study of flow in porous media: Scale dependency, REV, and statistical REV. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 8, p. 1195–1198, 2000.