

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Emergência de plântulas de soja e milho sob sistema plantio direto e sua
relação com a qualidade física da cama de semeadura**

Sueli Rodrigues

Tese apresentada para obtenção do
título de Doutora em Ciências. Área
de concentração: Solos e Nutrição
de Plantas

**Piracicaba
2013**

Sueli Rodrigues
Engenheira Agrônoma

Emergência de plântulas de soja e milho sob sistema plantio direto e sua relação com a qualidade física da cama de semeadura

Orientador:
Prof. Dr. **ÁLVARO PIRES DA SILVA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Rodrigues, Sueli

Emergência de plântulas de soja e milho sob sistema plantio direto e sua relação com a qualidade física da cama de semeadura / Sueli Rodrigues.- - Piracicaba, 2013.

123 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Textura do solo 2. Intervalo hídrico ótimo 3. Água disponível
4. Permeabilidade ao ar 5. Emergência 6. Tomografia Computadorizada I. **Título**

CDD 633.34
R696e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

DEDICO

À Deus.

Aos meus pais Iracilda e Ademir, pelo apoio e amor incondicional.

OFEREÇO

Aos meus irmãos Claudinei e Edson, e meu querido sobrinho Pedro Henrique, pela presença em minha vida.

*“E que seja sempre permanente essa vontade de ir além daquilo
que me espera.”*

Caio Fernando Abreu

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão,

À Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade concedida para a realização do curso de doutorado e do presente trabalho;

Ao meu orientador Prof. Dr. Álvaro Pires, pela orientação e apoio;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche (PDSE);

À Professora Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola, pela valiosa colaboração na realização do trabalho;

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pela concessão da área de estudo;

À University of Nottingham e ao Prof. Sacha Mooney e sua equipe de trabalho, pela acolhida, orientação, dedicação e ensinamento durante o doutorado sanduíche;

Aos membros da minha banca de qualificação, Paulo Leonel Libardi, Sérgio Oliveira Moraes e José Frederico Centurion pela avaliação e valiosas sugestões;

Aos funcionários e docentes do Departamento de Solos, em especial ao técnico Jair Ferrer e à secretária Célia Regina, pela ajuda, incentivo e ensino;

Aos meus queridos amigos da Física do Solo: Osvaldo, Sâmala, Lorena, Sara, Hélio, Renato e Getúlio;

Aos amigos e sempre companheiros Mariana, Bruna, Renata Bovi, Selene, Edison e Raul;

A todos os colegas da pós-graduação pela amizade e bom convívio;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esse acontecimento, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1 Revisão bibliográfica.....	21
2.1.1 Ambiente da cama de semeadura	21
2.1.2 Estabelecimento das plantas	22
2.1.4 Efeito do cultivo no estabelecimento das plantas.....	27
2.1.5 Sistema Plantio Direto.....	28
2.1.6 Avaliação da qualidade física do solo	29
2.2 Material e Métodos.....	31
2.2.1 Caracterização e demarcação da transeção.....	31
2.2.2 Avaliações em campo.....	32
2.2.2.1 Parâmetros de emergência das plantas	32
2.2.2.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo	33
2.2.3 Amostragem de plantas	34
2.2.4 Amostragem do solo.....	34
2.2.5 Atributos do solo	34
2.2.5.1 Permeabilidade do solo ao ar.....	34
2.2.5.2 Índice de continuidade de poros e porosidade bloqueada	36
2.2.5.3 Granulometria e carbono orgânico	37
2.2.5.4 Densidade do solo, densidade das partículas e porosidade total	37
2.2.5.5 Curva de retenção da água no solo e curva de resistência à penetração.....	38
2.2.6 Intervalo Hídrico Ótimo	41
2.2.7 Avaliação do sistema radicular de plântulas de milho por tomografia computadorizada de Raio-X.....	42
2.2.7.1 Preparo das amostras e germinação das sementes.....	42
2.2.7.2 Experimentos	43
2.2.7.3 Escaneamento utilizando micro-tomografia computadorizada (μ TC) de Raio-X.....	44
2.2.7.4 Processamento das imagens.....	44

2.2.8 Análise estatística.....	44
2.3 Resultados e Discussão	47
2.3.1 Estatística descritiva e análise exploratória dos dados.....	47
2.3.2 Granulometria e carbono orgânico.....	48
2.3.3 Avaliações em campo na cama semeadura durante a emergência da cultura da Soja – Safra 2010/2011	51
2.3.3.1 Conteúdo de água no solo	51
2.3.3.2 Resistência do solo à penetração.....	53
2.3.3.3 Parâmetros de emergência	55
2.3.3.4 Análise da estabilidade temporal para a umidade do solo	57
2.3.4 Avaliações em campo na cama semeadura durante a emergência da cultura do Milho (2011).....	60
2.3.4.1 Conteúdo de água no solo	60
2.3.4.2 Resistência à penetração	62
2.3.4.3 Parâmetros de emergência	63
2.3.4.4 Análise da estabilidade temporal para a umidade do solo	65
2.3.5 Permeabilidade ao ar.....	68
2.3.6 Índice de continuidade de poros.....	70
2.3.7 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	72
2.3.8 Relações entre os parâmetros de emergência das culturas e os atributos do solo.....	83
2.3.9 Tomografia Computadorizada	90
3 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS.....	103
ANEXOS	117

RESUMO

Emergência de plântulas de soja e milho sob sistema plantio direto e sua relação com a qualidade física da cama de semeadura

A qualidade da germinação das sementes, exclusivamente, não é garantia de uma emergência adequada e uniforme das plântulas. As condições físicas da cama de semeadura são essenciais para uma apropriada germinação, emergência e desenvolvimento da cultura. A heterogeneidade natural do solo pode criar diferentes microambientes resultando em condições desfavoráveis para o crescimento inicial das plantas. A hipótese deste trabalho é a de que a variabilidade textural do solo pode resultar em condições físicas heterogêneas, principalmente na cama de semeadura e, essas diferenças podem influenciar na eficácia da germinação e emergência das principais culturas cultivadas no verão na região Sul do país, especificamente soja e milho. Para tanto, foi avaliada a qualidade física da cama de semeadura de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto de longa duração e determinada a influência dos atributos físicos avaliados na emergência das plântulas destas culturas. O trabalho foi realizado numa transeção de 600 m localizada na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, em dois anos: 2010 (soja) e 2011 (milho). As avaliações em campo compreenderam a camada de 0-10 cm e as amostras de solo para determinações em laboratório foram retiradas na camada de 2,5-7,5 cm. Para cada amostra foi determinada a permeabilidade do solo ao ar, índice de continuidade de poros, porosidade bloqueada, porosidade de aeração, densidade do solo, curva de retenção de água e curva de resistência à penetração do solo. A partir dos dois últimos foi calculado o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) dessa camada para os trinta pontos demarcados ao longo da transeção. Os dados foram avaliados por meio de estatística descritiva, análise de variância e os dados de emergência e características das plântulas foram relacionados com os atributos físicos por meio de regressão *Stepwise*. Foram identificadas, de forma intercalada, duas classes texturais, argilo arenosa e franco argilo arenosa. O conteúdo de argila variou de 27,78 a 45,51 % e não teve influência no número final de plantas emergidas nos dois anos avaliados. A análise de estabilidade temporal da umidade do solo sugere que amostragens, para avaliação da umidade, devem ser realizadas na faixa da transeção que vai de 300 a 600 m por apresentarem valores mais próximos da média geral para qualquer tempo. O conteúdo de água disponível para as plantas sem que haja limitações de resistência e aeração, IHO, foi reduzido de um ano para o outro, indicando que a qualidade física da cama de semeadura do milho foi relativamente inferior a da soja. O limite inferior do IHO foi determinado pela umidade do solo, na qual a resistência à penetração é limitante, ao longo de toda a transeção. Os atributos físicos do solo não foram significativamente relacionados com os parâmetros de emergência das culturas, mas tiveram influência na altura da parte aérea e comprimento das raízes. O efeito das condições físicas do solo no crescimento radicular das plântulas de milho também foi evidenciado a partir da análise de imagens obtidas por μ TC de Raio-X.

Palavras-chave: Textura do solo; Intervalo hídrico ótimo; Água disponível; Permeabilidade ao ar; Emergência; Tomografia Computadorizada

ABSTRACT

Emergence of soybean and corn seedlings under no-tillage and its relation with the seedbed physical quality

The quality of seeds, exclusively, is no guarantee of an adequate and uniform seedlings emergence. The seedbed physical conditions are essential for a suitable germination, emergence and crop development. The natural soil heterogeneity can create distinct microenvironments resulting in unfavorable conditions for the plants initial growth. The work hypothesis is that the soil texture variability can result in heterogeneous physical conditions, mainly in the seedbed, and these differences may affect the effectiveness of germination and emergence of the major crops grown in summer in the Brazil southern, specifically, soybean (*Glycine max* L.) and maize (*Zea mays* L.). For this, it was assessed the physical quality of seedbed from an Oxisol under no-tillage long term and determined the influence of the soil physical attributes in the seedling emergence of these crops. The study was carried out in a 600 m field transection in the Universidade Estadual de Ponta Grossa farm, Paraná, in two years: 2010 (soybean) and 2011 (maize). The field assessments were carried out in the topsoil (0-10 cm) and soil samples for laboratory determinations were taken out from the 2.5-7.5 cm layer. For each sample was determined the soil air permeability, pores continuity index, blocked porosity, air-filled porosity, soil bulk density, water retention curve and resistance to penetration curve. From the two latter was calculated the Least Limiting Water Range (LLWR) for the thirty points bounded along the field transect. The data were analyzed using descriptive statistics, analysis of variance and, the emergence parameters and seedling characteristics were related to the soil physical attributes using Stepwise regression. Two soil textural classes, sandy clay and sandy clay loam, were identified in succession. Clay content ranged from 27.78 to 45.51 % and did not affect the final number of seedlings emerged in the two years. The analysis of temporal stability of soil water content suggests that future samplings, for the soil moisture evaluation, should be performed from 300 to 600 m along the transect, as it shows soil moisture average closer to the general mean at any time. The water content available to plants without any limitations of resistance and aeration, LLWR, was reduced from one year to the other, indicating that the physical quality of the maize seedbed was relatively inferior than that of soybean. The lower limit of LLWR was determined by the soil water content in which the resistance is restrictive, along the whole transection. The soil physical attributes were not significantly related with the crops emergence parameters, but had influence at the shoot height and root length. The effect of soil physical conditions on maize root growth was also attested from images obtained by X-ray μ TC.

Keywords: Soil texture; Least limiting water range; Available water; Air permeability; Emergence; Computed Tomography

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização do Município de Ponta Grossa (PR) e imagem da seção transversal delimitada na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). A distância entre cada ponto é de 20 m 32
- Figura 2 - Equipamentos utilizados em campo: medidor de força da fabricante Shimpo (a) para medir a resistência à penetração (kgf) e, sensor de umidade ML2x da fabricante Delta-T (b) para determinação do conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$) 33
- Figura 3 - Permeâmetro de carga constante de ar: (A) maleta de 60 x 20 x 12 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente, (A,a) reservatório de ar comprimido, (A,b) controlador e medidor de vazão mássica de ar, (A,c) manômetro eletrônico, (A,d) cabo de recepção de energia elétrica (110-240V), (A,e) e (E) conjunto composto por adaptador, amostra de solo e assento, (A,f) e (B) bom de ar manual, (C,a) regulador e seletor eletrônico de níveis de vazão mássica de ar, (C,b) atenuador de distúrbios atmosféricos, (C,c) inversor de tensão elétrica de 12 VCC para 110 VCA, (C,d) bateria de 12 V, (D,a) adaptador com anéis de vedação tipo O'ring, (D,b) assento para a amostra de solo, (D,c) anel volumétrico, (D,d) conexão tipo engate-rápido, (D,e) linha de pressão, (E,a) válvula de descarga 35
- Figura 4 - Principais características da relação $\log(\text{conteúdo volumétrico de ar, } \varepsilon_a) - \log(\text{permeabilidade ao ar } ka)$; slope N , intercepto com o eixo $\log(ka)$, M e o limite do conteúdo de ar, ε_b 36
- Figura 5 - Exemplos de resistência à penetração de amostras de solo, plotadas em função da altura do anel para em três conteúdos de água: (a) -10 kPa, (b) -100 kPa e (c) seco ao ar por 1 dia 40
- Figura 6 - Variação de textura e de carbono orgânico do solo ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto, localizada na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR 49
- Figura 7 - Precipitação diária e temperatura média do mês de novembro de 2010. A área em destaque refere-se aos dias avaliados que corresponde ao período de emergência da cultura da soja 52

Figura 8 - Variação do conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos doze dias avaliados correspondentes ao período de emergência da cultura da soja	52
Figura 9 - Valores médios de resistência à penetração (RP) em trinta pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto durante a emergência da cultura da soja (2010). N=12	54
Figura 10 - Emergência da cultura da soja (plantas m^{-1}) de acordo com o a classe textural e do conteúdo máximo e mínimo de argila	55
Figura 11 - Valores médios de taxa de emergência e conteúdo de argila para a cama de semeadura da cultura da soja (2010) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR	56
Figura 12 - Valores médios de índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura da soja (2010) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR.	57
Figura 13 - Variabilidade da umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros em quatro tempos de avaliação, avaliada na cama de semeadura da cultura da soja (2010)	58
Figura 14 - Diferença relativa média intertemporal classificada para a umidade do solo segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20m. Barras verticais correspondem ao desvio padrão. Os números centralizados correspondem aos pontos que devem ser adotados para medidas representativas da média enquanto que os extremos aqueles que mais se distanciam da média	59
Figura 15 - Precipitação diária e temperatura média do mês de outubro de 2011. A área em destaque refere-se aos dias avaliados que corresponde ao período de emergência da cultura do milho	61
Figura 16 - Variação do conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos oito dias avaliados correspondentes ao período de emergência da cultura do milho	61
Figura 17 - Valores médios de resistência à penetração (RP) em trinta pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto durante a emergência da cultura do milho (2011). N=12	63
Figura 18 - Emergência da cultura do milho (plantas m^{-1}) de acordo com o a classe textural e do conteúdo máximo e mínimo de argila	64

- Figura 19 - Valores médios de taxa de emergência e conteúdo de argila para a cama de semeadura da cultura do milho (2011) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR 65
- Figura 20 - Valores médios de índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura do milho (2011) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR 65
- Figura 21 - Variabilidade da umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros em quatro tempos de avaliação, avaliada na cama de semeadura da cultura do milho (2011) 66
- Figura 22 - Diferença relativa média intertemporal classificada para a umidade do solo segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20m. Barras verticais correspondem ao desvio padrão. Os números centralizados correspondem aos pontos que devem ser adotados para medidas representativas da média enquanto que os extremos aqueles que mais se distanciam da média 67
- Figura 23 - Exemplo da relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (k_a) e a porosidade de aeração (ϵ_a) para cada amostra (a) e para cada classe textural (b) 71
- Figura 24 - Umidade do solo, na cama de semeadura da cultura da soja, para cada faixa da transeção correspondentes as classes texturais franco argilosa (a, c) e franco argilo arenosa (b, d). A área hachurada corresponde à faixa de umidade disponível as plantas (IHO) 80
- Figura 25 - Umidade do solo, na cama de semeadura da cultura do milho, para cada faixa da transeção correspondentes as classes texturais franco argilosa (a, c) e franco argilo arenosa (b, d). A área hachurada corresponde à faixa de umidade disponível as plantas (IHO) 81
- Figura 26 - Relação entre o conteúdo de água no solo disponível para as plantas (IHO e AD) avaliados em uma na cama de semeadura da cultura da soja (2010) e do milho (2011) 83
- Figura 27 - Exemplos da dispersão dos dados de emergência das plantas de soja (a, c) e milho (b, d) em relação a algumas propriedades do solo (% argila, densidade do solo, Intervalo Hídrico Ótimo e resistência à penetração) 86

- Figura 28 - Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de conteúdo de água e tipo de solo. As barras representam o erro médio padrão da média 93
- Figura 29 - Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, mantidas a três conteúdos de água no solo. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas 94
- Figura 30 - Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de densidade do solo. As barras representam o erro médio padrão da média 96
- Figura 31 - Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, em baixa e alta densidade do solo. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas 97
- Figura 32 - Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de temperatura. As barras representam o erro médio padrão da média 98
- Figura 33 - Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, em baixa e alta temperatura. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo estatístico de argila, areia, silte e carbono orgânico (CO) para cada classe textural identificada ao longo da transeção de 600 m	49
Tabela 2 - Valores médios de umidade do solo e resistência à penetração para a cama de semeadura da cultura da soja – 2010	54
Tabela 3 - Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre séries de umidades (θ) obtidas em 30 pontos durante 12 dias na cama de semeadura da cultura da soja (2010)	60
Tabela 4 - Valores médios de umidade do solo e resistência à penetração para a cama de semeadura da cultura do milho – 2011	63
Tabela 5 - Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre séries de umidades obtidas em 30 pontos durante 7 dias	67
Tabela 6 - Resumo estatístico dos atributos físicos do solo da cama de semeadura (0-5 cm) da cultura da soja, para as quatro classes texturais identificadas ao longo de uma transeção de 600 m	68
Tabela 7 - Resumo estatístico dos atributos físicos do solo da cama de semeadura (0-5 cm) da cultura do milho, para as quatro classes texturais identificadas ao longo de uma transeção de 600 m	69
Tabela 8 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a permeabilidade do solo ao ar e as demais propriedades físicas do solo avaliadas na cama de semeadura da cultura da soja e do milho em área de plantio direto, Ponta Grossa-PR	70
Tabela 9 - Parâmetros da regressão dos valores da permeabilidade do solo ao ar (k_a) versus a porosidade de aeração (ϵ_a), obtidos pela equação $\log(k_a) = \text{Log}(M) + N \log(\epsilon_a)$ e, porosidade bloqueada (ϵ_b)	71
Tabela 10 - Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (D_s), conteúdo de água (θ) e resistência à penetração (RP) da cama de semeadura da cultura da soja e do milho	74
Tabela 11 - Ajuste das equações da curva de resistência do solo e da curva de retenção de água para a cama de semeadura da cultura da soja (2010)	76
Tabela 12 - Ajuste das equações da curva de resistência do solo e da curva de retenção de água para a cama de semeadura da cultura do milho (2011)	77

Tabela 13 - Valores críticos dos conteúdos de água usados para calcular o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para cada faixa de 20 m na cama de semeadura da cultura da soja e a porcentagem da água disponível (AD) que está disponível para as plantas no IHO	78
Tabela 14 - Valores críticos dos conteúdos de água usados para calcular o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para cada faixa de 20 m na cama de semeadura da cultura do milho e a porcentagem da água disponível (AD) que está disponível para as plantas no IHO	79
Tabela 15 - Matriz de correlação para os parâmetros de emergência, altura da planta, comprimento das raízes e massa seca com atributos do solo	82
Tabela 16 - Parâmetros da regressão do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Água Disponível (AD) versus a densidade do solo (Ds), obtidos pela equação: $IHO/AD = a + bDs$	83
Tabela 17 - Matriz de correlação para os parâmetros de emergência, altura da planta, comprimento das raízes e massa seca com atributos do solo	85
Tabela 18 - Resultado da regressão Stepwise para os parâmetros de emergência e da planta da soja	87
Tabela 19 - Resultados dos modelos de regressão para as características das plântulas e parâmetros de emergência da cultura da soja com os atributos do solo selecionados pela regressão <i>Stepwise</i>	88
Tabela 20 - Resultado da regressão Stepwise para os parâmetros de emergência e da planta de milho	89
Tabela 21 - Resultados dos modelos de regressão para as características das plântulas e parâmetros de emergência da cultura do milho com os atributos do solo selecionados pela regressão <i>Stepwise</i>	90
Tabela 22 - Valores de P para as características morfológicas das raízes e coeficiente de determinação (R^2) para a análise de variância	91

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da germinação das sementes, exclusivamente, não é garantia de uma emergência adequada e uniforme das plântulas. As condições da cama de semeadura são essenciais para uma apropriada germinação, emergência, desenvolvimento e consequente produção de determinada cultura. Desta forma, grande consideração deve ser dada à avaliação do estado desta camada, onde a semente é depositada, para verificar se ela oferece condições adequadas para o desenvolvimento inicial das plantas. Um importante aspecto é a qualidade física do solo na cama de semeadura que irá determinar a estrutura, resistência à penetração, densidade do solo, conteúdo de água, estabilidade de agregados, temperatura e aeração, todos de fundamental importância para uma emergência satisfatória. Condições adversas do solo como a compactação, excesso ou escassez de água e temperatura inadequada, afetam negativamente a emergência das plantas, resultando em um estande desuniforme que, conseqüentemente, pode comprometer a produtividade.

O sistema de manejo adotado interfere na qualidade física da camada cultivada por sua influência na estrutura do solo, principalmente agregação e porosidade que influenciará em outras características como temperatura, umidade, disponibilidade de oxigênio e resistência do solo à penetração. O sistema plantio direto, amplamente adotado na região sul do Brasil, se caracteriza pelo não revolvimento do solo e a manutenção de resíduos culturais na sua superfície. Esse sistema resulta em uma série de vantagens na conservação da estrutura do solo, porém, se o solo apresentar uma heterogeneidade natural diferentes microambientes podem ser criados resultando em condições desfavoráveis para a germinação. Um exemplo seria a variabilidade textural dentro de um campo agrícola visto a textura ser um atributo fundamental para o controle do conteúdo de água e disponibilidade de nutrientes.

A ocorrência de uma emergência desuniforme pode resultar em produções inferiores porque as plantas menores, que emergiram tardiamente, apresentam maior dificuldade na captação de luz solar suficiente para o seu pleno desenvolvimento e, pelo fato da perda de rendimento devido à emergência tardia de algumas plantas não poder ser compensada pelas primeiras plantas emergidas. Esse efeito é mais pronunciado na cultura do milho que é menos capaz de compensar a desuniformidade das plantas do que as plantas de soja por exemplo.

Fatores como características das variedades, densidade de semeadura e época de plantio tem sido largamente estudados como influentes no estabelecimento do estande das principais culturas, principalmente milho e soja. No entanto, pouca atenção tem sido dada para a influência da estrutura do solo, principalmente na cama de semeadura, no crescimento

inicial dessas culturas e, maiores considerações são necessárias para se avaliar a qualidade física do solo para a germinação das sementes, desenvolvimento das plantas e produtividade.

No Brasil, os poucos estudos sobre a cama de semeadura e sua influência no desenvolvimento inicial das plantas concentram-se na compactação causada pelo preparo do solo sob diferentes manejos e seus efeitos no crescimento das culturas. Há carência de estudos sobre os efeitos do não revolvimento do solo, característico dos sistemas conservacionistas, como o plantio direto, nos atributos físicos da cama de semeadura e seu impacto no estabelecimento das plantas.

Assim, a hipótese proposta pelo presente trabalho é a de que a variabilidade textural do solo em uma área cultivada sob sistema de plantio direto pode resultar em condições físicas heterogêneas, principalmente na cama de semeadura e, essas diferenças podem influenciar na eficácia da germinação e emergência das principais culturas cultivadas no verão na região, especificamente milho e soja.

O objetivo geral do estudo é avaliar a qualidade física da cama de semeadura de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto em duas safras agrícolas. Como objetivos específicos tem-se: (i) determinar os principais atributos físicos do solo para inferir sobre a qualidade física da cama de semeadura; (ii) identificar as diferenças nas propriedades físicas do solo de acordo com a sua classe textural e determinar os seus efeitos no estabelecimento da cultura; (iii) determinar a influência integrada dos atributos físicos do solo da cama de semeadura através do intervalo hídrico ótimo do solo e sua influência na emergência de milho e soja sob sistema plantio direto; (iv) mensurar a altura e massa das plantas emergidas, assim como a taxa de germinação e relacioná-los com os atributos físicos determinados.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Ambiente da cama de semeadura

A cama de semeadura consiste na camada superficial do solo onde são depositadas as sementes e posteriormente ocorrem os processos de germinação, emergência e estabelecimento das culturas (ATKINSON; SPARKES; MOONEY, 2007. Para Hakansson, Myerbeck e Etana (2002) a cama de semeadura é definida como uma camada superficial solta e rasa originada diretamente das operações de preparo do solo e da abertura do sulco para a semeadura das culturas. Anterior ao plantio o processo de preparo do solo é o mais importante, principalmente a criação de uma boa cama de semeadura, a fim de assegurar que o plantio seja uniforme e que as plantas emerjam rapidamente, uniformemente e bem espaçadas. Braunack e Dexter (1989) relatam que o preparo do solo é realizado para modificar as suas condições de forma a melhorar o desenvolvimento da cultura. Uma boa cama de semeadura deve apresentar um equilíbrio de modo que o solo seja solto o suficiente para facilitar o processo de emergência e alongamento inicial das raízes, mas, ao mesmo tempo deve exibir um acondicionamento firme de maneira a assegurar um bom contato entre o solo e a semente para que esta consiga absorver água suficiente do meio para dar início ao processo de germinação.

O preparo da cama de semeadura não necessariamente envolve o uso de implementos agrícolas, ele pode ser realizado com pouco ou nenhum preparo do solo, se as condições de clima e solo forem favoráveis para a manutenção de uma cobertura vegetal permanente e uso de herbicida para controle de plantas daninhas, como é o caso do sistema de plantio direto. O que deve ser primordial é que a cama de semeadura apresente uma adequada condição estrutural para o bom desenvolvimento das plantas. Os principais fatores associados com o desenvolvimento da estrutura do solo e estabelecimento das plantas são divididos em fatores primários e secundários. Fazem parte dos primeiros a temperatura, umidade, resistência do solo, disponibilidade de oxigênio, profundidade de semeadura e estrutura do solo. Com relação aos secundários destacam-se o clima, preparo, cultura anterior, época de semeadura, contato solo-semente, resíduos culturais, pragas e doenças, variabilidade da semeadura e condição anterior a semeadura (HÅKANSSON; VONPOLGÀR, 1984; HAKANSSON; MYRBECK; ETANA, 2002; LIPIEC; HATANO, 2003; LICHT; AL-KAISI, 2005). As interações entre todos estes fatores criam as diferenças fundamentais que podem determinar

uma se cama de semeadura é “boa” ou “ruim” em termos de maximizar o potencial de produção.

Diversos fatores biológicos, químicos e físicos afetam a qualidade da cama de semeadura e estes estão diretamente ou indiretamente relacionados com as práticas de manejo (HAKANSSON; MYRBECK; ETANA, 2002; LIPIEC; HATANO, 2003). As mudanças na estrutura do solo, resultantes do preparo em sistemas de manejo convencionais, são facilmente percebidas, devido ao intenso revolvimento do solo. No entanto, as alterações na estrutura do solo, principalmente na camada superficial, em sistemas de manejo conservacionistas como o plantio direto, que não realizam um preparo preliminar, são pouco conhecidas. Neste sistema a cama de semeadura resulta da abertura de um sulco pelos implementos rompedores acoplados na semeadora.

2.1.2 Estabelecimento das plantas

Após o processo de germinação e emergência as plantas podem ser consideradas estabelecidas quando se apresentarem suficientemente intactas para ter a expectativa de alcançarem a maturidade (BRADBEER, 1988). A germinação da semente se inicia pela absorção de água do meio e este também deve fornecer temperatura e disponibilidade de oxigênio adequado. A plântula é dependente dos nutrientes armazenados na semente até que ocorra o desenvolvimento da raiz (radícula) e haste (SOFFE, 2003). A emergência descreve o estágio posterior à germinação até o ponto em que o desenvolvimento da raiz e da haste não são mais dependentes do nutriente armazenado, mas tornam-se autotróficas.

As fases de germinação e emergência são, de fato, uma das mais importantes para o sucesso de uma lavoura, pois é nela que é determinado o número de plantas por hectare que consiste no primeiro e um dos mais determinantes fatores de rendimento. A cultura do milho, por exemplo, apresenta baixa capacidade de compensação de falhas no número e na distribuição de plantas. A emergência no campo ocorre entre 4 e 10 dias após a semeadura, variando conforme a cultura, e em condições adequadas de temperatura e umidade do solo. Uma germinação lenta, resultante de baixas temperaturas ou déficit hídrico pode predispor a plântula a uma menor resistência a condições adversas do ambiente, bem como ao ataque de patógenos. O estabelecimento é alcançado uma vez que o estágio vegetativo ocorre e, a taxa de estabelecimento é medida pelo número de plantas sobreviventes.

2.1.3 Fatores que afetam o estabelecimento das plantas

O ambiente da cama de semeadura, determinado pela resistência, conteúdo de água, temperatura, aeração, matéria orgânica entre outras características, tem papel fundamental na determinação do vigor da planta e conseqüente produtividade. Para que as plantas apresentem um adequado desenvolvimento inicial, a semente deve encontrar um ambiente propício para desenvolver todo o seu potencial. Um bom contato solo-semente é pré-requisito fundamental para a rápida emergência e estabelecimento ideal da cultura (PERDOK; KOUWENHOVEN, 1994; BROWN et al., 1996). Para tanto, o solo deve apresentar propriedades físicas favoráveis como uma boa retenção de água, aeração, temperatura adequada e ausência de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular, condições estas que permitirá um bom desencadeamento dos processos de emergência.

Vários fatores podem afetar o desenvolvimento das plantas sendo eles tanto fatores diretos como indiretos. A água, temperatura, resistência mecânica e oxigênio, constituem os fatores que afetam diretamente enquanto a densidade do solo, textura, agregação e estabilidade de agregados assim como a distribuição do tamanho dos poros exercem influências indiretas sobre o crescimento das plantas (LETEY, 1985).

Dentre esses fatores, a água tem um papel fundamental. A necessidade de adequado suprimento hídrico para o pleno desenvolvimento dos vegetais, decorre das múltiplas funções que ela desempenha na fisiologia das plantas, pois, praticamente todos os processos metabólicos são influenciados pela sua presença e também por sua influência na aeração, temperatura, transporte e absorção de nutrientes. No processo de germinação as sementes devem alcançar de 35 a 50% do seu peso seco antes que a germinação ocorra (BLAKE; SPINK; DYER, 2003). Assim, deficiências hídricas iniciais podem afetar sensivelmente o processo germinativo comprometendo o estabelecimento da cultura.

A umidade do solo não é importante somente no desencadeamento da emergência das sementes, ela também influencia no período adequado para cultivo e uso de implementos agrícolas (ARVIDSSON; KELLER; GUSTAFSSON, 2004). A umidade adequada para realizar a semeadura deve ser na faixa friabilidade do solo, pelo fato de os teores de água permitirem bom rendimento da operação e boa qualidade do trabalho realizado (GASSEN; GASSEN, 1996). A semeadura realizada quando o solo se encontra acima do limite de plasticidade causa compactação e conseqüente redução da sua capacidade de infiltração e, em solo seco, resulta em menor eficiência dos implementos de preparo que, por sua vez, ocasionam menor contato solo-semente (KONDO; DIAS Jr, 1999). Brown et al. (1996)

relataram que, no processo de semeadura de culturas anuais, o condicionamento físico do solo ao redor das sementes reveste-se de importância capital para o bom desenvolvimento inicial da cultura de forma a assegurar uma população adequada de plantas. Deficiências hídricas podem afetar consideravelmente o processo germinativo comprometendo o estabelecimento da cultura e, deficiências posteriores poderão paralisar o crescimento, bem como retardar o desenvolvimento reprodutivo das plantas.

Os sistemas de manejo também controlam a dinâmica da retenção de água no solo. No sistema plantio direto, o tráfego de máquinas e o não revolvimento do solo pode acarretar em maior compactação, situação frequentemente relatada em diversas pesquisas (DERPSCH et al., 1991; TORMENA; ROLOFF, 1996; SECCO, 2003; SILVA, 2003). Essa maior compactação pode causar modificações na retenção de água do solo, decorrentes de alterações sofridas na distribuição do diâmetro dos poros, principalmente redução da macroporosidade. O aumento da retenção de água no solo sob plantio direto tem sido observado por alguns autores (SALTON; MIELNICZUK, 1995; URCHEI, 1996; STONE; SILVEIRA, 1999). Todavia, a disponibilidade de água para as plantas vai depender do nível de compactação e da distribuição do diâmetro de poros resultante.

A temperatura do solo também é um importante fator para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois afeta a germinação das sementes, o desenvolvimento radicular, as atividades dos micro-organismos, a taxa de difusão de solutos e gases, as reações químicas, dentre outros processos que ocorrem no solo. A faixa ideal de temperatura e umidade considerada ótima para a germinação das sementes é específica para cada cultura. Por exemplo, temperaturas situadas entre 25 e 30°C propiciam as melhores condições para o desencadeamento dos processos de germinação das sementes e emergência das plântulas de milho (BERGER, 1962), assim como da cultura da soja (EMBRAPA).

Outro fator relacionado diretamente com o desenvolvimento das plantas, é a resistência mecânica do solo à penetração. A resistência à penetração é um parâmetro comumente utilizado para avaliar o efeito de sistemas de manejo (BENGHOUGH; MULLINS, 1990; DIAS JR.; PIERCE, 1996). Ela aumenta com o aumento da compactação e com o decréscimo da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas, ocasionando redução no desenvolvimento radicular (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Pesquisas têm mostrado que a resistência é um importante fator de estresse no solo, visto que ela pode controlar o crescimento da planta reduzindo a taxa de alongamento das raízes (TAYLOR; RATLIFF, 1969; BOONE; VEEN, 1982; MATERECHERA; MLOZABANDA, 1997; ZOU ET AL., 2001). Os efeitos deletérios no crescimento e desenvolvimento

das raízes causados pelo aumento da resistência do solo podem levar às raízes a mudarem o seu comportamento e características de crescimento a fim de compensar estresse sofrido (BINGHAM; BENGOUGH, 2003; CLARK; WHALLEY; BARRACLOUGH., 2003).

Jakobsen e Dexter (1987) determinaram que uma resistência maior que 0,8 MPa, restringiu a emergência e o crescimento das plantas e em valores maiores que 5MPa não houve crescimento. Nasr e Selles (1995) forneceram um guia de <1,5-1,4 MPa para limitações de resistência do solo na fase de estabelecimento das plantas de trigo. Reduções na taxa de alongamento das raízes resultante da dificuldade dessas em gerar força suficiente para deslocar as partículas do solo e estenderem-se através dos espaços podem representar sérios problemas na agricultura. Taylor e Ratliff (1969) relataram que a taxa de alongamento média para o estabelecimento satisfatório de algodão e amendoim em condições normais no Alabama foi de 1,0 cm d⁻¹ e sugeriram que o estabelecimento da cultura pode ser deficiente quando a resistência do solo é suficiente para reduzir o alongamento da raiz abaixo deste valor crítico, assim como o acesso à água e nutrientes também será restrito (CLARK; WHALLEY; BARRACLOUGH, 2003).

No entanto, uma compactação moderada pode, às vezes, ser vantajoso para alguns tipos de solo, sugerindo que há um grau de compactação ótimo para o crescimento das culturas (HAMZA; ANDERSON, 2005; ATKINSON; SPARKES; MOONEY, 2009; BOUWMAN; ARTS, 2000). Esta moderada compactação pode ser benéfica por aumentar a retenção de água e favorecer um maior contato entre as raízes das plântulas germinadas e beneficiar as condições do solo necessárias para o bom estabelecimento da cultura (ATKINSON; SPARKES; MOONEY, 2009).

Com relação à aeração do solo, esta se refere à capacidade do solo de armazenar e transmitir ar, particularmente os gases mais comuns encontrados no ar atmosférico, o gás oxigênio (O₂) e o dióxido de carbono (CO₂). O O₂ presente na atmosfera do solo, assim como o CO₂ faz parte da respiração das raízes das plantas e dos microrganismos. Diversos autores evidenciaram a importância da aeração como um fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, crescimento e produção das culturas (GLIŃSKI; LIPIEC, 1990; BOONE; VEEN, 1994; CZYŻ; KUKIER, 1997; CZYŻ; TOMASZEWSKA; DEXTER, 2001).

Para que o processo de respiração das raízes seja adequado, é necessário que o solo esteja adequadamente aerado, permitindo uma livre troca do O₂ e CO₂ entre o solo e a atmosfera. Para fins práticos, considera-se o valor de porosidade de aeração de 10%, ou seja, 10% da porosidade total do solo, livre de água, como o valor mínimo para garantia de uma

taxa de difusão de oxigênio adequada para um desenvolvimento vegetal satisfatório (BETZ et al., 1998; ZOU et al., 2000; MCKENZIE; MCBRATNEY, 2001).

A quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade do solo em transmitir O₂ até as raízes é fundamental para a avaliação da qualidade física do solo (SILVA et al., 2009). A disponibilidade de oxigênio para o sistema radicular pode ser avaliada pela determinação da permeabilidade do solo ao ar, definida como a habilidade do solo em transmitir ar através de poros interconectados em resposta a um gradiente de pressão de ar, por um processo chamado fluxo de massa (ROSEBERG; MCCOY, 1990; LAL, 2000). Roseberg e McCoy (1990) destacam que assim como a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar é uma função do conteúdo volumétrico de água, porosidade, distribuição e geometria de poros, portanto, é uma medida sensível às mudanças na estrutura do solo (FISH; KOPPI, 1994). Blackwell et al. (1990) usaram a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração para caracterizar o solo e usaram esta relação para identificar mudanças na estrutura do solo causada pelas práticas de manejo e atividade biológica.

Com relação aos fatores indiretos que afetam o crescimento das plantas, estes são fortemente relacionados. A proporção de areia, silte e argila, que define a textura do solo, exerce grande influência no estabelecimento e desenvolvimento das plantas. A distribuição dos diferentes tamanhos de partículas é importante para o entendimento do comportamento e manejo do solo (BRADY; WEIL, 1999). Blake, Spink e Dyer (2003) reportou que a textura foi responsável por 11,6% e 4,9% na variação do estabelecimento das culturas de cereais nas estações de outono e primavera, respectivamente. Os autores também sugeriram que solos arenosos tiveram melhor estabelecimento do que outros solos, como solos de textura franca e argilosos.

O arranjo das partículas primárias de areia, silte e argila, juntamente com os compostos orgânicos do solo, estabelece as proporções dos componentes sólidos, líquidos e gasosos, que virá a determinar a resistência à penetração das raízes e a disponibilidade de água e oxigênio. A organização desses componentes determina a estrutura do solo (KAY, 1990), a qual controla a magnitude com que os seus atributos físicos interferem diretamente no crescimento das plantas e está prontamente sujeira a modificações pelo manejo do solo. O manejo inadequado do leva a degradação da estrutura do solo, afetando principalmente o espaço poroso e a estabilidade dos agregados.

A densidade do solo é outro fator que pode afetar o pleno desenvolvimento das plantas. Masle e Passioura (1987) definiram que solos com densidades muito altas ou muito baixas podem reduzir o estabelecimento das culturas, enquanto que Nasr e Selles (1995)

encontraram emergências mais rápidas e completas em densidades menores que $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$. Solos com alta densidade, associados à alta resistência, limitam o desenvolvimento das raízes devido à restrição causada pela resistência mecânica elevada e o reduzido suprimento de oxigênio (GREGORY, 2006). Bowen (1981) determinaram que o impedimento ao crescimento das raízes ocorreu em densidades entre $1,55$ e $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ dependendo da textura do solo. Assim como os demais fatores citados, a densidade do solo também é amplamente afetada pelo manejo do solo. Ball et al. (1997) encontraram que a densidade do solo foi 15% menor em solos cultivados sob sistema de manejo convencional e sistema reduzido em comparação ao plantio direto, no entanto, entre os dois primeiros não houve diferença significativa.

O conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) também pode ser citado como um fator que afeta indiretamente o desenvolvimento e estabelecimento das plantas. A MOS tem papel vital na estabilidade do solo através de sua ligação com as partículas minerais formando agregados (TISDALL; OADES, 1982). Ela também contribui para a fertilidade do solo como fonte de nutrientes para as culturas como nitrogênio, fósforo e enxofre. O sistema de plantio direto, em geral, possui agregados mais estáveis e maior conteúdo de MOS em comparação com áreas manejadas com práticas convencionais (BRONICK; LAL, 2005). Larney et al. (1997) encontrou cerca de $2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ a menos de MO em solos sob sistema convencional em comparação com aqueles com cultivo menos intensivo após 16 anos de estudo.

2.1.4 Efeito do cultivo no estabelecimento das plantas

Tem-se, portanto, pelo exposto, que o condicionamento inadequado na fase inicial de crescimento das plantas pode limitar o seu estabelecimento e desenvolvimento nos estádios posteriores e, um dos principais responsáveis pela formação deste ambiente inadequado é o cultivo do solo. O cultivo é responsável por criar uma condição que permita o estabelecimento e crescimento da cultura. Porém, o cultivo pode causar alterações no ambiente do solo que não são condicentes com o efetivo desenvolvimento das plantas, tais como compactação, encrostamento, degradação do solo e perda de nutrientes.

O tráfego de máquinas agrícolas, comum em todos os sistemas de cultivo, até mesmo no plantio direto, pode acarretar em compactação do solo, principalmente no ambiente da cama de semeadura, devido ao seu peso, passagens excessivas e efeito residual. Pagliai et al. (2003) encontrou que a reduzida porosidade causada pelo preparo foi fortemente correlacionada com o aumento na resistência do solo e decréscimo na condutividade hidráulica. O aumento da resistência do solo tanto pela compactação superficial como em

subsuperfície tem efeito direto no crescimento das plantas tanto em termos de emergência, produção e desenvolvimento de raízes (HASSAN, 2007).

2.1.5 Sistema Plantio Direto

O sistema plantio direto (SPD), mais que uma prática conservacionista ou de manejo do solo, é um sistema de produção agrícola. Inicialmente sua adoção se deu como um mecanismo para redução dos problemas com erosão e seus efeitos prejudiciais à produtividade das lavouras. Contudo, a adoção desse sistema se expandiu por várias regiões do país, tornando-se uma ótima alternativa econômica para o agricultor, tanto em combustível quanto em tempo, permitindo até três safras em um ano, além de inúmeras outras vantagens (KASSAM et al, 2009). Atualmente, a produção de grãos no Brasil é conduzida em quase sua totalidade sob esse sistema (MELLO; VAN RAIJ, 2006) assim como nas demais zonas produtoras da América do Sul (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009).

A área cultivada sob SPD no Brasil é de aproximadamente 25,5 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2011). O Rally da Safra, que consiste num levantamento privado anual da safra de grãos (soja e milho) no país, realizou uma avaliação no início de 2010 sobre a situação do plantio direto nas regiões do Brasil. Na região Sul, 97% da produção de grãos é cultivada sob esse sistema de produção agrícola e a pesquisa indicou que o aumento da produtividade e a conservação do solo foram os motivos mais frequentemente citados pelos produtores que adotam o SPD (RALLY DA SAFRA, 2011).

O SPD envolve um conjunto de técnicas integradas que visam aperfeiçoar a expressão do potencial genético de produção das culturas com concomitante melhoria das condições ambientais (MACHADO; BERNADI; SILVA, 2004). A manutenção dos restos vegetais da cultura anterior, o emprego de rotação ou sucessão de culturas, redução da taxa de mineralização da matéria orgânica, o favorecimento da atividade biológica no controle de pragas e plantas daninhas e a melhoria da agregação do solo, são fatores que caracterizam esse sistema de produção (SEIXAS, 2001).

O fundamento do SPD está na ausência de revolvimento do solo, manutenção de cobertura permanente e rotação de culturas. A não mobilização do solo juntamente com o acúmulo de matéria orgânica provoca alterações nos atributos físico-hídricos do solo. O fato de não haver mobilização contribui para maior agregação das partículas do solo (STONE; SILVEIRA, 2004). Devido esse não revolvimento, as pressões causadas pelo tráfego de máquinas e/ou animais e acomodação natural das partículas (CARVALHO Jr.; FONTES; COSTA, 1998) podem elevar o estado de compactação do solo. Essa compactação pode

atingir níveis prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e à produtividade (PEÑA; GOMES; SOUSA, 1996; TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998).

2.1.6 Avaliação da qualidade física do solo

O desenvolvimento de índices para medir a qualidade do solo tem sido o objetivo de muitos estudos (PAGLIAI et al., 2003). No entanto, poucos procuraram combinar as propriedades físicas dentro de um único índice de qualidade que relaciona o estabelecimento das plantas como o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), proposto por (DA SILVA; KAY; PERFECT, 1994; LEÃO et al., 2006)

O IHO é definido como a faixa de conteúdo de água no solo em que são mínimas as limitações ao crescimento das plantas devido à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (DA SILVA et al., 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998, 1999). A possibilidade de integrar em um único parâmetro, os efeitos de fatores limitantes às plantas, faz do IHO um índice útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Este intervalo é calculado como a diferença entre o limite superior e inferior de disponibilidade de água no solo. Fora da faixa do IHO as limitações associadas ao crescimento de plantas são mais acentuadas do que dentro do IHO. O limite superior do IHO é definido pela umidade em que a porosidade de aeração é inferior a 10% (θ_{PA}) ou pela umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), enquanto o limite inferior é definido pela umidade em que a resistência à penetração é o fator restritivo ao crescimento das plantas (θ_{RP}) ou pela umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (DA SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Esses limites foram obtidos de estudos que associaram às condições físicas ideais ao crescimento de plantas a uma porosidade de aeração mínima de 10% (GRABLE; SIEMER, 1968), ao valor de 2,0 MPa como um limite de resistência à penetração para o crescimento de raízes (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966; SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA et al., 1998), além de uma ampla disponibilidade de água no solo limitada pela capacidade de campo (-0,01 MPa) e ponto de murcha permanente (-1,5 MPa), definida como água disponível (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927).

O desempenho no uso do IHO foi demonstrado por Silva e Kay (1996) que determinaram que o mesmo foi positivamente correlacionado com o teor de matéria orgânica e negativamente com a densidade e teor de argila dos solos. Os mesmos autores verificaram

que a taxa de crescimento da planta diminuiu com o decréscimo do IHO, encontrando uma alta correlação entre essas variáveis. Dessa forma, Tormena et al. (2007) relataram que o IHO significa grande avanço em termos de biofísica do solo e é um bom indicador para traduzir a qualidade física dos solos às plantas.

O IHO tem sido amplamente utilizado para avaliar a qualidade física e estrutural do solo, considerando, principalmente os diferentes sistemas de manejo (ZOU et al., 2000; BENJAMIN; NIELSON; VIGIL, 2003; WU et al., 2003; ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004; LEÃO et al., 2006; TORMENA et al., 2007; FIDALSKI; TORMENA; SILVA, 2010). No entanto, sua utilização para avaliar a qualidade física do solo, em SPD, por ocasião da semeadura, que irá definir a qualidade da germinação e emergência das plantas, é praticamente inexistente.

Novas tecnologias vem sendo empregadas a cada dia para o estudo do solo, principalmente do ambiente solo-semente, na tentativa de melhor caracterizar o ambiente do solo circundante a semente. Vários autores vêm desenvolvendo trabalhos utilizando a técnica de tomografia computadorizada (TC) aplicada à física do solo. As principais aplicações da TC na física do solo no Brasil envolvem estudos da distribuição da densidade do solo e conteúdo de água, mudanças na porosidade, mudanças natural e artificial na estrutura do solo, movimento da água no solo, qualidade da amostra de solo e efeito de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo (PIRES et al., 2010).

A maioria dos estudos relacionados à caracterização das condições físicas do solo não oferecem informações sobre a morfologia das raízes crescendo no meio. O entendimento de como as raízes interagem com o solo tem sido limitado devido a natureza opaca deste meio que impede a visualização do sistema radicular sem perturbá-lo (PERRET et al., 2007). A técnica não invasiva de micro tomografia de Raio-X (μ TC) tem permitido avanços na avaliação não destrutiva das raízes pela superação das limitações impostas pela opacidade do solo (AYLMORE, 1993; TRACY et al., 2010; MOONEY et al. 2012). O uso da TC permite a captura de informações geométricas e estruturais do sistema radicular sem desestruturá-lo além de características do solo onde ele está se desenvolvendo, o que seria difícil de obter por metodologias tradicionais de análise de raízes, como o processo de lavagem.

Estudos sobre a estrutura do solo através da análise de imagens tem-se concentrado sobre o impacto direto das práticas de manejo, principalmente em termos de compactação e poucos tem se concentrado nos efeitos sobre as culturas e menos ainda sobre a germinação e emergência das sementes.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização e demarcação da transeção

A área de estudo pertence à Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), e consiste na área de produção da fazenda. Está localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, com coordenadas 25° 05' 52" S e 50° 02' 43" O. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2000). Possui declividade entre 3 a 8% e altitude de 1080 m. A classificação do clima, segundo Köppen, é mesotérmico subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação média anual de 1545 mm e temperatura média anual de 18,7°C (IAPAR, 2000). O solo da área é originado de retalhamento de folhelhos e arenitos das formações Ponta Grossa e Furnas (BHERING et al., 2008). A área delimitada para o estudo compreendeu uma secção transversal de 600 m (Figura 1) ao longo da qual foram demarcados 30 pontos, espaçados 20 m cada.

O sistema de manejo empregado na área é o plantio direto, adotado a mais de 18 anos, com rotação de culturas com milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) na primavera/verão, e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.) no outono/inverno. Os manejos de adubação utilizados na área consistiram, para a safra da soja, de tratamento de sementes com Standak (200 mL/100kg) e Nitrogin (300 mL/100 kg) e 300 kg ha⁻¹ de fertilizante 02-20-20 na linha de semeadura. Para o cultivo do milho o manejo equivaleu ao tratamento de sementes com Standak (60 mL/saca) e Cruiser (120 mL/saca) e 350 kg ha⁻¹ de fertilizante 10-20-20.

Em duas safras agrícolas, Soja 2010/2011 e Milho 2011/2012, foram avaliadas as condições físicas do solo na cama de semeadura, durante os estágios de germinação e emergência dessas culturas. A semeadura de ambas as culturas foi efetuada com uma semeadora-adubadora para plantio direto, com discos para a deposição das sementes a 0,04 m e hastes sulcadoras para disposição do adubo a 0,10 m. Essa semeadora realiza a mobilização do solo somente nas linhas de plantio.

A semeadora-adubadora foi regulada para uma densidade de semeadura de 18 sementes por metro para a cultura da soja e 5,6 sementes por metro na semeadura do milho. Grande atenção foi dada para a regulagem da máquina, visto que a qualidade do estande final também está relacionada com o desempenho dessa. A semeadora-adubadora apresentou adequada regularidade, com uma distribuição precisa de sementes. Dada a relativa uniformidade de distribuição de sementes na linha, nos dois anos, uma linha de plantio foi selecionada, na qual foram feitas as avaliações diárias de dados de emergência. A partir de

cada ponto, foram avaliados 4 metros da linha de plantio (1 metro x 4 repetições) linearmente, totalizando 120 medições diárias (30 pontos x 4 repetições). Após a completa emergência das plântulas, constatada pela estabilidade na contagem do número de sementes por metro, amostras indeformadas de solo foram coletadas no centro de cada metro avaliado utilizando anéis com volume de aproximadamente 221 cm³ (7,5 cm de diâmetro x 5 cm de altura). As avaliações em campo foram realizadas na profundidade de aproximadamente 0,0-0,10 m, enquanto que as amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0,025-0,075 m, que representam a profundidade explorada pela planta nestes estágios fenológicos de germinação e emergência.

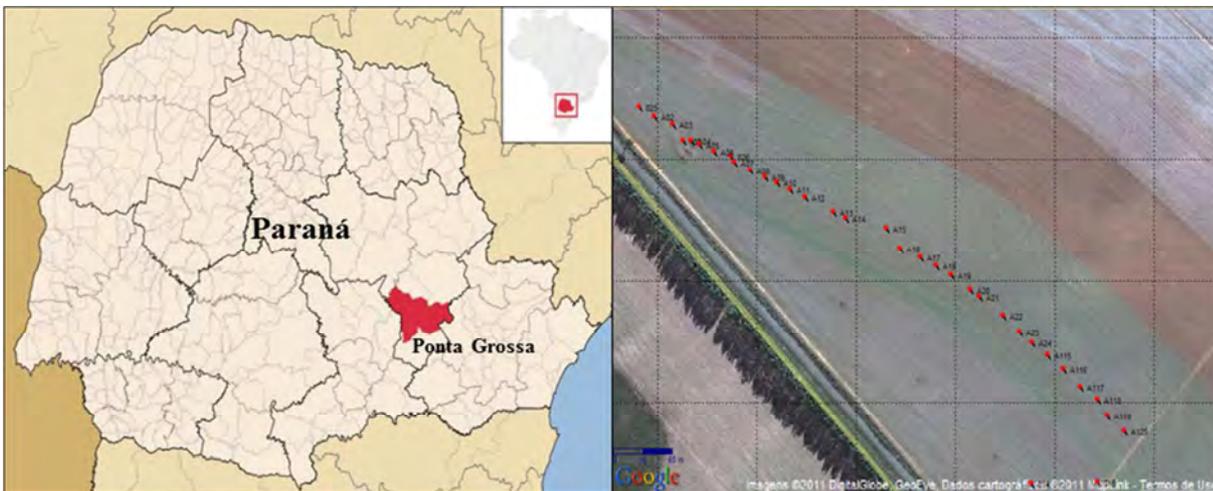


Figura 1 – Localização do Município de Ponta Grossa (PR) e imagem da seção transversal delimitada na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). A distância entre cada ponto é de 20m

2.2.2 Avaliações em campo

2.2.2.1 Parâmetros de emergência das plantas

A partir da emergência das primeiras plântulas após a semeadura, foi feita a contagem diária do número de plântulas emergidas por metro em todos os pontos. A emergência da cultura da soja e do milho ocorreu ao sexto e sétimo dia após a semeadura, respectivamente. A contagem foi encerrada após a estabilização do número de plântulas emergidas por metro, que se deu 12 dias após a semeadura da soja e 11 dias para a cultura do milho. Com os dados de emergência (plantas m⁻¹) foram calculados:

- (i) índice de velocidade de emergência (IVE), em plantas m⁻¹ (MAGUIRE, 1962):

$$IVE = \frac{N_1}{t_1} + \frac{N_2}{t_2} + \dots + \frac{N_n}{t_n} \quad (1)$$

(ii) taxa de emergência (TE), em % (BILBRO; WANJURA, 1982):

$$TE = \frac{N_f}{N_s} \times 100 \quad (2)$$

onde N_1, N_2, N_n é o número de plântulas emergidas no primeiro, no segundo e no enésimo dia de contagem; t_1, t_2 e t_n é o número de dias da sementeira à primeira, segunda e enésima contagem. N_f e N_s são o número final de plântulas emergidas e o número de sementes semeadas por metro, respectivamente.

2.2.2.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo

A resistência à penetração juntamente com o conteúdo volumétrico de água no solo foram avaliados diariamente na linha de plantio selecionada, na profundidade de aproximadamente 10 cm, desde a sementeira até o último dia de contagem da emergência. Para a determinação da resistência foi utilizado um medidor de força da fabricante Shimpo modelo FGV-X. A este equipamento foi acoplada uma haste de aproximadamente 10 cm com um cone na base com diâmetro de 3,5 mm e ângulo de 30°. Os dados foram obtidos na unidade de quilograma força (kgf) e posteriormente convertidos para MPa utilizando a área da base do cone. A umidade no campo foi mensurada com o sensor ThetaProbe ML2x da fabricante Delta-T Devices Ltda. Este sensor foi desenvolvido para medir o teor volumétrico de água no solo, utilizando uma técnica que combina com a de outros métodos, como o TDR (Time-Domain Reflectometry) ou medição de capacitância. Uma medida simples de ondas é usada para determinar a impedância de uma matriz de sensores e, por conseguinte, o conteúdo de água volumétrico do solo (Figura 2).



Figura 2 – Equipamentos utilizados em campo: medidor de força da fabricante Shimpo (a) para medir a resistência à penetração (kgf) e, sensor de umidade ML2x da fabricante Delta-T (b) para determinação do conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$)

2.2.3 Amostragem de plantas

Ao final da avaliação da emergência foram coletadas cinco plantas em cada ponto, nos dois anos de avaliação, totalizando 150 plantas por ano (30 pontos x 5 plantas). As plantas foram acondicionadas em recipiente térmico, para evitar a rápida perda da turgescência, e levadas para o laboratório onde foram cuidadosamente lavadas, para a retirada do solo aderido as raízes, e secas com papel absorvente. Para cada planta foram determinados: altura da parte aérea, comprimento da raiz, massa seca da parte aérea e das raízes. Para a determinação da massa seca, parte aérea e raízes foram destacadas e levadas à estufa de ventilação forçada por 72 horas em temperatura de 70° C e posteriormente pesadas em balança de precisão.

2.2.4 Amostragem do solo

Ao final das determinações realizadas em campo foram coletadas amostras de solo indeformadas, utilizando anéis volumétricos com dimensões de 5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro (aproximadamente 221 cm³). As amostras foram retiradas no centro de cada metro onde foram avaliados os parâmetros de emergência. Foram coletados 120 anéis (30 pontos x 4 repetições) na profundidade de 0,025-0,075 m em cada ano agrícola. As amostras foram devidamente embaladas e acondicionadas em recipientes seguros de modo a protegê-las até o transporte ao laboratório.

Uma vez que a acurácia das determinações realizadas em amostras indeformadas está diretamente relacionada com a qualidade da amostragem, para assegurar a obtenção de amostras de qualidade, que mantivessem a integridade da estrutura do solo, foi utilizado um amostrador eletrônico, desenvolvido por Figueiredo (2010) que permite a retirada de amostras indeformadas sem a aplicação de pancadas e com possibilidade de regulagem da velocidade que foi de 2 mm s⁻¹ para esta amostragem.

2.2.5 Atributos do solo

2.2.5.1 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (k_a) foi determinada para todas as amostras. A umidade do solo, por ocasião da determinação, foi àquela em que as amostras estavam equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa. Os ensaios foram realizados utilizando-se um permeômetro desenvolvido por Figueiredo (2010). O princípio de funcionamento do aparelho consiste na utilização de uma amostra de solo, confinada lateralmente em um anel volumétrico e com livre fluxo de gases em suas extremidades, a qual é submetida a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar para gerar distintos gradientes de

pressão. Esse equipamento é adaptado daqueles desenvolvidos por Ball, Harris e Burford (1981) e Chief, Ferré e Nijssen (2006) e foi idealizado para ter alta portabilidade (Figura 3).

A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$q = -\frac{ka}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right) \quad (3)$$

sendo, q (L/T), ka (L²), P a pressão de ar (M/L T²), z a distância (L) na direção do movimento de ar no sistema poroso, η a viscosidade do ar (M/LT), ρ a densidade do ar (M/L³) e g a aceleração da gravidade (L/T²).

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L³/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L²] e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER et al., 1995), a Eq. (3) foi utilizada para as estimativas da ka :

$$ka = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dz}{dP} \right) \quad (4)$$

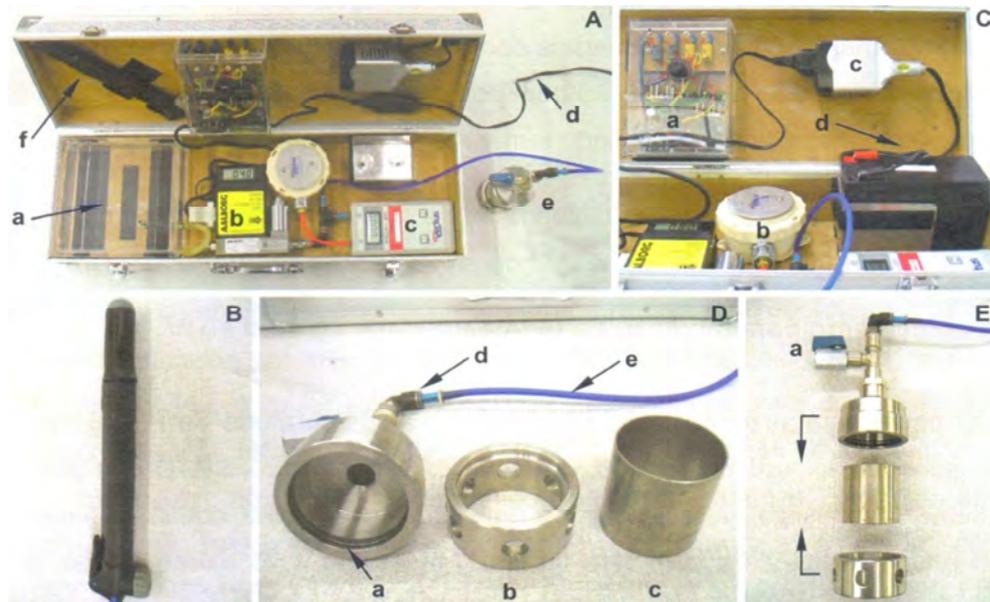


Figura 3 – Permeâmetro de carga constante de ar: (A) maleta de 60 x 20 x 12 cm (comprimento, largura e altura), (A,a) reservatório de ar comprimido, (A,b) controlador e medidor de vazão mássica de ar, (A,c) manômetro eletrônico, (A,d) cabo de recepção de energia elétrica (110-240V), (A,e) e (E) conjunto composto por adaptador, amostra de solo e assento, (A,f) e (B) bom de ar manual, (C,a) regulador e seletor eletrônico de níveis de vazão mássica de ar, (C,b) atenuador de distúrbios atmosféricos, (C,c) inversor de tensão elétrica de 12 VCC para 110 VCA, (C,d) bateria de 12 V, (D,a) adaptador com anéis de vedação tipo O’ring, (D,b) assento para a amostra de solo, (D,c) anel volumétrico, (D,d) conexão tipo engate-rápido, (D,e) linha de pressão, (E,a) válvula de descarga. Fonte: Figueiredo (2010)

2.2.5.2 Índice de continuidade de poros e porosidade bloqueada

Através da relação entre a permeabilidade do solo ao ar (k_a) e a porosidade de aeração (ϵ_a) é possível estimar a continuidade dos poros da amostra pela equação de Kozeny-Carman segundo Ball, OSullivan e Hunter (1988):

$$k_a = M\epsilon_a^N \quad (5)$$

onde M e N são constantes empíricas. O expoente N , segundo estes autores, é um índice de continuidade de poros, pois reflete o aumento da k_a com o aumento da ϵ_a ou ainda o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial a medida que aumenta a fração de poros disponíveis para o fluxo. Esta relação foi ajustada para uma forma linearizada da Eq. (5):

$$\log(k_a) = \log(M) + N \log(\epsilon_a) \quad (6)$$

É possível, a partir desta equação e como mostra a Figura 4, retirar três informações: o coeficiente angular da reta (N), o intercepto com o eixo $\log(k_a)$ no qual $\log(\epsilon_a) = 0$ (M) e o intercepto com o eixo $\log(\epsilon_a)$ quando $\log(k_a) = 0$ (ϵ_b). Este último, que corresponde ao valor de ϵ_a quando a k_a é de apenas $1\mu\text{m}^2$ é tido como o conteúdo de ar limitante e, foi proposto por Ball, Osullivan e Hunter (1988) e Schjønning et al. (2002) como a porção de poros associado à aeração mas que, no entanto, estão bloqueados e, portanto, não participa do transporte convectivo do ar. Desta forma, valores de ϵ_a abaixo do ponto ϵ_b expressam o cessamento do fluxo de ar no solo devido à descontinuidade da rede de poros disponíveis para a aeração, e pode ser obtido da Eq.(6) por:

$$\epsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (7)$$

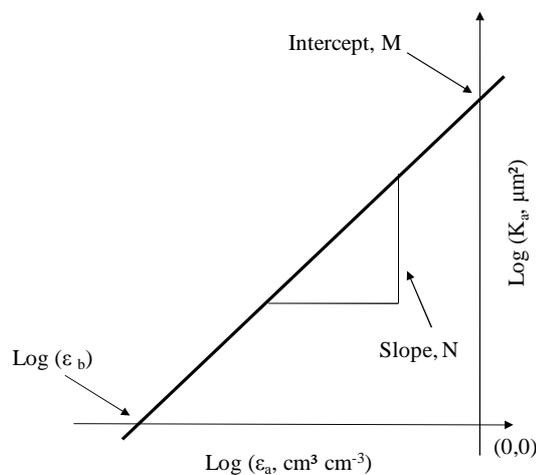


Figura 4 - Principais características da relação \log (conteúdo volumétrico de ar, ϵ_a) – \log (permeabilidade ao ar K_a); slope N , intercepto com o eixo $\log(K_a)$, M e o limite do conteúdo de ar, ϵ_b

2.2.5.3 Granulometria e carbono orgânico

A análise da proporção relativa das frações areia, silte e argila (granulometria) foi realizada pelo método do densímetro Gee e Bauder (2002). Essa determinação foi realizada para cada ponto, com 4 repetições, visto a importância para o trabalho da identificação precisa da variação textural ao longo da transeção.

O conteúdo de carbono orgânico foi determinado por titulometria segundo metodologia proposta por Raij et al. (2001) que baseia-se na oxidação do carbono orgânico com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico, utilizando como catalizador da oxirredução o calor desprendido na diluição do ácido sulfúrico, sendo realizada titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. O método trata-se de uma modificação daquele conhecido por Walkley e Black, proposto para medir a matéria orgânica facilmente oxidável ou decomponível do solo, que inclui húmus e resíduos, mas exclui carvão e carbonatos (WALKLEY, 1947; WALKLEY; BLACK, 1934).

Para o cálculo do conteúdo de carbono orgânico (CO) [g kg^{-1}] considera-se o volume (cm^3) utilizado na prova em branco (V_{br}), o volume (cm^3) de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (V_{am}) e o peso (g) da amostra (P). O sulfato ferroso amoniacal é padronizado por meio da titulação da prova em branco. A concentração (mmol L^{-1}) de Fe^{2+} na solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal para a reação com o dicromato é dada por:

$$C_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{10 \times 0,167 \times 6}{V_{br}} \quad (8)$$

$$CO = \frac{(V_{br} - V_{am} \times C_{\text{Fe}^{2+}} \times 0,003 \times 1000)}{P} \quad (9)$$

2.2.5.4 Densidade do solo, densidade das partículas e porosidade total

Finalizadas todas as análises nas amostras, estas foram secas em estufa à 105°C por um período de 24h para a determinação da densidade do solo (D_s , em Mg m^{-3}), calculada pela razão entre massa de solo seco e volume do anel (GROSSMAN; REINSCH, 2002). A densidade de partículas do solo (D_p , em Mg m^{-3}) foi determinada utilizando-se um picnômetro a gás (Hélio), modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation[®]), que utiliza cerca de 8 g de terra fina seca em estufa a partir de uma amostra composta obtida dos anéis coletados para cada ponto (4 repetições). O equipamento realiza

três leituras e fornece um valor médio de D_p . A porosidade total (PT), em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, por sua vez foi calculada a partir dos valores de D_s e D_p pela equação:

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (10)$$

2.2.5.5 Curva de retenção da água no solo e curva de resistência à penetração

Após a realização das medidas de k_a as amostras foram novamente saturadas para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRAS) que descreve a relação entre o conteúdo de água no solo e a força ou tensão com que esta água está retida. As curvas foram determinadas de acordo com procedimento descrito por Dane e Hopmans (2002). A saturação das amostras foi realizada pela adição gradual de lâmina de água até o recobrimento de $\frac{3}{4}$ do anel onde permaneceram por um período de 24 horas. A umidade do solo da parte superior da curva, composta pelos potenciais mátricos mais altos, 0 a 0,01MPa, foi determinada com mesa de tensão, preenchidas com pó de quartzo e com regulagem da tensão através de flautas. Para a parte inferior da curva ($>0,01\text{MPa}$) foram utilizadas placas porosas e psicrômetro WP4 (Water Potential Meter).

Usualmente, os métodos tradicionais de obtenção da CRAS envolve a separação de um conjunto de amostras que são submetidas a tensões pré-definidas em mesa de tensão ou placas porosas e, após o equilíbrio, essas amostras são pesadas e um conjunto de pontos de tensão e o conteúdo de água é obtido. Posteriormente ajusta-se a curva obtida com esses pontos. No entanto, o tempo de equilíbrio em cada tensão é bastante variado e, conseqüentemente, a determinação de uma curva completa pode levar um tempo total de semanas. Vários autores tem adotado a técnica de secagem por evaporação ao ar e determinação da tensão utilizando tensiômetros para a determinação da CRAS (BOSO; ROMERO; TARANTINO, 2005; TOKER et al., 2004; LOURENÇO et al., 2011). Essa técnica permite um tempo total de preparação e testes de 3 a 5 dias e os resultados experimentais estão de acordo com resultados de determinações realizadas pelos métodos convencionais (TOKER et al., 2004).

Neste estudo as CRAS foram determinadas adotando-se parcialmente este procedimento. Foram estabelecidos sete pontos de relação potencial mátrico e umidade. Para os potenciais menores, correspondentes a parte superior da curva (0,002; 0,004; 0,006; e 0,01 MPa) foram utilizadas mesas de tensão, enquanto que a umidade no potencial de 0,1MPa foi determinada pelo uso de placas porosas conforme Dane e Hopmans (2002). Para a obtenção

dos últimos dois pontos remanescentes, correspondentes a parte inferior da curva, foi adotado o procedimento de secagem ao ar e determinação do potencial utilizando o WP4. Uma desvantagem deste procedimento seria a secagem desuniforme da amostra, visto que uma limitada área da amostra fica mais exposta à atmosfera. No entanto, para contornar este problema, após o tempo de evaporação as amostras foram embaladas em papel filme e mantidas em incubadora BOD durante dois dias a fim de uniformizar a umidade dentro da amostra.

O ensaio de resistência à penetração (CRP) foi determinado em três dos potenciais determinados: 0,01; 0,1 MPa e após secagem ao ar por um dia. As medidas foram realizadas após as amostras alcançarem o equilíbrio em cada um desses potenciais, totalizando três ensaios de RP na mesma amostra, conforme procedimento descrito por Bradford (1986). As três perfurações foram distribuídas de forma equidistantes na área da amostra. Este procedimento permite a determinação da curva de retenção da água no solo e a curva de resistência à penetração na mesma amostra permitindo, posteriormente o cálculo do IHO individual para cada amostra.

Para a determinação da resistência foi utilizado um penetrômetro eletrônico de bancada. Os registros de cada ensaio foram obtidos por um sistema automatizado. Foram descartadas as medidas obtidas até a profundidade de 10 mm consideradas como bordadura. Os parâmetros ajustados no equipamento permitiram a obtenção de um valor de RP a cada aproximadamente 0,67 segundos, obtendo cerca de 200 leituras por ensaio. Os valores de RP foram plotados em função da altura do anel. Uma faixa representativa foi selecionada a partir de uma observação visual dos dados adquiridos na profundidade de 5 a 45 mm, como mostrado na Figura 5. Nota-se pela Figura que o estabelecimento de um padrão mais representativo para o perfil de resistência iniciou-se a partir de 10 mm de profundidade. Nas seleções visuais foi utilizada a razoabilidade para a exclusão de valores de RP não representativos causados por fatores como pedaços de rochas ou outros materiais duros presentes na amostra, rachaduras, bioporos, etc. Após a seleção dos valores uma média foi calculada como representativa da amostra, este procedimento foi repetido para as três determinações. Após completar as medições no penetrômetro nos três potenciais as amostras foram secas em estufa à 105°C e pesadas para a determinação da densidade do solo.

Nas duas determinações (CRA e CRP) as massas das amostras, em cada potencial, foram convertidas em conteúdo volumétrico de água. A densidade do solo utilizada para a conversão foi aquela determinada no final das avaliações.

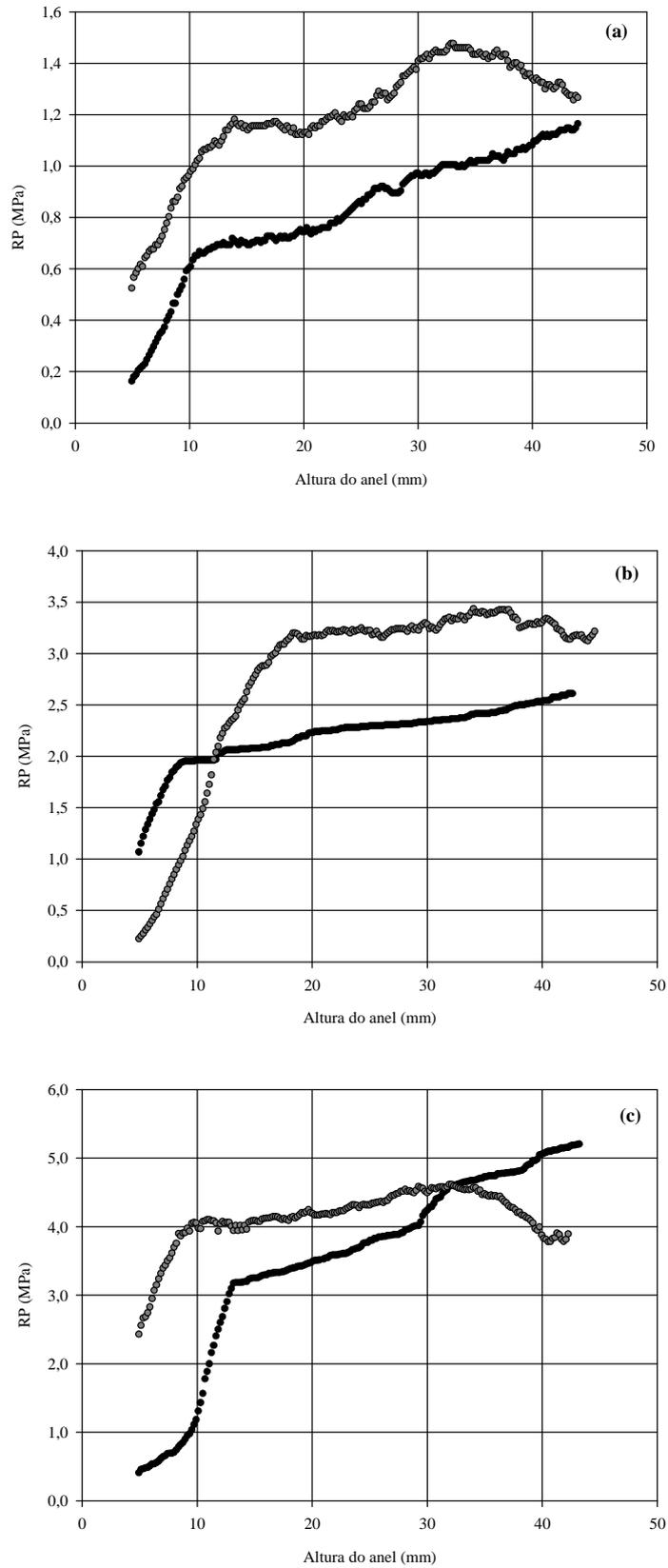


Figura 5 – Exemplos de resistência à penetração de amostras de solo, plotadas em função da altura do anel para em três conteúdos de água: (a) -10 kPa, (b) -100 kPa e (c) seco ao ar por 1 dia

2.2.6 Intervalo Hídrico Ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi calculado para cada ponto seguindo a metodologia descrita por Topp et al. (1994). Para cada ponto, os dados das quatro repetições foram agrupados para o ajuste das curvas e, uma média foi obtida para estimativa dos valores limitantes na determinação do IHO.

Para a determinação do IHO são necessárias a obtenção de quatro informações: (i) umidade do solo a 0,01 MPa, tida como umidade na capacidade de campo, θ_{CC} (REICHARDT, 1988); (ii) umidade do solo a 1,5 MPa, referida como umidade no ponto de murcha permanente, θ_{PMP} (SAVAGE et al., 1996); (iii) umidade em que a porosidade de aeração do solo é $\leq 10\%$, θ_{PA} (GRABLE; SIEMER, 1968) e (iv) a umidade em que a resistência do solo à penetração é impeditiva ao crescimento das raízes, relatada na literatura como 2,0 MPa, θ_{RP} (TAYLOR et al., 1966).

Os itens (i) e (ii) foram obtidos a partir dos parâmetros obtidos da curva de retenção de água no solo, enquanto o item (iv) é estimado a partir da curva de resistência do solo à penetração.

A curva de retenção de água foi determinada pela relação entre umidade volumétrica (θ) e potencial mátrico (Ψ) de acordo com Ross et al. (1991) e ajustado por Leão et al. (2005), pela equação:

$$\theta = \exp(a + bDs)\psi^c \quad (11)$$

onde θ é o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ é o potencial de água no solo (MPa); e a , b , e c são parâmetros de ajuste do modelo.

A curva de resistência à penetração foi obtida pela umidade volumétrica e densidade do solo usando o modelo proposto por Busscher (1990):

$$RP = d\theta^e Ds^f \quad (12)$$

onde RP é a resistência a penetração (MPa), e , d , e f são os parâmetros do modelo ajustado.

As umidades do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente foram calculadas usando o modelo de curva de retenção de água Eq. (11) pelas equações:

$$\theta_{CC} = \exp(a + bDs) \times 0,01^c \quad (13)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(a + bDs) \times 1,5^c \quad (14)$$

A umidade do solo na qual a resistência a penetração atinge o valor crítico de 2 MPa foi calculada usando o modelo de curva de resistência da Eq. (12) por:

$$\theta_{RP} = \left(\frac{RP}{dDs^f} \right)^{\frac{1}{e}} \quad (15)$$

Finalmente, a umidade do solo no qual a porosidade de aeração é igual a 10% foi calculada por:

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0,1 \quad (16)$$

onde Dp é a densidade de partículas ($Mg\ m^{-3}$).

O IHO foi calculado pela diferença entre o limite superior e o inferior dos conteúdos de água. De acordo com os dados obtidos pelas informações fundamentais, são quatro as possibilidades de cálculo do IHO (WU et al., 2003):

1. Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \rightarrow \mathbf{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$
2. Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \rightarrow \mathbf{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{RP}$
3. Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \rightarrow \mathbf{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$
4. Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \rightarrow \mathbf{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{RP}$

2.2.7 Avaliação do sistema radicular de plântulas de milho por tomografia computadorizada de Raio-X

Durante o doutorado sanduíche, na University of Nottingham, UK, foi proposto um experimento de curto prazo com o objetivo de avaliar o efeito de alguns dos principais fatores que afetam a emergência das plântulas de milho, em particular o conteúdo de água no solo, a densidade do solo e a temperatura, utilizando a técnica de microtomografia computadorizada de Raio-X (μ CT).

2.2.7.1 Preparo das amostras e germinação das sementes

Foram coletadas amostras indeformadas de dois solos agrícolas, um de textura areia franca da série Newport (Brown soil) e outro franco argiloso da série Worcester (Argillic pelosol) ambos localizados na fazenda da Universidade de Nottingham, Nottinghamshire, UK ($52.52^\circ\ N$, $1.07^\circ\ W$). As amostras foram extraídas da camada superficial (0-0,10 m). O primeiro é composto de 78,7% de areia, 9,4% de silte e 11,9% de argila enquanto o segundo apresenta 31,1% de areia, 33,4% de silte e 35,5% de argila.

Após a coleta o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2,0 mm e posteriormente acondicionado em cilindros de PVC (13 cm de altura; 5,1 cm de diâmetro interno; 0,2 cm de espessura da parede). O solo foi disposto em camadas e, após a adição de cada camada a superfície foi escoriada a fim de prevenir a formação de camadas distintas. Um malha fina de náilon foi fixada na extremidade inferior do anel para dar suporte ao solo e permitir a livre drenagem da água. O solo foi saturado por capilaridade por um período de 24h e, em seguida drenado por 48h para alcançar a condição de capacidade de campo, o peso do cilindro foi registrado para posterior adição de água e manutenção da umidade.

As sementes de milho (*Zea mays* L.) foram germinadas utilizando papel toalha umedecidos com água destilada em câmara escura por um período de 1,5 dia. Uma semente germinada foi colocada no centro de cada cilindro à uma profundidade de aproximadamente 1 cm.

Foram conduzidos três experimentos de curto prazo com quatro repetições para cada combinação de solo e tratamento. Durante os experimentos as colunas foram mantidas em sala de crescimento a 28 e 22°C (dia/noite), comprimento do dia de 16 e 8 h e umidade relativa de 50%. O tempo de duração de cada experimento foi de 6 dias que correspondeu aos estágios de emergência (VE) e primeira folha (V1).

2.2.7.2 Experimentos

Para a avaliação do estresse hídrico os cilindros foram mantidos em três condições de umidade (capacidade de campo – CC; 30% da CC – CC_{30%} e sem adição de água - SAA) a uma densidade uniforme (1,3 Mg m⁻³ para o solo areia franca e 1,1 Mg m⁻³ para o franco argiloso) e temperatura de 28/22°C (dia/noite). As colunas foram pesadas diariamente e água suficiente foi adicionada para manter a umidade dos tratamentos.

Para o tratamento de compactação, o solo foi adicionado aos cilindros de modo a aumentar a densidade do solo de 1,3 para 1,7 Mg m⁻³ para o solo areia franca e 1,1 para 1,5 Mg m⁻³ para o franco argiloso. Para os dois solos a densidade inicial é considerada normal e a segunda adensada. Novamente as colunas foram diariamente pesadas e água foi adicionada até a umidade da capacidade de campo.

O último experimento foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do estresse devido à baixa temperatura. Para tanto as amostras foram mantidas por um período de 6 dias em duas salas de crescimento, a primeira mantida a uma temperatura de 15/10°C (dia/noite) e a segunda na mesma temperatura dos outros dois experimentos, 28/22°C (dia/noite). As

densidades do solo foram 1,3 e 1,1 Mg m⁻³ para o solo areia franca e franco argiloso, respectivamente, e o conteúdo de água no solo foi mantido na capacidade de campo.

2.2.7.3 Escaneamento utilizando micro-tomografia computadorizada (μ TC) de Raio-X

Para os três experimentos, todos os cilindros foram escaneados individualmente no sexto dia após o transplante das sementes. Um μ TC de Raio-X, modelo Phoenix Nanotom[®] (GE Measurement and Control Solutions, Wunstorf, Germany) foi utilizado. Os parâmetros de ajuste do tomógrafo foram de 110 kV e 180 μ A, com um filtro de cobre de 0,15 mm. A resolução média da imagem de 4. voxel foi de 18 μ m e cada escaneamento durou um total de 40 min. com a obtenção de 1200 imagens por cilindro.

2.2.7.4 Processamento das imagens

A reconstrução do conjunto de imagens foi realizada no programa Recon|x que permite a otimização dos dados como a compensação pela ocorrência de qualquer movimento da amostra durante o procedimento, a aplicação de filtros para o feixe e cálculo do centro geométrico do objeto. Após a reconstrução, cada grupo de imagens foi importado para o programa VGStudio MAX 2.0 (Volume Graphics) para a visualização em 2 e 3D e segmentação da área de interesse.

O sistema radicular foi segmentado manualmente utilizando a ferramenta *Region Growing* que usa uma faixa de escala de cinza a partir de um ponto selecionado (a semente). Para selecionar estruturas contínuas em uma visualização 3D, o modo dinâmico do programa foi utilizado e a tolerância para a seleção foi determinada com relação ao material em torno da raiz para assegurar que somente o volume referente às raízes fosse selecionado como uma região de interesse. Do sistema radicular segmentado a partir das imagens foi quantificado o volume e área superficial das raízes.

Após o escaneamento as raízes foram extraídas do solo, lavadas e analisadas usando WinRHIZO[®] do qual foram obtidas informações do comprimento total, diâmetro médio das raízes, volume e área superficial das raízes. Esses dados foram comparados com aqueles determinados pelas imagens de μ TC de raio-X.

2.2.8 Análise estatística

Os dados obtidos, em campo e em laboratório, foram interpretados com base na estatística descritiva, teste de comparação de médias (Teste de Tukey) a 5% de probabilidade, análises de correlação e regressão e análise de estabilidade temporal dos dados de umidade

obtidos em campo. Todas as análises foram realizadas usando o programa estatístico SAS (2002).

A estatística descritiva foi o primeiro procedimento realizado para o conjunto de dados de todas as variáveis determinadas. Essa avaliação inicial dos dados é fundamental para a verificação do comportamento das variáveis em estudo e objetiva descrever e sumarizar o conjunto de dados sem, contudo, fazer inferências sobre a população. Primeiramente fez-se uma triagem dos resultados, que consiste no processo de revisá-los cuidadosamente a fim de assegurar que foram corretamente registrados e anotados. Antes de conduzir análises mais complexas deve-se examinar atenciosamente o conjunto de dados de forma a assegurar que análises posteriores não serão realizadas com dados “incorretos”, como valores digitados incorretamente, valores muito discrepantes, etc. Evidentemente este processo não é uma garantia de que os dados estejam corretos, mas aumenta a sua probabilidade. Outra importante razão desta análise consiste em explorar a maneira como os valores estão distribuídos o que auxilia na escolha da medida apropriada da tendência central além de que, alguns procedimentos estatísticos requerem que os dados estejam normalmente distribuídos, ou que ao menos não apresentem um desvio considerável da normalidade.

O procedimento da estatística descritiva tem como base os princípios da estatística clássica que fornece informações de medidas de posição, dispersão e forma da distribuição de frequência para a verificação da normalidade dos dados. A fim de identificar valores atípicos, comumente obtidos em avaliações *in situ*, é sugerido o emprego de técnicas complementares para a verificação das medidas por meio da identificação de *outliers* visto que sua ocorrência afeta o resultado de todos os testes estatísticos formais que utilizam resíduos, incluindo os de avaliação da variabilidade e normalidade (RIBEIRO Jr, 1995). O método utilizado para a detecção de *outliers* foi o descrito por Libardi et al. (1996).

A verificação da distribuição dos dados quanto a sua normalidade foi efetuada pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Para a análise da estabilidade temporal da umidade do solo foi aplicado o procedimento proposto por Vachaud et al. (1985) que permite identificar quais e quantos são os locais mais adequados para o monitoramento com precisão aceitável e reduzido esforço amostral. O conceito de estabilidade temporal foi introduzido por estes autores utilizando o cálculo das diferenças relativas que associadas ao respectivo desvio-padrão e ordenadas de forma crescente, permitem identificar a(s) posição(ões) que melhor representam a média geral da área, ou aquelas que superestimam ou subestimam esta média, em qualquer tempo de avaliação. A confiabilidade da medida está vinculada ao respectivo desvio-padrão, ou seja, quanto menor o desvio-padrão, maior a confiança em associar

determinado local como representativo da média geral. Vachaud et al. (1985) utilizaram duas técnicas para avaliar a estabilidade temporal, a primeira refere-se a diferença Δ_{ij} entre uma determinação individual S_{ij} no local i ($i = 1-y$, sendo y o número de pontos de amostragem) e no tempo j ($j = 1-x$, sendo x o número de dias avaliados) e a média dos valores medidos \bar{S}_j no mesmo tempo:

$$\Delta_{ij} = S_{ij} - \bar{S}_j \quad (17)$$

onde

$$\bar{S}_j = (1/y) \sum_{i=1}^{i=y} S_{ij} \quad (18)$$

a partir dos quais calcula-se a diferença relativa (δ_{ij}):

$$\delta_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{S_j} \quad (19)$$

De acordo com Vachaud et al. (1985), uma pequena variação ou a igualdade de δ_{ij} , ao longo do tempo, para cada posição j , é a indicação de estabilidade temporal, que entre outras palavras significa independência temporal.

A segunda técnica sugerida consiste na aplicação do teste não paramétrico de Spearman (r_s) que possibilita calcular o grau de dependência entre duas variáveis aleatórias. Um valor de r_s igual a 1 corresponde a igualdade de posição para qualquer local ou uma estabilidade temporal perfeita entre dois tempos, quanto mais próximo de uma unidade for r_s , mais estável será o processo. O coeficiente de correlação de Spearman é dado por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (20)$$

sendo n o número de observações, R_{ij} a posição da variável S_{ij} observada no local i na data j e R_{ij}' a posição da mesma variável, no mesmo local, porém na data j' .

Os dados de conteúdo de argila foram correlacionados com a umidade do solo a fim de tentar associar o comportamento dos pontos de amostragem com relação ao maior ou menor conteúdo de água no solo.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Estatística descritiva e análise exploratória dos dados

As tabelas referentes às estatísticas descritivas das variáveis estudadas, que não estão apresentadas no corpo do texto, encontram-se em ANEXO. Inicialmente os primeiros valores observados foram os referentes às medidas de posição ou tendência central representados pela média e mediana. Sabe-se que, em matemática e estatística, a média de um conjunto de dados é obtida somando os valores de todos os dados e dividindo a soma pelo número de dados (N). Em teoria de probabilidade e estatística, a mediana é o valor que separa a metade inferior da superior de um conjunto de valores, ou seja, metade terá valores inferiores ou iguais e a outra metade valores superiores ou iguais à mediana. Quando se calcula a média e a mediana para um conjunto de dados, caso os resultados apresentem valores muito próximos significa que, provavelmente, os dados possuem uma distribuição normal e, neste caso a média deve ser utilizada, por melhor representar a tendência central dos dados. Porém, se apresentarem valores distantes, então os dados podem não estar normalmente distribuídos e a mediana é mais indicada para uma melhor representação. Isto porque, apesar de a média ser tradicionalmente empregada para representar o ponto médio de um conjunto amostral, ela tem a desvantagem de ser afetada por qualquer valor individual muito alto ou muito baixo em relação ao restante dos dados (*outliers*). Assim, por vezes, a mediana pode ser tomada como uma medida mais adequada para representar um ponto médio, principalmente para distribuições assimétricas. Para os dados obtidos neste trabalho os valores utilizados foram sempre aqueles referentes a média de cada grupo de dados.

Os próximos valores analisados foram os relativos às medidas de dispersão dos dados principalmente o desvio padrão e coeficiente de variação. O primeiro permite verificar o quanto de variação existe no conjunto de dados em relação à média com unidade equivalente a variável em estudo. O segundo é um valor adimensional bastante útil na comparação do grau de concentração em torno da média. Sua classificação em baixo, médio ou alto é difícil, mas, torna-se útil na comparação de variáveis a princípio não comparáveis. Com base na classificação segundo Pimentel Gomes (2000) que estabelece que, em experimentos de campo, CV inferiores a 10%, são tidos como baixos, ou seja, o experimento tem alta precisão, de 10 a 20%, são considerados médios e de boa precisão, 20 a 30% alto, com baixa precisão e, acima de 30%, muito alto; a dispersão dos dados dos atributos do solo avaliados neste trabalhos forem de baixos a muito altos, os primeiros foram observados para dados de umidade e densidade do solo enquanto que os últimos foram relatados principalmente para os

dados de resistência do solo à penetração. No entanto, o inconveniente desta classificação é que vários fatores não são considerados como a variável em estudo, a heterogeneidade do solo, tamanho da parcela, entre outros.

Para a verificação da normalidade dos dados foi realizado o teste de Shapiro-Wilk (1965) considerando $p < 0,05$. A aplicação do teste confirmou que, para o conjunto de dados onde a média e a mediana apresentaram valores distantes, os dados não estavam normalmente distribuídos. Para estes conjuntos foi realizada a identificação e exclusão de valores discrepantes (*outliers*). O procedimento de transformação dos dados foi necessário somente para os dados de permeabilidade do solo ao ar (k_a) como será visto na discussão de seus resultados.

2.3.2 Granulometria e carbono orgânico

O solo, segundo Oliveira et al. (2000), apresenta como característica marcante a sua heterogeneidade. Numa mesma paisagem natural, pode ocorrer uma ampla variação das propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, tanto horizontal como verticalmente resultante, principalmente, dos processos pedogenéticos. O conhecimento dessa variação é importante no levantamento, na classificação, na avaliação da fertilidade e, particularmente, para a elaboração de um planejamento de amostragem mais adequado.

A textura do solo, juntamente com outros componentes, define a sua estrutura, e determina a capacidade de armazenamento de água do solo e, conseqüentemente sua disponibilidade às plantas, além de influenciar em outros atributos do solo igualmente importantes para o desenvolvimento das plantas como a resistência à penetração e aeração. A variação granulométrica ao longo da transeção avaliada está apresentada na Figura 6. Como pode ser observado, a variabilidade da composição granulométrica permitiu identificar duas classes texturais que se apresentaram intercaladas: Argilo arenosa - Franco argilo arenosa - Argilo arenosa - Franco argilo arenosa. A estatística descritiva para os dados da análise granulométrica e carbono orgânico nas quatro classes está apresentada na Tabela 1. A amplitude do conteúdo de argila avaliado em toda a transeção foi de 17,73%, com o mínimo de 27,78% e máximo de 45,51%; para a fração areia a amplitude foi de 18,77% enquanto que para o carbono orgânico houve uma variação entre o mínimo e máximo conteúdo de 14,39 g kg^{-1} . O grau de dispersão para as três frações ficou entre baixo e médio, com a fração silte apresentando a maior variabilidade, o que é comum visto que essa fração não é determinada e sim calculada por diferença entre os valores de areia e argila obtidos. Os teores médios de CO foram compatíveis com os resultados de outros estudos realizados na mesma área (FILHO,

2012). Maiores teores de carbono orgânico em áreas sob plantio direto é comumente relatado, e denota a importância desse sistema no incremento paulatino dos níveis de matéria orgânica do solo nas camadas superficiais (DE MARIA; CASTRO, 1993; BAYER; BERTOL, 1999; ALMEIDA, et al. 2005, COSTA JUNIOR, et al., 2013).

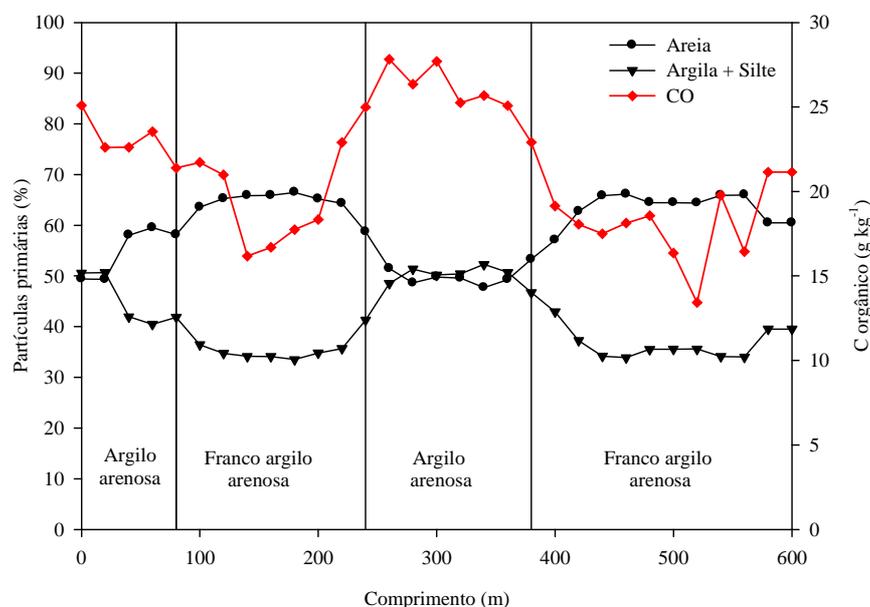


Figura 6 – Variação de textura e de carbono orgânico do solo ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto, localizada na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR

Tabela 1 – Resumo estatístico de argila, areia, silte e carbono orgânico (CO) para cada classe textural identificada ao longo da transeção de 600 m

	Classe textural	Mín.	Máx.	Amplitude	Média	DP	CV	GD	
Argila (%)	Argilo arenosa 1	36,05	45,51	9,46	39,95	a	4,66	9,23	B
	Franco argilo arenosa 1	27,78	34,21	6,43	29,84	b	2,06	11,67	M
	Argilo arenosa 2	40,56	45,47	4,91	42,68	a	1,66	5,97	B
	Franco argilo arenosa 2	28,89	36,25	7,37	31,33	b	2,16	3,85	B
Areia (%)	Argilo arenosa 1	49,34	59,52	10,18	54,88	b	5,07	6,92	B
	Franco argilo arenosa 1	58,71	66,49	7,78	64,40	a	2,48	15,99	M
	Argilo arenosa 2	47,72	53,28	5,56	49,96	c	1,86	3,72	B
	Franco argilo arenosa 2	57,09	66,11	9,02	63,74	a	2,92	3,89	B
Silte (%)	Argilo arenosa 1	4,43	6,11	1,68	5,16	a	0,64	12,33	M
	Franco argilo arenosa 1	4,78	7,08	2,3	5,76	a	0,81	14,14	M
	Argilo arenosa 2	6,16	8,04	1,88	7,35	b	0,68	9,21	B
	Franco argilo arenosa 2	3,37	6,65	3,28	4,93	a	1,08	21,99	F
CO (g kg ⁻¹)	Argilo arenosa 1	21,39	25,09	3,71	23,05	a	1,38	5,97	B
	Franco argilo arenosa 1	16,18	24,98	8,80	19,94	ab	3,17	15,91	M
	Argilo arenosa 2	22,91	27,82	4,91	25,83	a	1,69	6,55	B
	Franco argilo arenosa 2	13,43	21,15	7,72	17,85	b	2,13	11,93	M

Mín. – valor mínimo; Máx. – valor máximo; Médias – seguidas por mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação (%); GD – Grau de dispersão: B (Baixo) = CV ≤ 10%; M (Médio) = 10% < CV < 20%; F (Forte) = 20% < CV < 30%; e MF (Muito Forte) = CV > 30% (PIMENTEL-GOMES, 2000).

Os conteúdos médios de areia, silte e argila assim como o de CO apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as classes texturais (Tabela 1) dando suporte ao critério adotado de discutir os resultados com base na subdivisão dos pontos em classes texturais. Uma vez que não há registro de ocorrência de variação de material de origem dentro da área, possivelmente tal variabilidade se deve ao fato da camada superficial ser mais afetada pelas intempéries ambientais que favorecem o carregamento e depósito das partículas primárias além da influência do tráfego de máquinas agrícolas durante o manejo do solo. O conteúdo de mínimo e máximo de argila variou de 27,78 a 45,51% e ocorreram numa distância de 200 m.

Sabe-se que, dentre os fatores que determinam o conteúdo de carbono orgânico no solo o clima e a textura são fundamentais (HONTORIA; RODRIGUEZ-MURILLO; SAA, 1999; GAMI; LAUREN; DUXBURY, 2009). O clima influencia nos processos de produção e decomposição da liteira e, em geral, o CO aumenta com o aumento da precipitação e diminui com o aumento da temperatura (BURKE et al., 1989). Já a textura do solo influencia o conteúdo de CO através do papel da argila na proteção da matéria orgânica (MO) da decomposição (ANDERSON, et al., 1981) e também pelo papel da argila+silte na disponibilidade de água (SCHIMEL; PARTON, 1986). As frações argila+silte estão envolvidas no processo de agregação que protege a MO da mineralização. Estas partículas mais finas se combinam com a MO formando complexos mais estáveis (KONONOVA, 1966) de difícil decomposição. Esta relação foi confirmada na área avaliada visto que as classes com maior conteúdo de argila apresentaram concomitantemente maior conteúdo de CO. Esta relação entre a textura e o CO tem sido amplamente estudada. A relação positiva deste composto com o incremento de argila e silte e negativa com o conteúdo de areia tem sido confirmada por vários estudos (JOBAGY; JACKSON, 2000; ZINN; LAL; RESCK., 2005; GAMI; LAUREN; DUXBURY, 2009). No Brasil, Zinn et al. (2005) observou esta proporcionalidade em estudo realizado na região do Cerrado.

Características topográficas também afetam o conteúdo de CO. Fatores como o aspecto e o gradiente de declividade, afetam a evapotranspiração e a infiltração de água e, portanto, modificam o conteúdo de água no solo e, conseqüentemente a produção e a decomposição da liteira (BIRKELAND, 1984). Considerar as relações entre o conteúdo de CO e as propriedades locais e do solo tornam-se importantes para avaliar os efeitos das futuras mudanças do conteúdo de CO com o uso e manejo do solo e mudanças no clima.

2.3.3 Avaliações em campo na cama semeadura durante a emergência da cultura da Soja – Safra 2010/2011

2.3.3.1 Conteúdo de água no solo

A análise dos dados de umidade obtidos por um período de 12 dias em campo mostrou que não houve uma grande variação média durante o período avaliado (Figura 8) com exceção do primeiro dia, o que se deve à precipitação acumulada de 26,8mm ocorrida nos dias anteriores (Figura 7). As precipitações dos dias 16, 17 e 18 que correspondem respectivamente aos 7, 8 e 9 DAS, não acarretaram em um aporte significativo de água no solo, não elevando consideravelmente a umidade com relação aos demais dias. A umidade média para cada dia, que considera todos os pontos ao longo da transeção, não diferenciou daquela calculada para os pontos correspondentes a cada classe textural. O primeiro dia de avaliação, correspondente ao dia seguinte após a semeadura, foi o que apresentou o maior conteúdo de água no solo ao longo da transeção, com uma média de $0,234 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ enquanto que o mais seco correspondeu ao sexto dia com uma média de $0,149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Durante todo o período a média da umidade do solo foi de $0,174 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, portanto, a água no solo não foi um fator limitante a germinação e crescimento inicial das plântulas de soja assim como a temperatura com média de $17,3^\circ\text{C}$.

A estatística descritiva do conjunto de dados de umidade do solo pode ser verificada no ANEXO A. A normalidade dos dados para todos os dias avaliados foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). O procedimento de identificação de *outliers* feita segundo critérios definidos por Libardi et al. (1996) não identificou valores extremos para os dados de umidade obtidos em campo.

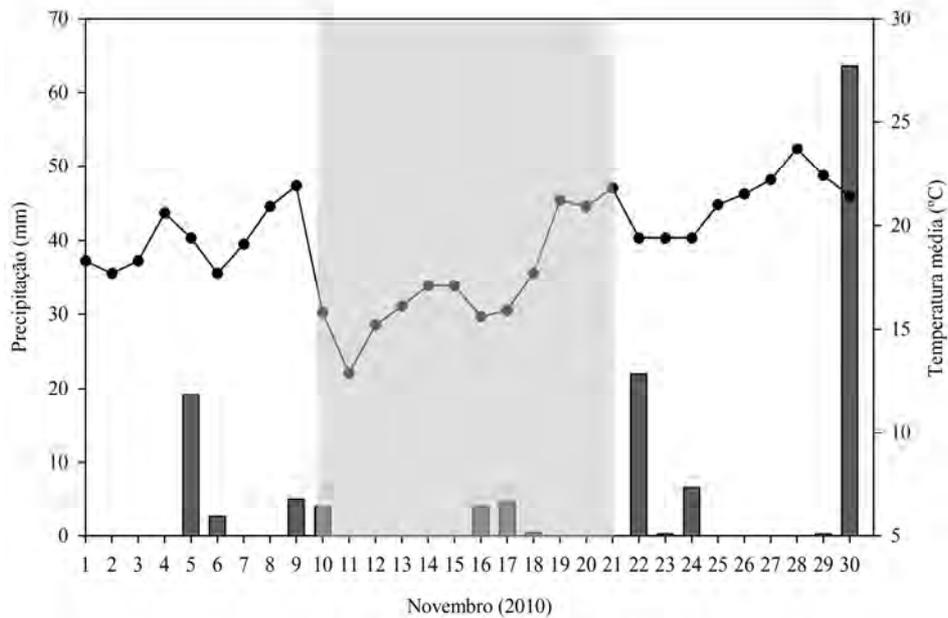


Figura 7 – Precipitação diária e temperatura média do mês de novembro de 2010. A área em destaque refere-se aos dias avaliados que corresponde ao período de emergência da cultura da soja

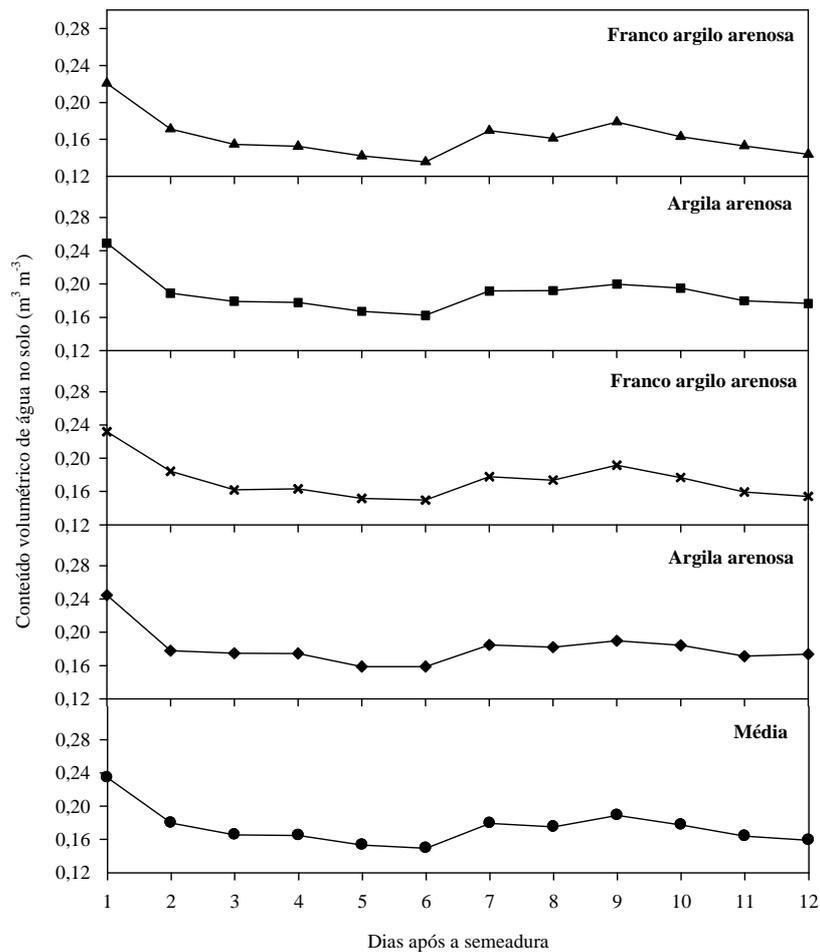


Figura 8 – Variação do conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos doze dias avaliados correspondentes ao período de emergência da cultura da soja (2010)

Vários fatores contribuem para a retenção de água no solo. Dentre estes fatores a textura e a matéria orgânica são primordiais, pois determinam a estrutura do solo ou arranjo das partículas. Em geral, o conteúdo de água no solo aumenta à medida que a textura se torna mais fina. O conteúdo médio de argila das quatro classes texturais foi de aproximadamente 40, 30, 42 e 31% (Tabela 1) e foi proporcional a umidade média avaliada nos 12 dias que correspondeu a 0,180; 0,175; 0,187 e 0,162 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para as quatro classes respectivamente. Isso se deve pelo fato das partículas de argila ($<2\mu\text{m}$) possuir elevada área superficial específica conferindo-lhes maior capacidade de adsorver água e outras substâncias. Os poros entre essas partículas mais finas são muito pequenos e tortuosos, fazendo com que o movimento da água seja mais lento permitindo que o solo retenha mais água por um período mais prolongado. Já o tamanho relativamente grande das partículas de areia além de apresentarem menor superfície específica resultam em maiores espaços entre si, estas duas características fazem com que solos com maior conteúdo de areia tem uma menor capacidade de retenção de água (BRADY; WEIL, 1999).

2.3.3.2 Resistência do solo à penetração

A cama de semeadura da soja, na linha de plantio avaliada ao longo da transeção, apresentou alta variabilidade de valores de resistência à penetração do solo, o que pode ser constatado pelos altos coeficientes de variação ($>50\%$) (ANEXO A). Os valores médios de RP associados às respectivas umidades do solo para os doze dias de avaliação e para as quatro classes texturais estão apresentados na Tabela 2. Os primeiros dias após a semeadura apresentaram menores valores de RP o que se deve ao revolvimento da linha por ocasião do plantio. No decorrer do período a RP aumentou devido ao processo de condicionamento natural do solo combinado com os eventos pluviométricos ocorridos. Houve uma redução na RP do oitavo para o nono dia nas quatro classes devido à chuva ocorrida nestes dias. Apesar das diferenças de RP média entre as classes esta diferença não foi significativa em nenhum dos dias avaliados, isto se deve, como mencionado, pela alta amplitude de valores de RP obtidos na área.

Com relação a média de RP durante todo o período, para os trinta pontos (Figura 9), o ponto 7, localizado a 120 m do início da transeção apresentou a menor RP, 0,77 MPa, associada a uma média de umidade de 0,156 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ enquanto que o ponto 27 (520 m) apresentou a maior, 1,73 MPa, com umidade de 0,173 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Ambos os pontos estão localizados nas faixas onde a textura do solo foi classificada como Franco argilo arenosa. Estes extremos não apresentaram uma relação RP versus umidade inversamente proporcional,

como o esperado, pois, sabe-se que quanto maior a umidade, menor a RP, porém, a RP do solo não está associada somente ao seu conteúdo de água, outros fatores influenciam, como a densidade do solo. A densidade do solo no ponto de maior resistência foi de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ enquanto que a RP mínima foi associada a uma densidade de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, portanto, apesar da maior umidade, o aumento da densidade resultou em um incremento da RP.

Tabela 2 – Valores médios de umidade do solo e resistência à penetração para a cama de semeadura da cultura da soja - 2010

DAS	Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)				Resistência à penetração (MPa) ^{ns}			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
1°	0,245 b	0,231 b	0,250 ab	0,221 c	0,62	0,72	0,79	0,66
2°	0,178 ab	0,184 ab	0,189 a	0,171 b	0,93	0,83	0,91	0,69
3°	0,172 a	0,170 a	0,178 a	0,152 b	1,06	0,76	0,85	0,82
4°	0,169 a	0,175 a	0,178 a	0,146 b	0,84	1,14	1,00	1,02
5°	0,154 a	0,150 a	0,161 a	0,148 a	0,98	1,03	1,16	1,13
6°	0,159 a	0,149 a	0,162 a	0,135 b	1,02	1,30	1,37	1,40
7°	0,178 a	0,178 a	0,183 a	0,179 a	1,30	1,65	1,37	1,35
8°	0,174 ab	0,175 ab	0,190 a	0,159 b	1,49	1,22	1,31	1,31
9°	0,184 a	0,190 a	0,196 a	0,180 a	0,94	0,93	1,12	1,13
10°	0,183 ab	0,177 ab	0,191 a	0,168 b	1,42	1,38	1,11	1,17
11°	0,164 ab	0,161 ab	0,174 a	0,153 b	1,29	1,21	1,15	1,14
12°	0,172 a	0,166 a	0,171 a	0,140 b	1,09	1,26	1,48	1,20
Média	0,180	0,175	0,187	0,162	1,08	1,12	1,13	1,09

^{ns} Não houve diferença significativa para a RP entre as classes texturais nos dias avaliados. Para os dados de umidade médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. DAS – dias após a semeadura. Classes: 1 (Argilo arenosa), 2 (Franco argilo arenosa), 3 (Argilo arenosa) e 4 (Franco argilo arenosa).

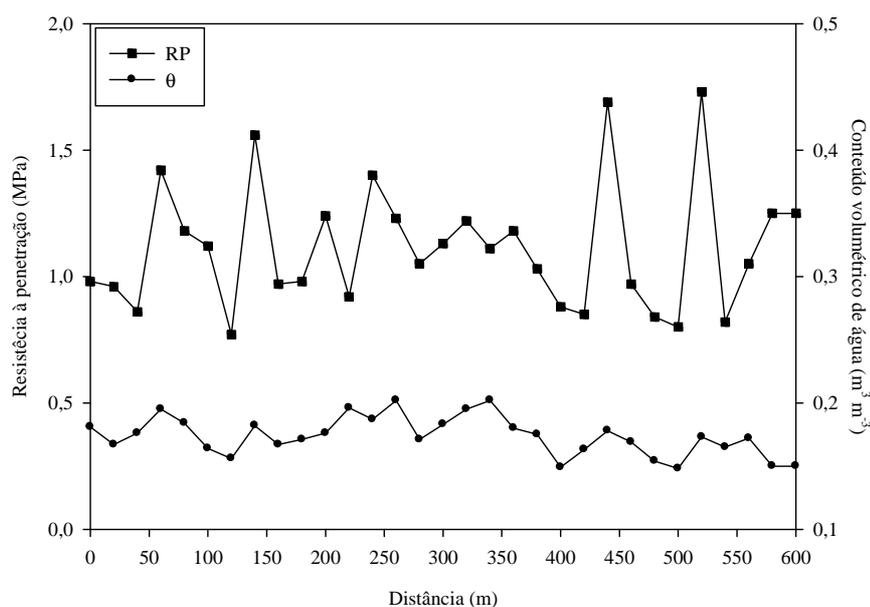


Figura 9 – Valores médios de resistência à penetração (RP) em trinta pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto durante a emergência da cultura da soja (2010). N=12

2.3.3.3 Parâmetros de emergência

A emergência das plântulas de soja iniciou no sexto dia após a semeadura (DAS) e foi avaliada pela contagem do número de plantas emergidas por metro até o décimo segundo dia, quando o número de plantas m^{-1} tornou-se constante indicando a estabilidade da emergência da cultura. A densidade de semeadura regulada na semeadora-adubadora foi de 18 sementes m^{-1} . A média de emergência ao longo da transeção foi de 16,2 plantas m^{-1} e houve pouca variação no estabelecimento final do número de plantas por metro quando subdivida por classe textural (Figura 10). Observa-se na Figura 10 que o número de plântulas emergidas por metro foi cerca de duas plantas a menos nas classes mais argilosas, indicando que uma textura mais arenosa oferece melhores condições físicas ao processo de emergência inicial das plântulas. Com a finalidade de demonstrar o efeito da textura na emergência das plântulas é apresentada, na mesma Figura 10, a emergência do primeiro ao último dia, dos pontos correspondentes ao máximo (45,5%) e mínimo (27,7%) conteúdo de argila. Confirmando a tendência observada nas classes texturais a emergência inicial foi menor no ponto mais argiloso, porém, logo no segundo dia esse ponto já apresentou um maior número de plantas emergidas findando com uma média de 17 plantas m^{-1} enquanto o ponto com menor conteúdo de argila completou a fase de emergência com 15 plantas m^{-1} .

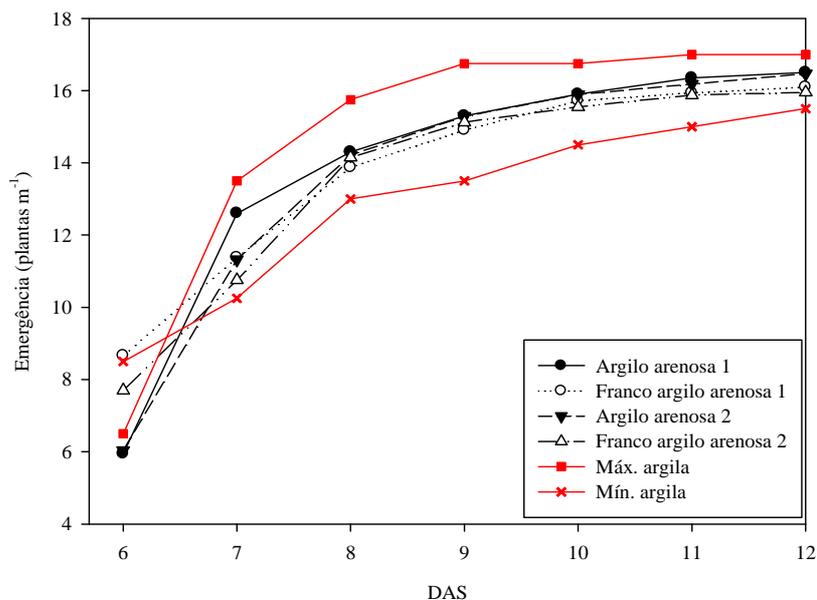


Figura 10 – Emergência da cultura da soja (plantas m^{-1}) de acordo com o a classe textural e do conteúdo máximo e mínimo de argila

O conceito de taxa ou velocidade de emergência é proposto como um método simples para avaliar a emergência das plântulas (MAGUIRE, 1962). A taxa de emergência foi

calculada com base no número final de plantas emergidas no último dia de avaliação (12 DAS) e representa a porcentagem de plantas emergidas em relação ao número de sementes disseminadas. A taxa média de emergência ao longo da transeção foi de 85% e poucos pontos ficaram acima desta média (Figura 11). Dos 30 pontos determinados 13 ficaram abaixo da média o que representa 43,3% do total. Não foi observado um padrão de relação entre a variação da taxa de emergência e o conteúdo de argila. Com relação a média por classe textural a taxa de emergência foi de: argilo arenosa 85,5 e 86,6%; franco argilo arenosa 84,7 e 83,9%. Não houve diferença significativa entre as classes.

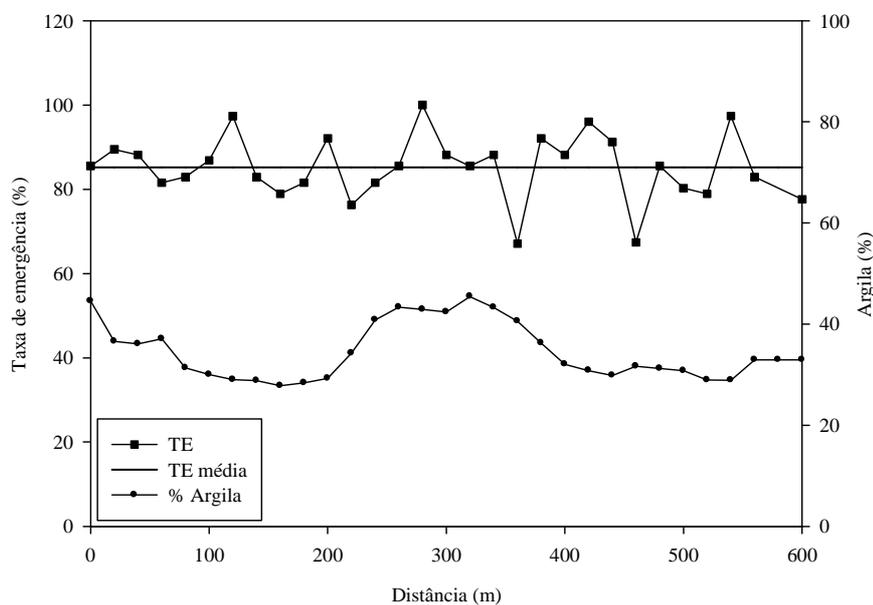


Figura 11 – Valores médios de taxa de emergência e conteúdo de argila para a cama de semeadura da cultura da soja (2010) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR

Outra variável resposta calculada com base nos dados de emergência avaliados em campo foi o índice de velocidade de emergência (IVE) que expressa o número médio de plântulas emergidas por parcela. O IVE médio calculado para todo o comprimento foi de 11,7. Corroborando com a taxa de emergência, a maior parte dos pontos apresentou valor de IVE abaixo da média (Figura 12).

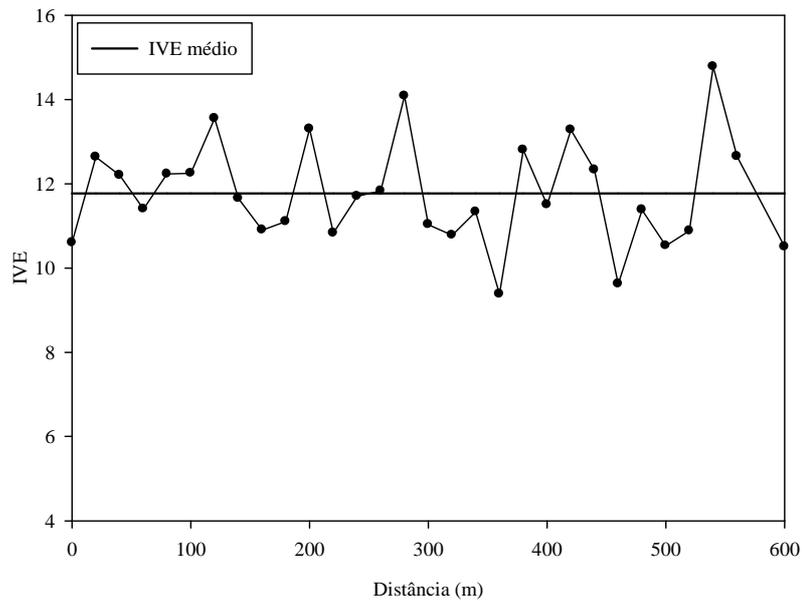


Figura 12 – Valores médios de índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura da soja (2010) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR

2.3.3.4 Análise da estabilidade temporal para a umidade do solo

A análise estatística exploratória para as medidas de umidade obtidas em campo denotaram que os dados apresentaram distribuição normal para todos os dias avaliados. Portanto, o conjunto de dados se enquadra nas premissas definidas por Vachaud et al. (1985) para a viabilidade da determinação da estabilidade temporal.

A heterogeneidade espacial da umidade do solo ao longo da transeção está ilustrada na Figura 13. Nesta figura são exibidos quatro tempos de avaliação com destaque para o dia mais úmido (1 DAS) e o mais seco (6 DAS). Observa-se que a maioria dos pontos mantém a mesma posição em relação ao conjunto de medidas. Este comportamento já revela estacionariedade visto a ausência de qualquer tendência de concentração de valores em determinada direção, permitindo assumir que a estacionariedade definida pela hipótese intrínseca também pode ser aplicada ao conjunto de dados.

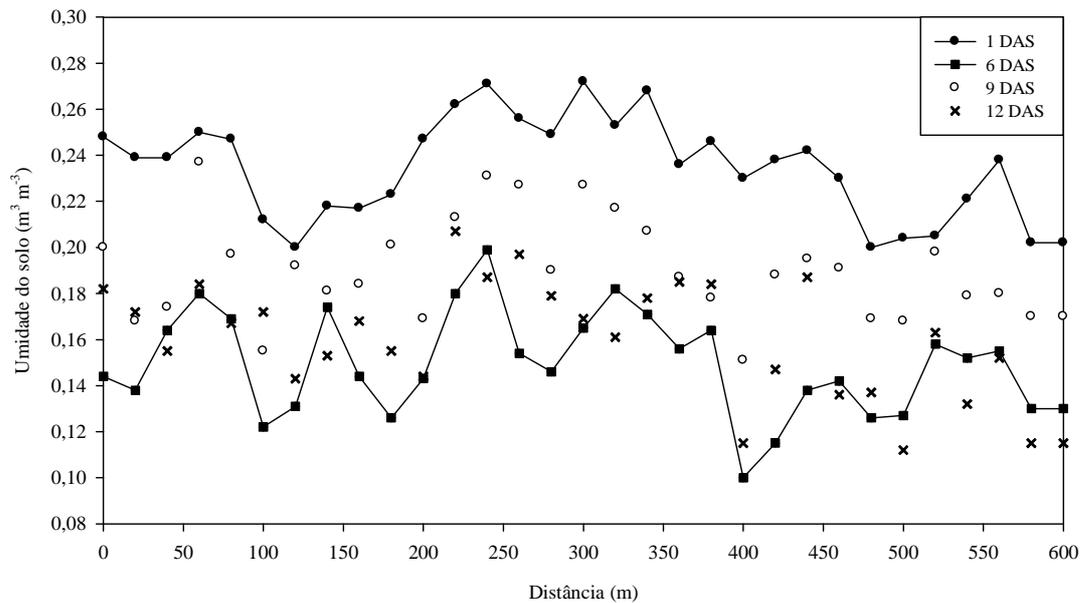


Figura 13 – Variabilidade da umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros em quatro tempos de avaliação, avaliada na cama de semeadura da cultura da soja (2010)

Para a avaliação da estabilidade temporal dos dados de umidade do solo, foram utilizados dois métodos propostos por Vachaud et al. (1985). O primeiro refere-se à diferença relativa e seus respectivos desvios padrões e o segundo ao teste não paramétrico do coeficiente de correlação de Spearman (r_s). Os autores relataram que o segundo método deve ser visto somente como uma ferramenta estatística para medir o grau de concordância entre dois rankings e não deve ser utilizado diretamente para pressupor as posições de locais de determinações.

As diferenças relativas para cada tempo foram calculadas segundo a Eq. (19). Com os resultados foram determinadas as diferenças relativas médias para todos os 30 pontos da transeção. Estas foram então ordenadas e construídas em um gráfico. Este procedimento possibilita a identificação das posições cujos valores estejam mais próximos da média e possam ser utilizados como referência amostral. O grau de confiabilidade da medida foi atestado pela determinação dos respectivos desvios padrões relacionados com as variações espaciais (Figura 14). Pela análise do gráfico verifica-se que alguns pontos superestimam ($DR > 0$) as medidas médias de umidade do solo enquanto outros subestimam ($DR < 0$), independentemente do tempo de observação. Por exemplo, a umidade no ponto 7 é 18,7% ($\pm 8,1\%$) menor que a média geral obtida em campo, enquanto que o ponto 18 é 20,3% ($\pm 6,5\%$) maior. Segundo Gonçalves et al. (1999), o local a ser escolhido como representativo deve apresentar uma diferença relativa média igual ou muito próxima de zero e estar associada ao

menor desvio padrão. Assim, foram identificados os pontos mais indicados para a amostragem da umidade ao longo da transeção. Para quatro pontos (3, 16, 19 e 29) a umidade determinada em qualquer tempo foi de $\pm 0,67$; 1,32; 0,90 e 0,063% da média de campo, respectivamente. Tais pontos, portanto, seriam os mais apropriados para futuras amostragens. A ocorrência de mais de um ponto com as características necessárias é atribuída a variabilidade espacial da textura do solo, cuja influência nas médias de umidade é bastante significativa (VACHAUD et al., 1985).

O segundo método, o coeficiente de Spearman (r_s), foi empregado para avaliar o grau de correlação da variabilidade espacial da umidade do solo nos diferentes tempos de amostragem. Um valor de r_s igual à unidade corresponderá a posições idênticas em todos os pontos de medição, ou seja, uma estabilidade perfeita entre dois tempos. Quanto mais próximo de 1 for o r_s , maior estabilidade apresentará o processo (CAMPOS, 1983; VACHAUD et al., 1985). Os coeficientes de correlação para todos os tempos avaliados são mostrados na Tabela 3. Praticamente todos os valores foram altamente significativos (para $n=30$ o valor crítico de r_s é 0,467 a 1%) portanto, uma estabilidade temporal forte na classificação dos pontos pode ser assumida.

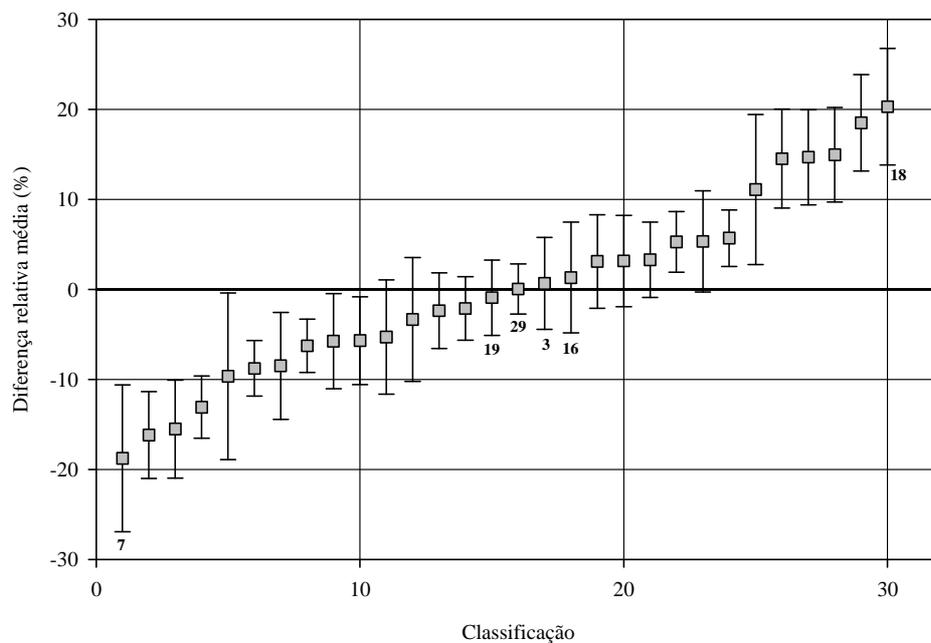


Figura 14 – Diferença relativa média intertemporal classificada para a umidade do solo segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20m. Barras verticais correspondem ao desvio padrão. Os números centralizados correspondem aos pontos que devem ser adotados para medidas representativas da média enquanto que os extremos aqueles que mais se distanciam da média

Tabela 3 – Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman* entre séries de umidades (θ) obtidas em 30 pontos durante 12 dias na cama de semeadura da cultura da soja (2010)

DAS	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
$\bar{\theta}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,234	0,18	0,166	0,165	0,153	0,149	0,18	0,176	0,189	0,177	0,164	0,159
(1)	1											
(2)	0,725	1										
(3)	0,993	0,738	1									
(4)	0,990	0,745	0,997	1								
(5)	0,965	0,734	0,974	0,974	1							
(6)	0,809	0,652	0,838	0,839	0,896	1						
(7)	0,998	0,716	0,993	0,989	0,970	0,823	1					
(8)	0,999	0,717	0,992	0,990	0,966	0,817	0,999	1				
(9)	0,526	0,748	0,529	0,542	0,519	0,542	0,515	0,515	1			
(10)	0,999	0,719	0,993	0,991	0,966	0,812	0,999	0,999	0,523	1		
(11)	0,700	0,567	0,722	0,74	0,696	0,692	0,696	0,700	0,584	0,704	1	
(12)	0,999	0,726	0,994	0,990	0,966	0,817	0,998	0,999	0,525	0,999	0,708	1

* significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$)

DAS: dia após a semeadura

A determinação do r_s possibilita verificar a existência de estabilidade temporal, porém não identifica as posições mais adequadas para amostragem de forma a melhor representar a média da variável em estudo para qualquer tempo. O método de avaliação da estabilidade temporal, através da determinação da diferença relativa, para a quantificação do número mínimo de amostras para estimar a média de uma variável é um método simples e econômico e, permite identificar precisamente os locais mais adequados para futuras amostragens, o que permite reduzir o número de amostras necessárias além do custo de aplicação do esforço amostral para o planejamento de sistemas de uso e manejo de água e obtenção de conclusões em resultados experimentais de campo.

2.3.4 Avaliações em campo na cama semeadura durante a emergência da cultura do Milho (2011)

2.3.4.1 Conteúdo de água no solo

As avaliações em campo durante a emergência da cultura do milho foram realizadas no período de 04 a 10 de outubro. A precipitação acumulada neste período foi de 48,2 mm (Figura 15) e a média geral de toda a transeção pouco diferiu da média das classes texturais identificadas (Figura 16).

A simetria da distribuição dos dados é atestada pela semelhança entre os valores das médias e medianas (ANEXOS). O teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) também comprovou a

normalidade dos para os sete dias avaliados. Não foram observados valores muito discrepantes pela metodologia de identificação de *outliers*.

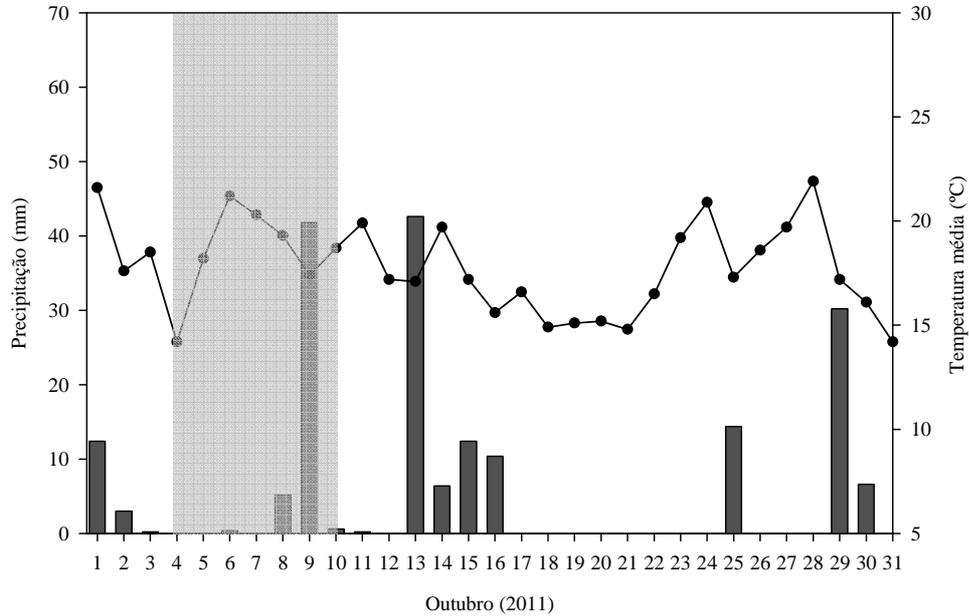


Figura 15 – Precipitação diária e temperatura média do mês de outubro de 2011. A área em destaque refere-se aos dias avaliados que corresponde ao período de emergência da cultura do milho

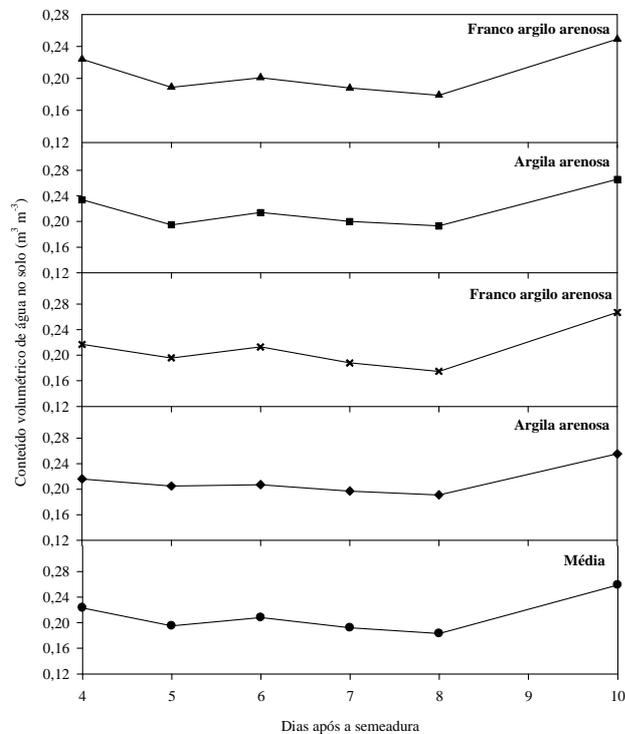


Figura 16 – Variação do conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos oito dias avaliados correspondentes ao período de emergência da cultura do milho

A faixa da transeção que vai de 260 a 400 m foi classificada, segundo sua composição granulométrica, como Argilo arenosa e possui uma média de 42% de argila, sendo a mais argilosa dentre as quatro classes identificadas. Esse maior conteúdo de argila correspondeu a maior média de umidade dentre as classes ($0,221 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e diferiu significativamente somente da classe correspondente a faixa de 0-100 m também classificada como Argilo arenosa, mas que apresentou uma média de $0,195 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com um conteúdo médio de argila de 39,95%.

Durante o período de emergência da cultura do milho o sétimo dia após a semeadura (7 DAS) foi o mais seco, com uma média de $0,179 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que corresponde a uma umidade cerca de 20% maior que o dia mais seco observado durante o período de emergência da cultura da soja ($0,149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

2.3.4.2 Resistência à penetração

A resistência à penetração do solo na cama de semeadura avaliada ao longo da mesma transeção durante o cultivo do milho, assim como no ano anterior, apresentou alta variabilidade com coeficientes de variação (CV) acima de 50% (ANEXO A). A média de RP para cada dia, para as quatro classes texturais, foram maiores que as obtidas na cama de semeadura da cultura da soja, alcançando valores de até 2 MPa (Tabela 4). Isto se deve, provavelmente, ao arranjo da camada devido à precipitação no período. Da semeadura ao término da avaliação o total de chuva acumulada foi de 63,6 mm. Apesar desse aporte de água ter resultado em maiores médias de umidade na camada em relação a primeira avaliação, esta não foi associada com menores valores de RP como esperado.

O revolvimento na linha de plantio por ocasião da semeadura rompe a camada superficial deixando-a mais solta. Por ocasião da semeadura da soja a baixa precipitação não permitiu a acomodação das partículas conservando esta condição estrutural mais desagregada por mais tempo, o que resultou em baixos valores de RP, apesar da baixa umidade. Já no cultivo do milho, a camada superficial sofreu um rearranjo estrutural devido a alta precipitação, ocasionando uma maior RP. Com relação à média das classes para todo o período as faixas de 100-240 m e 380-600 m ambas classificadas como franco argilo arenosa apresentaram a maior e menor RP respectivamente.

As médias de RP para o período de avaliação, nos trinta pontos, estão exibidas na Figura 17. O RP variou de no mínimo 0,92 MPa a um máximo de 2,0 MPa ambos, assim como no ano anterior, na classe franco argilo arenosa. Mais uma vez as maiores médias de umidade não foram associadas com os menores valores de RP.

Tabela 4 – Valores médios de umidade do solo e resistência à penetração para a cama de semeadura da cultura do milho - 2011

DAS	Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				Resistência à penetração (MPa)			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
4°	0,215 b	0,223 ab	0,233 a	0,225 ab	1,77 a	1,99 a	2,14 a	2,03 a
5°	0,203 a	0,197 a	0,191 ab	0,186 b	1,70 a	1,74 a	1,50 a	1,22 b
6°	0,202 ab	0,213 a	0,208 ab	0,195 b	1,33 ab	1,81 a	1,31 b	1,44 ab
7°	0,189 a	0,176 a	0,185 a	0,178 a	1,33 a	1,81 a	1,31 a	1,44 a
8°	0,187 a	0,188 a	0,196 a	0,190 a	1,81 a	1,62 a	1,44 a	1,68 a
10°	0,254 ab	0,267 a	0,269 a	0,249 b	1,06 a	1,14 a	0,99 a	0,92 a
Média	0,208 ab	0,211 ab	0,214 a	0,204 b	1,54 ab	1,65 a	1,47 ab	1,46 b

Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

DAS – dias após a semeadura. Classes: 1 (Argilo arenosa), 2 (Franco argilo arenosa), 3 (Argilo arenosa) e 4 (Franco argilo arenosa).

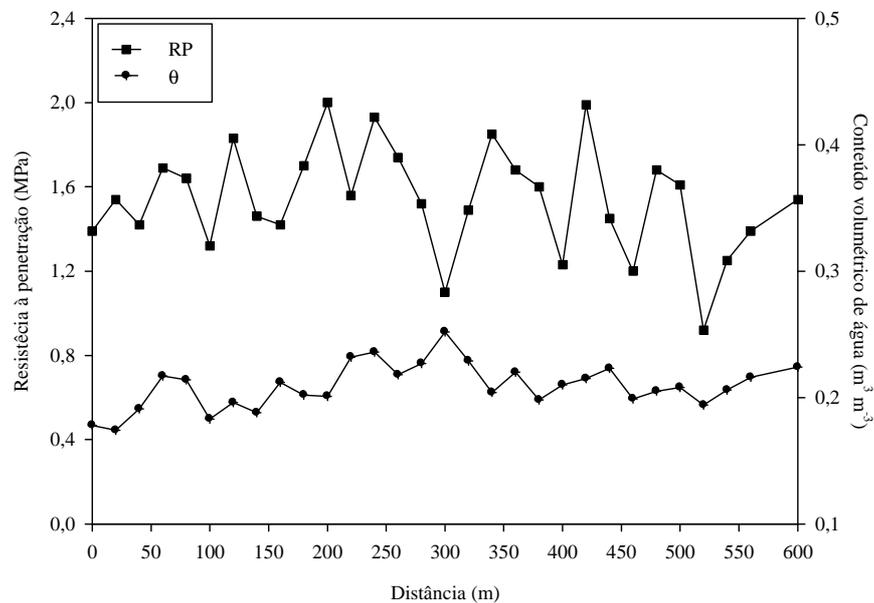


Figura 17 – Valores médios de resistência à penetração (RP) em trinta pontos ao longo de uma transeção de 600m em área de plantio direto durante a emergência da cultura do milho (2011). N=12

2.3.4.3 Parâmetros de emergência

As plântulas de milho iniciaram a emergência no dia 5 de outubro que correspondeu ao sétimo dia após a semeadura (DAS) e estabilizaram aos 13 DAS. A estabilização foi considerada pela invariabilidade da contagem do número de plantas por metro ao longo da transeção. A emergência média em toda a transeção foi de $5,2 \text{ plantas m}^{-1}$, valor próximo a densidade de semeadura de 5,6 sementes por metro regulada na semeadora. Diferente da emergência da cultura da soja, a textura não influenciou no surgimento inicial das plântulas de milho o que pode ser constatado na Figura 18 que mostra que as quatro classes texturais pouco diferiram com relação à emergência em todos os dias. Porém, quando se considerou somente os pontos extremos com máximo e mínimo conteúdo de argila houve uma variação

do início da emergência até o estabelecimento final do número de plântulas por metro. O ponto mais argiloso estabilizou a emergência com uma média de 5,75 plantas m^{-1} enquanto o ponto com menor conteúdo de argila finalizou o estágio com 5,5 plantas m^{-1} .

A taxa de emergência média da cultura do milho foi superior a da soja, 90,3% (Figura 19), todavia muitos pontos ficaram abaixo dessa média, alguns dos quais coincidiram com os pontos avaliados durante a emergência da soja no ano anterior que também apresentaram uma taxa de emergência inferior à média geral. Assim como na avaliação anterior não foi observada uma tendência de variação da taxa de emergência com o conteúdo de argila da transeção. As médias por classe textural foram, respectivamente, 91,82; 88,64; 89,61 e 91,36%, não havendo diferença significativa entre elas.

O número médio de plântulas emergidas por parcela (IVE) foi de 3,11 (Figura 20).

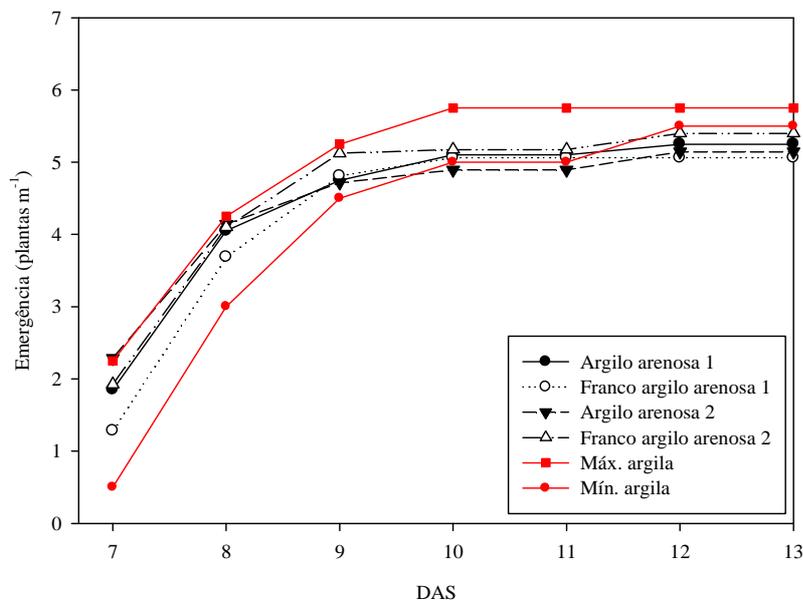


Figura 18 – Emergência da cultura do milho (plantas m^{-1}) de acordo com o a classe textural e do conteúdo máximo e mínimo de argila

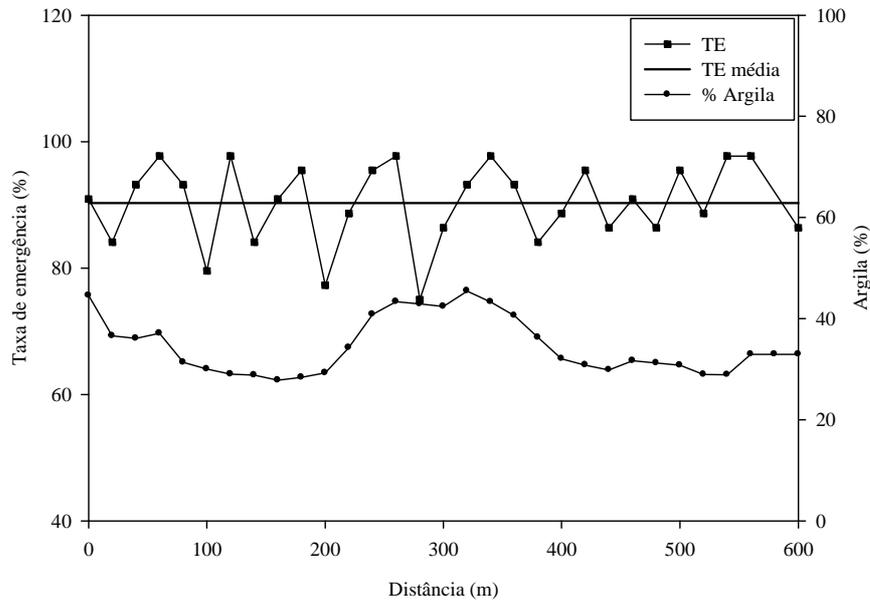


Figura 19 – Valores médios de taxa de emergência e conteúdo de argila para a cama de semeadura da cultura do milho (2011) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR

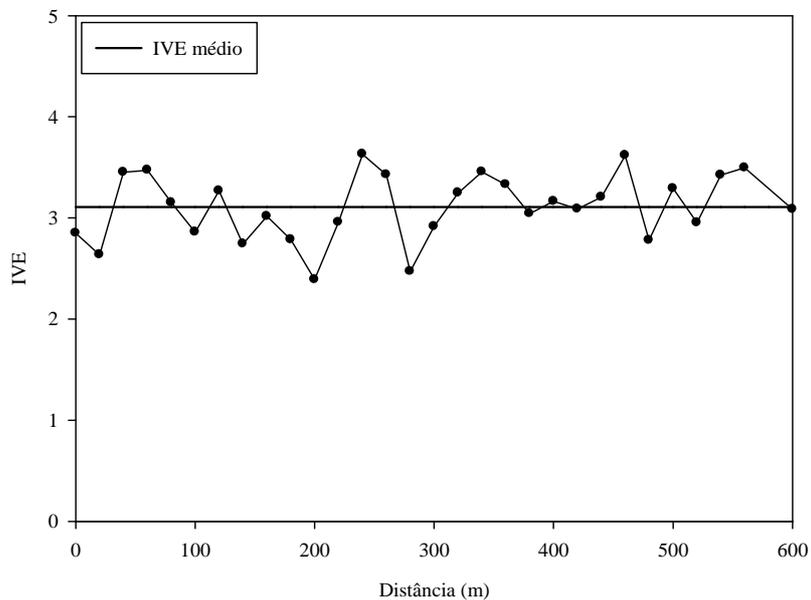


Figura 20 – Valores médios de índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura do milho (2011) avaliados em 30 pontos ao longo de uma transeção de 600 m em área de plantio direto em Ponta Grossa-PR

2.3.4.4 Análise da estabilidade temporal para a umidade do solo

Para a avaliação da estabilidade temporal, o conjunto de dados deve enquadrar-se dentro de algumas especificações, dentre elas a normalidade desses dados. A normalidade dos

dados de umidade obtidos na cama de semeadura do milho foi certificada pelo teste de Shapiro Wilk para todos dos dias avaliados, sem a presença de *outliers*.

A variação da umidade ao longo da transeção para três datas, incluindo o dia mais seco (7 DAS) e o mais úmido (10 DAS), está apresentada na Figura 21. Os pontos apresentaram um comportamento constante, mantendo as posições, possivelmente devido à contribuição das precipitações em manter a camada com uma umidade mais uniforme. Este comportamento também foi observado na avaliação da umidade na cama de semeadura da soja e já é uma indicação de ocorrência de estabilidade temporal.

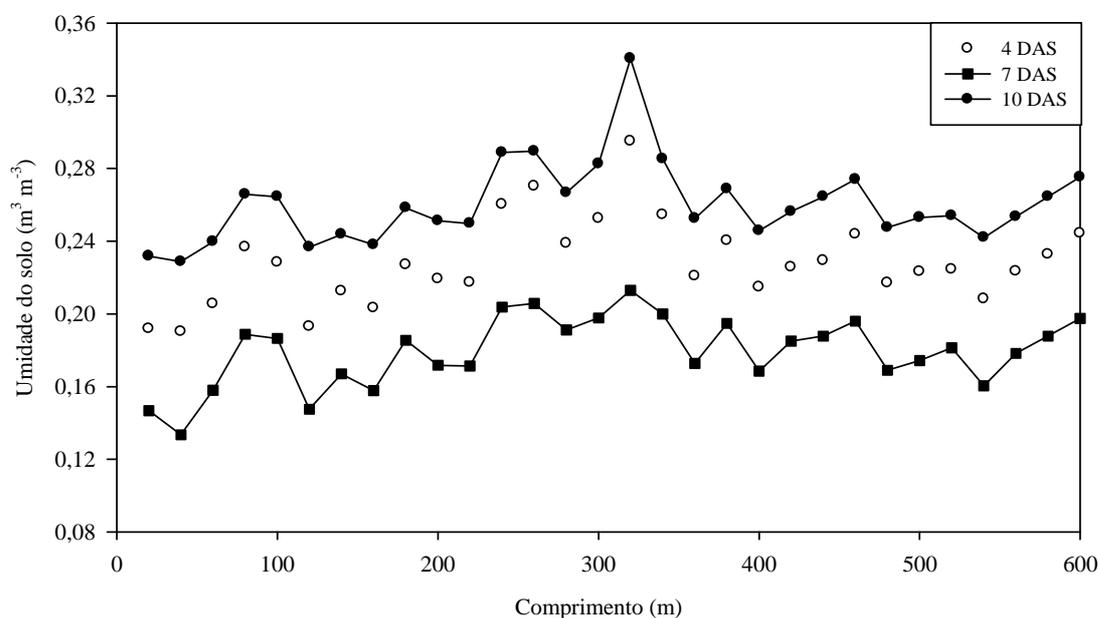


Figura 21 – Variabilidade da umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros em quatro tempos de avaliação, avaliada na cama de semeadura da cultura do milho (2011)

Os mesmos métodos utilizados para a observação da estabilidade temporal na primeira avaliação foram utilizados para determinar a estabilidade temporal dos dados de umidade na cama de semeadura do milho. A identificação das posições cujos valores permaneceram mais próximos da média foi feita através da plotagem das diferenças relativas ordenadas (Figura 22) que indicaram que os pontos 9, 21, 26 e 28 seriam os mais indicados para futuras amostragens por se manterem, durante todo o período, mais próximos da média, ou seja, apresentaram os menores valores de diferença relativa associados a um baixo desvio padrão. O ponto que mais superestimou ($DR > 0$) a média da umidade foi o ponto 16. A umidade neste ponto foi 19,86% ($\pm 8,52$) maior que a média geral enquanto que o que apresentou a maior subestimativa foi o ponto 2 que foi 16,92% ($\pm 4,90$) menor que a média.

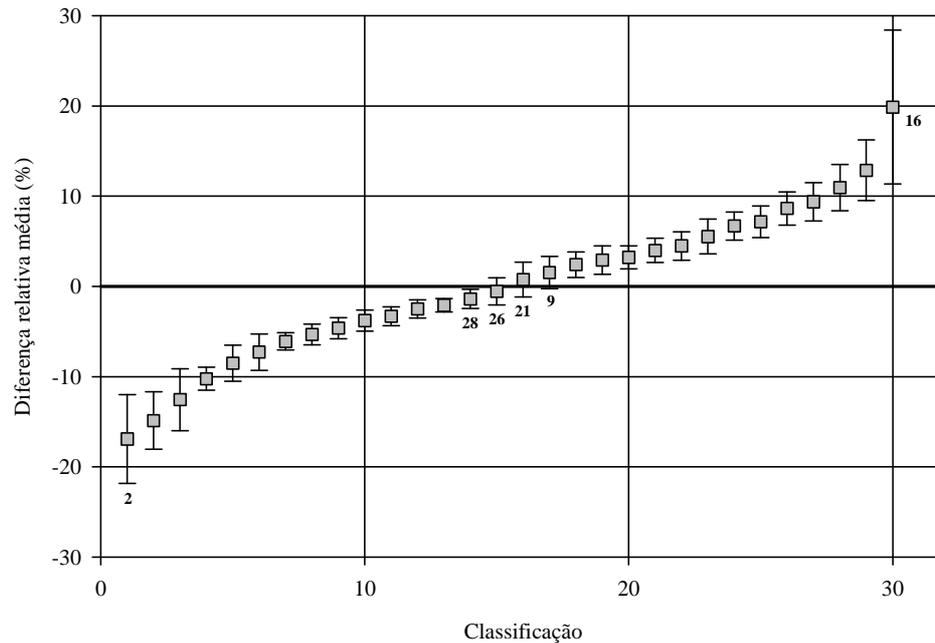


Figura 22 – Diferença relativa média intertemporal classificada para a unidade do solo segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20m. Barras verticais correspondem ao desvio padrão. Os números centralizados correspondem aos pontos que devem ser adotados para medidas representativas da média enquanto que os extremos aqueles que mais se distanciam da média

O grau de correlação da variabilidade espacial da umidade do solo nos dias avaliados foi determinado pelo cálculo dos coeficientes de Spearman (r_s). Os valores de r_s ficaram muito próximos de uma unidade para todos os dias (Tabela 5) indicando uma estabilidade temporal perfeita entre os tempos.

Apesar dos locais selecionados não terem coincidido de um ano para outro, nas duas avaliações os pontos distinguidos foram principalmente àqueles localizados na faixa da transeção que vai de 300 a 600 m, preconizando que amostragens realizadas nestes locais seriam mais indicadas por serem mais representativas da média geral.

Tabela 5 – Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman* entre séries de umidades obtidas em 30 pontos durante 7 dias

DAS	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(10)
$\bar{\theta}$ ($m^3 m^{-3}$)	0,228	0,193	0,204	0,179	0,190	0,260
(4)	1					
(5)	0,998	1				
(6)	0,998	0,997	1			
(7)	0,999	0,998	0,998	1		
(8)	0,998	0,997	0,998	0,998	1	
(10)	0,999	0,998	0,998	0,999	0,998	1

* significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$)

2.3.5 Permeabilidade ao ar

As médias dos atributos físicos mais relacionados com a permeabilidade do solo, avaliados para cada classe textural, evidenciaram diferenças com relação à estrutura do solo entre as classes na cama de semeadura das duas culturas, soja e milho (Tabelas 6 e 7). Os dados de k_a apresentaram altos valores de coeficiente de variação, onde os desvios relativos à média atingiram valores maiores que 80%. Estes resultados corroboram com aqueles obtidos por Warrick e Nielsen (1980), Ball e Schjøning (2002) e Cavalieri et al. (2009).

Em comparação aos demais atributos, observa-se que há uma nítida diferença entre a média e a mediana para os valores de k_a , o que corresponde a um indicativo de que os resultados obtidos para esta variável não apresentaram uma distribuição simétrica em torno das medidas de posição. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk confirmou a distribuição assimétrica deste conjunto de dados e uma transformação logarítmica foi utilizada a fim de estabilizar suas variâncias para adequação aos testes paramétricos (McINTYRE; TANNER, 1959; LOGSDON; JAYNES, 1996; MESQUITA, MORAES; CORRENTE, 2002).

Tabela 6 – Resumo estatístico dos atributos físicos do solo⁽¹⁾ da cama de semeadura (0-5 cm) da cultura da soja, para as quatro classes texturais identificadas ao longo de uma transeção de 600 m

	Mínimo	Máximo	DP	CV	Mediana	Média ⁽²⁾
Argilo arenosa 1						
Ds	1,17	1,48	0,09	6,61	1,30	1,31ab
θ	0,269	0,385	0,034	10,506	0,324	0,324ab
ϵ_a	0,069	0,250	0,052	30,161	0,183	0,173a
k_a	3,54	21,69	5,66	49,36	11,41	11,46b
Franco argilo arenosa 1						
Ds	1,11	1,54	0,09	7,34	1,28	1,28b
θ	0,268	0,397	0,034	11,033	0,295	0,307b
ϵ_a	0,094	0,259	0,037	18,037	0,209	0,206a
k_a	2,84	53,55	12,0	63,83	15,64	18,79ab
Argilo arenosa 2						
Ds	1,03	1,37	0,08	6,65	1,17	1,18c
θ	0,285	0,427	0,028	8,194	0,352	0,348a
ϵ_a	0,102	0,280	0,043	20,978	0,216	0,206a
k_a	4,89	46,88	13,11	53,43	22,83	24,53a
Franco argilo arenosa 2						
Ds	1,17	1,53	0,09	6,86	1,33	1,34a
θ	0,221	0,346	0,027	9,382	0,280	0,285c
ϵ_a	0,080	0,284	0,053	26,327	0,209	0,201a
k_a	3,53	69,29	19,02	85,65	16,08	22,20ab

⁽¹⁾: Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); θ , conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ϵ_a , porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); k_a , permeabilidade do solo ao ar (μm^2).

⁽²⁾: Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste t. O teste de média para k_a foi realizado mediante transformação logarítmica dos dados.

Com exceção da classe Argilo arenosa 1, houve uma redução da k_a na cama de semeadura de um ano para outro inferindo que houve uma mudança na estrutura do espaço

poroso por ocasião da semeadura das duas culturas. Ball e Schønning (2002) designaram valores de $k_a < 10 \mu\text{m}^2$ como característicos de solos com baixa permeabilidade, portanto, os valores médios obtidos para cada classe textural podem ser considerados como baixos a moderadamente baixos.

Tabela 7 – Resumo estatístico dos atributos físicos do solo⁽¹⁾ da cama de semeadura (0-5 cm) da cultura do milho, para as quatro classes texturais identificadas ao longo de uma transeção de 600 m

	Mínimo	Máximo	DP	CV	Mediana	Média ⁽²⁾
Argilo arenosa 1						
Ds	1,01	1,19	0,05	4,56	1,09	1,09b
θ	0,242	0,362	0,029	8,985	0,318	0,317b
ϵ_a	0,218	0,283	0,019	7,677	0,249	0,253a
k_a	3,79	35,17	10,73	70,04	12,40	15,32a
Franco argilo arenosa 1						
Ds	1,03	1,37	0,08	6,50	1,18	1,18a
θ	0,273	0,371	0,029	9,095	0,314	0,318b
ϵ_a	0,117	0,328	0,048	20,982	0,236	0,229a
k_a	2,73	28,83	6,135	81,04	5,22	7,57b
Argilo arenosa 2						
Ds	1,07	1,24	0,04	3,49	1,12	1,13b
θ	0,327	0,428	0,03	7,883	0,380	0,378a
ϵ_a	0,107	0,223	0,034	19,283	0,180	0,178c
k_a	2,61	9,77	1,85	35,42	4,88	5,23b
Franco argilo arenosa 2						
Ds	0,96	1,38	0,093	7,65	1,22	1,21a
θ	0,263	0,365	0,025	8,412	0,294	0,299b
ϵ_a	0,128	0,279	0,032	15,11	0,217	0,211b
k_a	2,72	36,98	7,73	60,47	11,56	12,79a

⁽¹⁾: Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); θ , conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ϵ_a , porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); k_a , permeabilidade do solo ao ar (μm^2).

⁽²⁾: Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste t. O teste de média para k_a foi realizado mediante transformação logarítmica dos dados.

Os atributos referidos nas Tabelas 6 e 7 são tidos como os mais influentes na k_a do solo. Assim, o grau de associação entre k_a e essas propriedades físicas foi avaliado através de testes de correlação, cujos resultados são apresentados na Tabela 8. A k_a foi significativamente correlacionada com a Ds nas amostras coletadas na cama de semeadura da cultura da soja, porém esta correlação não foi observada na avaliação realizada no ano subsequente, na cama de semeadura da cultura do milho. A Ds e a θ apresentam uma relação inversamente proporcional com a k_a . Esta relação está de acordo com os resultados obtidos em outros trabalhos (MOLDRUP et al., 2003; TYNER et al., 2005).

As relações foram mais evidentes com as propriedades características do espaço poroso do solo: porosidade de aeração e umidade; visto que os fluídos ar e água do solo ocupam simultaneamente diferentes porções do sistema poroso, o que influencia a magnitude do movimento de gases. Dessa forma, durante as medições da k_a , o solo não estava

completamente seco e ocasionou restrições ao movimento de ar nos poros preenchidos com líquido (BALL; SCHONNING, 2002), sendo os poros livres de água, expressos pela porosidade de aeração (ϵ_a), o caminho preferencial dos gases.

Tabela 8 – Coeficientes de correlação de Pearson⁽¹⁾ entre a permeabilidade do solo ao ar e as demais propriedades físicas do solo avaliadas⁽²⁾ na cama de semeadura da cultura da soja e do milho em área de plantio direto, Ponta Grossa-PR

Classe textural	Ds	ϵ_a	θ	% Argila
SOJA (2010)				
Argilo arenosa 1	-0,61	0,612	-0,29 ^{ns}	0,50
Franco argilo arenosa 1	-0,179 ^{ns}	0,48	-0,138 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Argilo arenosa 2	-0,556	0,634	-0,221 ^{ns}	0,264 ^{ns}
Franco argilo arenosa 2	-0,408	0,72	-0,522	0,211 ^{ns}
Geral	-0,413	0,644	-0,177 ^{ns}	0,242
MILHO (2011)				
Argilo arenosa 1	-0,125 ^{ns}	0,656	-0,828	0,57
Franco argilo arenosa 1	-0,164 ^{ns}	0,480	-0,527	-0,351 ^{ns}
Argilo arenosa 2	-0,356 ^{ns}	0,517	-0,429	-0,118 ^{ns}
Franco argilo arenosa 2	0,188 ^{ns}	0,254 ^{ns}	-0,282 ^{ns}	-0,468
Geral	0,035^{ns}	0,455	-0,575	-0,417

⁽¹⁾: significativo a < 5% de probabilidade pelo teste t; ^{ns}: não significativo

⁽²⁾: Ds, densidade do solo; θ , conteúdo de água no solo; ϵ_a , porosidade de aeração.

2.3.6 Índice de continuidade de poros

As medidas da k_a associadas aos valores de ϵ_a , calculados por ocasião da determinação, podem ser relacionadas na forma Log-Log usando a forma empírica da relação de Kozeny-Carman, Eq. (5), para a obtenção do parâmetro N, que representa o coeficiente angular desta equação e está relacionado com a continuidade de poros do solo, representando a porcentagem de poros contínuos interligados disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da ϵ_a . Com os parâmetros da regressão foi calculada a porosidade bloqueada que representa a porcentagem do espaço poroso da amostra não disponível para o fluxo. Um exemplo do procedimento de obtenção dos parâmetros, tanto para cada amostra individual como para o conjunto de pontos de cada classe textural, é mostrado na Figura 23.

Houve pouca variação no índice de continuidade de poros N, para as quatro classes nos dois anos, com exceção do comprimento da transeção correspondente a classe textural Argilo arenosa para o segundo ano de avaliação (2011), na cama de semeadura do milho (Tabela 9). A avaliação da continuidade do sistema poroso através do cálculo deste índice realizado em outros trabalhos também constataram valores baixos de N para a camada

superficial do solo (FILHO, 2012; SILVEIRA Jr., 2012; RODRIGUES et al., 2011; DOERNER; HORN, 2009).

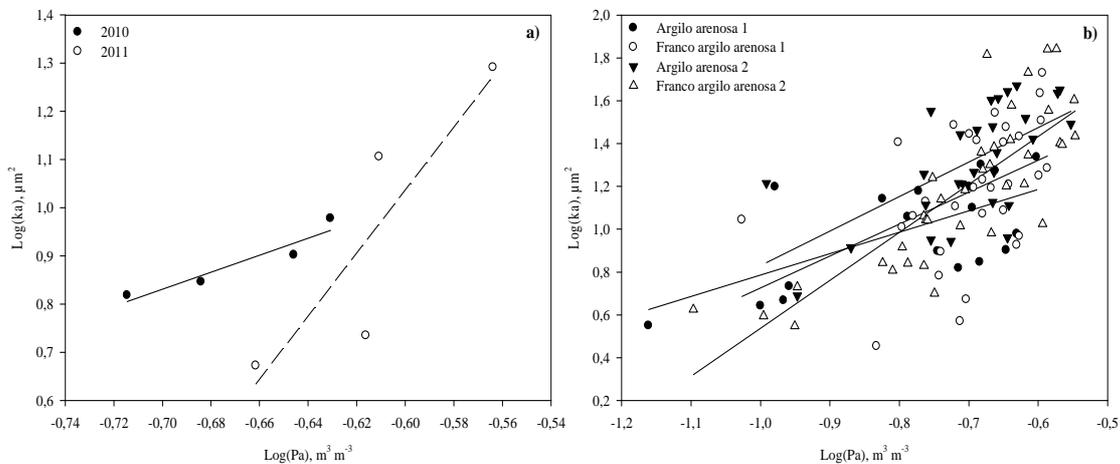


Figura 23 – Exemplo da relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (k_a) e a porosidade de aeração (ϵ_a) para cada amostra (a) e para cada classe textural (b)

Isto se deve, principalmente, pela mobilização da camada por implementos por ocasião da semeadura. No entanto, valores superiores para o sistema plantio direto também foram relatados na literatura (BALL et al., 1988) com índices de continuidade variando de 3,87 a 8,64. Os modelos de regressão explicaram $\leq 50\%$ da variabilidade dos dados de k_a .

Tabela 9 – Parâmetros da regressão* dos valores da permeabilidade do solo ao ar (k_a) versus a porosidade de aeração (ϵ_a), obtidos pela equação $\log(k_a) = \log(M) + N \log(\epsilon_a)$ e, porosidade bloqueada (ϵ_b)

Classe textural	$\log(M)$	N	ϵ_b	R^2
SOJA (2010)				
Argilo arenosa 1	1,785***	0,998**	1,63	0,41**
Franco argilo arenosa 1	2,216***	1,49 *	3,26	0,19*
Argilo arenosa 2	2,442***	1,612***	3,06	0,38***
Franco argilo arenosa 2	2,623***	1,90***	4,16	0,50***
MILHO (2011)				
Argilo arenosa 1	5,312***	7,102***	17,864	0,45***
Franco argilo arenosa 1	1,535***	1,159*	4,737	0,16*
Argilo arenosa 2	1,332***	0,843**	2,630	0,23**
Franco argilo arenosa 2	1,746ns	1,056ns	2,222	0,05 ^{ns}

* ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$); *** ($p < 0,0001$) para parâmetros (teste t) e R^2 (teste F).

A porosidade bloqueada (ϵ_b), que expressa o valor de porosidade abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade do seu sistema poroso, foi relativamente baixa nos dois anos de avaliação. Pelo reduzido volume de poros bloqueados, ou seja, o volume de poros não disponíveis para o fluxo, conclui-se que a camada superficial não apresentou impedimento ao livre fluxo de ar através do solo, portanto, as condições de

aeração para o desenvolvimento do sistema radicular das plântulas de soja e milho foram adequadas.

Os volumes de poros bloqueados foram semelhantes aos encontrados por Rodrigues et al. (2011) em sistema plantio direto na mesma região e por Ball et al. (1988) também em solo sob sistema plantio direto na Escócia. Dorner e Horn (2009), do mesmo modo, encontraram uma porcentagem de porosidade bloqueada muito baixa (<1%) para a camada superficial de um solo cultivado sob preparo reduzido. Porém, Filho (2012) relatou altos valores de porosidade bloqueada (12-22%) na mesma área em experimento de escarificação mecânica e biológica.

2.3.7 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

A análise descritiva das variáveis utilizadas para o cálculo do IHO (D_s , θ e RP), nos dois períodos de avaliação, está apresentada na Tabela 10. As variáveis θ e RP atingiram uma ampla faixa de valores, um comportamento desejável para o ajuste da curva de retenção de água (CRA) e da curva de resistência à penetração do solo (CRP). A densidade do solo (D_s) foi a variável que apresentou os menores coeficientes de variação (CV), como já demonstrado anteriormente nas Tabelas 6 e 7. A baixa variabilidade da densidade é comumente observada e relatada por vários autores, dentre eles Fidalski, Tormena e Silva (2010) e Blainski et al. (2012). Assim como os dados obtidos em campo, os valores de RP obtidos em laboratório também apresentaram altos valores de CV, os quais estão associados ao gradiente de conteúdo de água, bem como à variação da D_s . Com relação ao CV dos atributos determinados para o cálculo do IHO a seguinte ordem normalmente é relatada por alguns autores: $D_s < \theta < RP$ (SILVA; KAY, 1996; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2006; TORMENA et al., 2007).

Os coeficientes de determinação (R^2) do modelo ajustado à curva de resistência à penetração do solo foram inferiores aos daqueles do modelo ajustado para a curva de retenção de água (Tabelas 11 e 12) nas duas avaliações, portanto, os dados explicaram melhor o fenômeno de retenção de água do que o de resistência à penetração. Apesar dos menores R^2 da CRP, os valores de F foram altamente significativos ($p < 0,001$) em todos os pontos (valores não publicados). Como esperado, os coeficientes estimados pelo modelo de CRP evidenciaram que a RP foi positivamente correlacionada com a D_s e negativamente com a θ . Algumas exceções foram observadas no ajuste de determinados pontos avaliados na cama de semeadura do milho. Tais resultados possivelmente se devem a alta variabilidade dos dados de RP. A relação positiva da RP com a densidade do solo e negativa com a umidade tem sido

frequentemente relatada por outros estudos Silva et al. (1994); Imhoff et al. (2001) e Cavalieri et al. (2006).

Os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água pelo modelo utilizado, em geral, mostram uma correlação positiva com a D_s e negativa com o potencial de água no solo (TORMENA et al., 2007; ARAÚJO; TORMENA; SILVA, 2004). Porém, para a D_s do solo este comportamento nem sempre foi observado no ajuste dos dados de cada ponto, contudo, para todos os pontos, tanto na avaliação da cama de semeadura da soja como na do milho a relação foi negativa com o potencial de água no solo, ou seja, a umidade do solo é menor a medida que aumenta o seu potencial.

É comum observar um aumento na retenção de água associado ao aumento na densidade do solo, provavelmente devido à redução da macroporosidade do solo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; CALONEGO; ROSOLEM, 2011). As equações ajustadas para a CRA explicaram >90% da variabilidade no conteúdo de água dos pontos avaliados enquanto que para a CRP esta resposta variou de 25 a > 90%.

Com os coeficientes estimados a partir de ambos os modelos (CRA e CRP), foram obtidos os conteúdos de água necessários para o cálculo do IHO: umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), umidade do solo na resistência à penetração de 2 MPa (θ_{RP}) e umidade do solo com porosidade de aeração de 10% (θ_{PA}). Estes dados estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Para equiparar as diferenças na disponibilidade de água, de ponto para ponto ou de classe para classe, o IHO foi comparado com a usual Água Disponível (AD) dos mesmos pontos. A AD é tida como a diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo (-10 kPa e aquele no ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Nas Tabelas 13 e 14 estão apresentados os dados de conteúdo de água utilizados para o cálculo tanto do IHO como da AD como também a percentagem de redução da água disponível para as plantas se o IHO for utilizado ao invés da AD. Nos dois anos de avaliação o IHO, para a maior parte da transeção, foi menor que a tradicional AD.

Tabela 10 – Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (Ds), conteúdo de água (θ) e resistência à penetração (RP) da cama de semeadura da cultura da soja e do milho

(continua)											
Ponto	Propriedade	Soja (2010)					Milho (2011)				
		Média	DP	Mín.	Máx.	CV (%)	Média	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
1	Ds (Mg m^{-3})	1,30	0,071	1,23	1,41	5,49	0,97	0,008	0,96	0,98	0,82
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,371	0,088	0,196	0,523	23,82	0,344	0,119	0,171	0,578	34,71
	RP (MPa)	2,35	1,407	0,54	6,16	59,88	0,88	0,529	0,32	1,88	59,95
2	Ds (Mg m^{-3})	1,27	0,063	1,17	1,33	4,95	1,11	0,029	1,08	1,15	2,57
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,336	0,100	0,121	0,516	29,69	0,372	0,107	0,193	0,583	28,74
	RP (MPa)	2,03	1,74	0,47	6,93	85,77	2,07	1,697	0,24	5,25	82,20
3	Ds (Mg m^{-3})	1,24	0,033	1,21	1,29	2,70	1,14	0,034	1,10	1,19	2,97
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,366	0,093	0,214	0,537	25,34	0,344	0,104	0,196	0,565	30,35
	RP (MPa)	1,40	0,738	0,49	2,77	52,62	1,83	1,219	0,45	4,39	66,61
4	Ds (Mg m^{-3})	1,44	0,031	1,40	1,48	2,15	1,07	0,037	1,01	1,10	3,44
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,360	0,082	0,130	0,468	22,84	0,382	0,110	0,201	0,611	28,66
	RP (MPa)	4,37	1,296	2,57	6,62	29,66	1,67	0,992	0,56	3,34	59,40
5	Ds (Mg m^{-3})	1,32	0,019	1,29	1,34	1,44	1,10	0,051	1,03	1,17	4,66
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,310	0,103	0,117	0,521	33,29	0,382	0,110	0,214	0,606	28,75
	RP (MPa)	1,89	1,413	0,36	4,77	74,66	1,87	1,203	0,39	4,96	64,27
6	Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,062	1,20	1,37	4,84	1,16	0,093	1,03	1,28	8,09
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,316	0,111	0,096	0,519	34,96	0,362	0,114	0,156	0,609	31,33
	RP (MPa)	1,29	0,806	0,41	3,42	62,43	2,11	1,566	0,32	4,82	74,15
7	Ds (Mg m^{-3})	1,28	0,019	1,26	1,31	1,49	1,13	0,032	1,10	1,18	2,82
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,316	0,106	0,144	0,529	33,49	0,332	0,118	0,161	0,574	35,65
	RP (MPa)	1,46	0,935	0,55	3,25	64,12	2,08	1,34	0,39	4,60	64,32
8	Ds (Mg m^{-3})	1,42	0,099	1,31	1,54	7,02	1,19	0,059	1,11	1,26	4,95
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,318	0,092	0,160	0,503	28,75	0,336	0,107	0,152	0,537	31,85
	RP (MPa)	2,74	2,423	0,62	9,25	88,50	1,94	1,348	0,21	4,28	69,47
9	Ds (Mg m^{-3})	1,30	0,034	1,25	1,34	2,62	1,22	0,074	1,15	1,34	6,05
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,324	0,105	0,115	0,530	32,55	0,336	0,109	0,156	0,556	32,48
	RP (MPa)	1,64	1,093	0,27	3,82	66,59	2,04	1,721	0,41	6,72	84,49
10	Ds (Mg m^{-3})	1,31	0,033	1,27	1,36	2,54	1,26	0,084	1,17	1,37	6,69
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,315	0,105	0,106	0,533	33,46	0,358	0,100	0,146	0,553	28,05
	RP (MPa)	1,40	0,837	0,44	2,91	59,90	2,45	1,798	0,36	6,50	73,43
11	Ds (Mg m^{-3})	1,32	0,052	1,26	1,38	3,97	1,17	0,042	1,11	1,22	3,59
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,348	0,091	0,164	0,509	26,20	0,346	0,113	0,145	0,563	32,66
	RP (MPa)	2,35	1,202	0,97	4,23	51,19	2,52	1,983	0,40	6,52	78,64
12	Ds (Mg m^{-3})	1,18	0,069	1,11	1,29	5,85	1,18	0,037	1,14	1,23	3,15
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,380	0,097	0,222	0,570	25,59	0,338	0,117	0,137	0,551	34,50
	RP (MPa)	1,35	1,214	0,55	4,89	89,65	1,80	1,326	0,29	3,85	73,84
13	Ds (Mg m^{-3})	1,16	0,026	1,12	1,19	2,28	1,12	0,050	1,05	1,19	4,50
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,399	0,099	0,222	0,569	24,85	0,382	0,118	0,158	0,599	30,77
	RP (MPa)	1,43	0,797	0,57	3,12	55,83	1,97	1,375	0,62	4,31	69,70
14	Ds (Mg m^{-3})	1,07	0,026	1,03	1,10	2,46	1,08	0,052	0,99	1,12	4,82
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,387	0,119	0,184	0,620	30,82	0,400	0,115	0,193	0,625	28,88
	RP (MPa)	0,90	0,558	0,32	2,25	62,09	1,88	1,07	0,53	3,56	56,83
15	Ds (Mg m^{-3})	1,17	0,026	1,14	1,21	2,25	1,09	0,062	0,99	1,15	5,68
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,393	0,102	0,211	0,598	25,95	0,409	0,102	0,229	0,575	25,02
	RP (MPa)	1,50	1,014	0,36	3,25	67,71	2,21	1,346	0,52	4,38	60,89

Tabela 10 – Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (Ds), conteúdo de água (θ) e resistência à penetração (RP) da cama de semeadura da cultura da soja e do milho

Ponto	Propriedade	Soja (2010)					Milho (2011)				
		Média	DP	Mín.	Máx.	CV (%)	Média	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
16	Ds (Mg m^{-3})	1,13	0,036	1,07	1,16	3,19	1,12	0,022	1,10	1,15	1,97
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,395	0,099	0,183	0,594	24,98	0,433	0,102	0,245	0,578	23,52
	RP (MPa)	1,47	1,129	0,41	4,57	76,71	2,05	1,224	0,66	4,29	59,79
17	Ds (Mg m^{-3})	1,20	0,034	1,16	1,24	2,83	1,16	0,054	1,10	1,22	4,69
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,392	0,092	0,209	0,556	23,44	0,419	0,097	0,222	0,567	23,16
	RP (MPa)	1,50	1,019	0,40	3,18	67,83	2,63	1,532	0,80	5,05	58,20
18	Ds (Mg m^{-3})	1,20	0,060	1,14	1,29	5,06	1,13	0,066	1,07	1,24	5,85
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,378	0,093	0,212	0,577	24,72	0,391	0,095	0,222	0,576	24,27
	RP (MPa)	1,47	0,971	0,64	4,28	66,03	2,82	1,947	0,69	7,03	69,08
19	Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,054	1,23	1,37	4,18	1,14	0,016	1,12	1,16	1,43
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,359	0,089	0,187	0,524	24,75	0,382	0,096	0,215	0,547	25,19
	RP (MPa)	2,27	1,163	0,61	4,49	51,15	2,74	1,5	0,83	5,69	54,77
20	Ds (Mg m^{-3})	1,22	0,050	1,14	1,27	4,13	1,12	0,019	1,09	1,14	1,66
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,344	0,102	0,183	0,555	29,64	0,370	0,104	0,201	0,566	28,15
	RP (MPa)	1,12	0,678	0,40	2,78	60,47	2,22	1,517	0,40	4,42	68,28
21	Ds (Mg m^{-3})	1,26	0,036	1,22	1,31	2,82	1,20	0,026	1,17	1,23	2,18
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,326	0,110	0,174	0,536	33,67	0,350	0,096	0,186	0,53	27,57
	RP (MPa)	1,05	0,519	0,41	2,03	49,32	3,29	2,42	0,58	8,04	73,66
22	Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,031	1,26	1,32	2,37	1,20	0,032	1,15	1,24	2,72
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,331	0,113	0,156	0,518	34,01	0,353	0,091	0,214	0,524	25,76
	RP (MPa)	1,76	1,159	0,43	4,43	65,77	2,34	1,484	0,45	5,03	63,34
23	Ds (Mg m^{-3})	1,39	0,033	1,35	1,43	2,35	1,19	0,028	1,16	1,23	2,37
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,309	0,102	0,142	0,495	32,98	0,326	0,106	0,168	0,536	32,48
	RP (MPa)	2,54	2,06	1,05	6,57	80,98	2,24	1,937	0,27	7,04	86,50
24	Ds (Mg m^{-3})	1,46	0,043	1,40	1,51	2,93	1,28	0,045	1,24	1,36	3,49
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,324	0,077	0,150	0,451	23,86	0,317	0,100	0,151	0,505	31,58
	RP (MPa)	2,86	1,442	0,77	4,80	50,41	2,60	2,066	0,48	6,87	79,48
25	Ds (Mg m^{-3})	1,34	0,097	1,23	1,46	7,22	1,22	0,033	1,17	1,26	2,68
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,305	0,105	0,130	0,523	34,32	0,324	0,109	0,147	0,52	33,80
	RP (MPa)	1,59	0,944	0,36	2,95	59,42	2,30	1,617	0,41	5,77	70,38
26	Ds (Mg m^{-3})	1,30	0,041	1,25	1,34	3,17	1,24	0,054	1,17	1,29	4,39
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,301	0,111	0,134	0,518	37,01	0,315	0,107	0,154	0,511	33,88
	RP (MPa)	0,86	0,494	0,30	1,90	57,47	1,96	1,517	0,26	5,12	77,57
27	Ds (Mg m^{-3})	1,39	0,102	1,29	1,53	7,35	1,20	0,019	1,17	1,22	1,59
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,304	0,098	0,140	0,495	32,33	0,316	0,100	0,162	0,513	31,65
	RP (MPa)	1,91	1,249	0,29	4,33	65,49	1,49	1,161	0,46	4,16	78,05
28	Ds (Mg m^{-3})	1,30	0,036	1,25	1,34	2,79	1,33	0,053	1,27	1,41	3,98
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,331	0,091	0,149	0,509	27,44	0,301	0,091	0,150	0,462	30,31
	RP (MPa)	1,90	1,084	0,88	3,92	57,13	2,88	1,701	0,46	6,48	59,08
29	Ds (Mg m^{-3})	1,27	0,069	1,17	1,35	5,42	1,28	0,074	1,19	1,38	5,77
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,315	0,102	0,153	0,520	32,43	0,302	0,103	0,126	0,505	34,08
	RP (MPa)	1,46	0,862	0,52	3,07	59,03	2,95	2,093	0,31	6,61	71,04
30	Ds (Mg m^{-3})	1,43	0,078	1,31	1,52	5,50	1,00	0,050	0,96	1,08	5,04
	θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,324	0,094	0,156	0,495	28,98	0,352	0,120	0,174	0,58	34,06
	RP (MPa)	2,66	1,469	0,83	5,30	55,24	1,68	1,354	0,45	4,46	80,38

DP – Desvio Padrão; Mín. – valor mínimo; Máx. – valor máximo; CV – Coeficiente de Variação (%)

Na avaliação da cama de semeadura da soja, a umidade do solo na qual a resistência a penetração de 2 MPa (θ_{RP}) pode tornar-se restritiva ao desenvolvimento radicular foi o limite inferior do IHO para a maioria dos pontos, com exceção dos pontos 6 (100-120 m) e 14 (260-280 m), o primeiro localizado na faixa classificada com a textura argilo arenosa e o segundo na faixa franco argilo arenosa (Figura 24). O limite superior foi definido pela umidade na capacidade de campo ao longo de toda a transeção. Uma situação atípica foi observada na faixa de 60-80 m onde a θ_{RP} calculada ficou acima da θ_{CC} e θ_{PA} , este resultado se deve aos parâmetros obtidos para o ajuste da CRP deste ponto (Tabela 9) onde o coeficiente d foi bastante superior à todos os demais pontos.

Tabela 11 – Ajuste das equações da curva de resistência do solo e da curva de retenção de água para a cama de semeadura da cultura da soja (2010)

Ponto	Curva de retenção de água*	R ²	Curva de resistência do solo*	R ²
1	$\theta = e^{(-0,8643+0,2650Ds)} \psi^{(-0,1070)}$	0,89	RP = 0,0305 $\theta^{-1,8635}$ Ds ^{7,4385}	0,73
2	$\theta = e^{(-1,2085+0,5405Ds)} \psi^{(-0,1293)}$	0,95	RP = 0,0003 $\theta^{-3,1188}$ Ds ^{17,0024}	0,88
3	$\theta = e^{(-0,5993+0,0920Ds)} \psi^{(-0,1192)}$	0,93	RP = 0,0229 $\theta^{-2,1924}$ Ds ^{5,9443}	0,65
4	$\theta = e^{(-1,5413+0,6582Ds)} \psi^{(-0,0949)}$	0,90	RP = 0,7870 $\theta^{-1,3059}$ Ds ^{-0,0435}	0,74
5	$\theta = e^{(0,0462-0,4150Ds)} \psi^{(-0,1548)}$	0,95	RP = 0,0002 $\theta^{-1,9165}$ Ds ^{21,7981}	0,84
6	$\theta = e^{(-0,4927+0,0345Ds)} \psi^{(-0,1626)}$	0,95	RP = 0,0812 $\theta^{-0,7776}$ Ds ^{5,9935}	0,25
7	$\theta = e^{(-1,1146+0,4989Ds)} \psi^{(-0,1559)}$	0,93	RP = 0,0182 $\theta^{-2,4352}$ Ds ^{2,2769}	0,81
8	$\theta = e^{(-0,1924-0,2644Ds)} \psi^{(-0,1324)}$	0,95	RP = 0,0002 $\theta^{-3,4601}$ Ds ^{11,6133}	0,94
9	$\theta = e^{(-0,3034-0,1303Ds)} \psi^{(-0,1504)}$	0,97	RP = 0,0765 $\theta^{-1,3499}$ Ds ^{3,6581}	0,73
10	$\theta = e^{(-1,0143+0,3802Ds)} \psi^{(-0,1454)}$	0,94	RP = 0,0039 $\theta^{-1,2195}$ Ds ^{14,4555}	0,68
11	$\theta = e^{(1,3900+0,6341Ds)} \psi^{(-0,1124)}$	0,93	RP = 0,0407 $\theta^{-1,7484}$ Ds ^{5,9824}	0,88
12	$\theta = e^{(-0,6014+0,1277Ds)} \psi^{(-0,1182)}$	0,91	RP = 0,0015 $\theta^{-3,7950}$ Ds ^{10,5539}	0,86
13	$\theta = e^{(0,2056-0,5395Ds)} \psi^{(-0,1146)}$	0,89	RP = 0,0320 $\theta^{-2,5099}$ Ds ^{4,9773}	0,78
14	$\theta = e^{(-1,0045+0,6280Ds)} \psi^{(-0,1414)}$	0,95	RP = 0,0392 $\theta^{-1,5370}$ Ds ^{14,9435}	0,54
15	$\theta = e^{(-0,5253+0,1015Ds)} \psi^{(-0,1207)}$	0,94	RP = 0,0063 $\theta^{-2,2790}$ Ds ^{16,4503}	0,73
16	$\theta = e^{(-0,4007-0,0262Ds)} \psi^{(-0,1135)}$	0,93	RP = 0,0334 $\theta^{-2,4242}$ Ds ^{6,2097}	0,90
17	$\theta = e^{(-2,0133+1,2697Ds)} \psi^{(-0,1018)}$	0,91	RP = 0,0041 $\theta^{-2,8367}$ Ds ^{13,4351}	0,57
18	$\theta = e^{(-0,5076+0,0215Ds)} \psi^{(-0,1114)}$	0,91	RP = 0,0235 $\theta^{-2,0780}$ Ds ^{8,1385}	0,94
19	$\theta = e^{(-0,9535+0,3227Ds)} \psi^{(-0,1100)}$	0,97	RP = 0,0048 $\theta^{-2,4612}$ Ds ^{11,3124}	0,81
20	$\theta = e^{(-0,6312+0,1496Ds)} \psi^{(-0,1435)}$	0,95	RP = 0,0068 $\theta^{-2,1520}$ Ds ^{9,9146}	0,81
21	$\theta = e^{(-0,5811+0,1351Ds)} \psi^{(-0,1674)}$	0,94	RP = 0,0069 $\theta^{-2,6284}$ Ds ^{4,3070}	0,95
22	$\theta = e^{(-1,4401+0,7927Ds)} \psi^{(-0,1593)}$	0,97	RP = 0,0026 $\theta^{-1,9925}$ Ds ^{13,2558}	0,75
23	$\theta = e^{(-0,4741-0,0317Ds)} \psi^{(-0,1506)}$	0,96	RP = 2,8x10 ⁻⁵ $\theta^{-2,9878}$ Ds ^{19,7370}	0,95
24	$\theta = e^{(-1,6274+0,6552Ds)} \psi^{(-0,1026)}$	0,92	RP = 0,0018 $\theta^{-1,9623}$ Ds ^{12,0797}	0,76
25	$\theta = e^{(-0,9025+0,2814Ds)} \psi^{(-0,1522)}$	0,90	RP = 0,0190 $\theta^{-1,4786}$ Ds ^{6,9469}	0,74
26	$\theta = e^{(-0,7659+0,2582Ds)} \psi^{(-0,1823)}$	0,93	RP = 0,0201 $\theta^{-2,0722}$ Ds ^{1,2945}	0,88
27	$\theta = e^{(-1,1718+0,4568Ds)} \psi^{(-0,1534)}$	0,91	RP = 0,0190 $\theta^{-1,2323}$ Ds ^{7,9457}	0,78
28	$\theta = e^{(-1,0470+0,3697Ds)} \psi^{(-0,1218)}$	0,95	RP = 0,1095 $\theta^{-1,5273}$ Ds ^{2,5399}	0,64
29	$\theta = e^{(-0,6135+0,1013Ds)} \psi^{(-0,1560)}$	0,94	RP = 0,0235 $\theta^{-1,9368}$ Ds ^{4,9363}	0,76
30	$\theta = e^{(-0,4535-0,0738Ds)} \psi^{(-0,1295)}$	0,95	RP = 0,0220 $\theta^{-1,2859}$ Ds ^{7,9193}	0,77

Tabela 12 – Ajuste das equações da curva de resistência do solo e da curva de retenção de água para a cama de semeadura da cultura do milho (2011)

Ponto	Curva de retenção de água	R ²	Curva de resistência do solo	R ²
1	$\theta = e^{(-1,6431+1,4526Ds)} \Psi^{(-0,1913)}$	0,92	RP = 0,0904 $\theta^{-1,8067} D_s^{13,2613}$	0,64
2	$\theta = e^{(0,2904-0,5686Ds)} \Psi^{(-0,1462)}$	0,92	RP = 0,1122 $\theta^{-2,6036} D_s^{-5,2473}$	0,70
3	$\theta = e^{(-0,0717-0,2302Ds)} \Psi^{(-0,1690)}$	0,91	RP = 0,0385 $\theta^{-2,8779} D_s^{-1,2886}$	0,70
4	$\theta = e^{(0,2024-0,4329Ds)} \Psi^{(-0,1630)}$	0,88	RP = 0,1445 $\theta^{-2,2045} D_s^{-5,4881}$	0,55
5	$\theta = e^{(-0,1840-0,0659Ds)} \Psi^{(-0,1624)}$	0,93	RP = 0,0276 $\theta^{-2,8051} D_s^{5,4376}$	0,82
6	$\theta = e^{(-0,8101+0,4612Ds)} \Psi^{(-0,1699)}$	0,90	RP = 0,0168 $\theta^{-2,6119} D_s^{8,0074}$	0,85
7	$\theta = e^{(0,6059-0,7283Ds)} \Psi^{(-0,2066)}$	0,92	RP = 0,1848 $\theta^{-2,0853} D_s^{-6,1768}$	0,72
8	$\theta = e^{(-0,6878+0,2998Ds)} \Psi^{(-0,1753)}$	0,90	RP = 0,0466 $\theta^{-1,3849} D_s^{9,3660}$	0,60
9	$\theta = e^{(-0,4350+0,1071Ds)} \Psi^{(-0,1811)}$	0,94	RP = 0,0017 $\theta^{-3,2444} D_s^{9,9547}$	0,93
10	$\theta = e^{(-0,7988+0,3436Ds)} \Psi^{(-0,1510)}$	0,91	RP = 0,0061 $\theta^{-2,4882} D_s^{10,7669}$	0,84
11	$\theta = e^{(-0,4783+0,1689Ds)} \Psi^{(-0,1792)}$	0,94	RP = 0,0062 $\theta^{-2,5625} D_s^{13,2108}$	0,89
12	$\theta = e^{(0,1587-0,3505Ds)} \Psi^{(-0,1906)}$	0,94	RP = 0,1486 $\theta^{-1,6132} D_s^{0,0540}$	0,65
13	$\theta = e^{(0,0738-0,2797Ds)} \Psi^{(-0,1643)}$	0,93	RP = 0,0707 $\theta^{-1,9628} D_s^{5,2790}$	0,94
14	$\theta = e^{(-0,3254+0,1009Ds)} \Psi^{(-0,1601)}$	0,91	RP = 0,0867 $\theta^{-2,0322} D_s^{6,3546}$	0,82
15	$\theta = e^{(-0,9204+0,5141Ds)} \Psi^{(-0,1240)}$	0,95	RP = 0,1204 $\theta^{-2,5653} D_s^{-2,1376}$	0,82
16	$\theta = e^{(0,6385-0,8014Ds)} \Psi^{(-0,1308)}$	0,93	RP = 0,1777 $\theta^{-2,2686} D_s^{-1,5300}$	0,69
17	$\theta = e^{(-0,2114+0,0882Ds)} \Psi^{(-0,1251)}$	0,92	RP = 0,2260 $\theta^{-2,1438} D_s^{-0,5756}$	0,86
18	$\theta = e^{(-0,3099-0,0263Ds)} \Psi^{(-0,1371)}$	0,95	RP = 0,0283 $\theta^{-3,3015} D_s^{4,1532}$	0,88
19	$\theta = e^{(-1,3143+0,8348Ds)} \Psi^{(-0,1347)}$	0,96	RP = 0,0625 $\theta^{-2,1906} D_s^{7,4314}$	0,83
20	$\theta = e^{(-0,0859-0,2203Ds)} \Psi^{(-0,1500)}$	0,95	RP = 0,0368 $\theta^{-2,7720} D_s^{3,5893}$	0,80
21	$\theta = e^{(0,2589-0,5361Ds)} \Psi^{(-0,1517)}$	0,94	RP = 0,0214 $\theta^{-2,4480} D_s^{8,6700}$	0,79
22	$\theta = e^{(0,3748-0,6356Ds)} \Psi^{(-0,1522)}$	0,93	RP = 0,0168 $\theta^{-3,0281} D_s^{4,5942}$	0,89
23	$\theta = e^{(0,0977-0,3498Ds)} \Psi^{(-0,1855)}$	0,95	RP = 0,0023 $\theta^{-2,9391} D_s^{13,3774}$	0,90
24	$\theta = e^{(-0,5630+0,1405Ds)} \Psi^{(-0,1757)}$	0,96	RP = 0,0076 $\theta^{-2,9965} D_s^{4,3659}$	0,81
25	$\theta = e^{(-1,9173+1,3021Ds)} \Psi^{(-0,1831)}$	0,94	RP = 0,0038 $\theta^{-1,9227} D_s^{17,0852}$	0,77
26	$\theta = e^{(-0,4352+0,0956Ds)} \Psi^{(-0,1937)}$	0,94	RP = 0,0487 $\theta^{-1,6477} D_s^{5,2369}$	0,45
27	$\theta = e^{(-0,1682-0,1590Ds)} \Psi^{(-0,1835)}$	0,94	RP = 0,0011 $\theta^{-3,2328} D_s^{11,6947}$	0,90
28	$\theta = e^{(-0,7029+0,1950Ds)} \Psi^{(-0,1750)}$	0,95	RP = 0,0356 $\theta^{-1,9445} D_s^{4,6121}$	0,88
29	$\theta = e^{(-0,3541-0,0076Ds)} \Psi^{(-0,1915)}$	0,96	RP = 0,0529 $\theta^{-1,9155} D_s^{3,6106}$	0,84
30	$\theta = e^{(-0,0261-0,2027Ds)} \Psi^{(-0,1861)}$	0,96	RP = 0,0501 $\theta^{-2,3438} D_s^{9,2604}$	0,88

Na cama de semeadura da cultura do milho o limite inferior foi definido pela resistência à penetração em todos os pontos (Figura 24). Para estes locais, a alta resistência à penetração fornece evidência de que a resistência do solo provavelmente será um fator mais limitante ao crescimento das raízes do que uma aeração deficiente. Com relação ao limite superior, este foi definido pela umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) ao longo de toda a transeção.

Neste estudo foi selecionado, com base na literatura e outros trabalhos de avaliação de IHO, o limite convencional para uma adequada aeração como uma porosidade de aeração

$\geq 10\%$. Com base neste critério, os valores de θ_{PA} resultantes não mostraram ocorrência de estresse de aeração em nenhuma ocasião. Cook (1995) e Glinski; Stepniewski (1985) propõem outro possível critério para os limites de aeração baseados na dinâmica do fornecimento de oxigênio dentro do solo.

Na cama de semeadura da soja houve uma maior percentagem ou uma maior magnitude do IHO em se aproximar da AD, de fato, em algumas faixas como 100-120; 180-200 e 260-280 a condição foi “ideal”, visto que o IHO correspondeu a 100% da AD. Os pontos que apresentaram uma maior redução da AD para as plantas no IHO corresponderam as faixas de 460-480 m (22,6 %) e 580-600 m (32,1 %) ambas localizadas na classe textural franco argilo arenosa.

Tabela 13 – Valores críticos dos conteúdos de água usados para calcular o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para cada faixa de 20 m na cama de semeadura da cultura da soja e a porcentagem da água disponível (AD) que está disponível para as plantas no IHO

Comprimento (m)	Ds	θ_{PA}	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{RP}	IHO	AD	%
	$Mg\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$						
0 - 20	1,30	0,412	0,363	0,212	0,296	0,067	0,151	44,6
20 - 40	1,27	0,419	0,328	0,171	0,217	0,111	0,156	71,0
40 - 60	1,23	0,435	0,355	0,196	0,230	0,125	0,160	78,3
60 - 80	1,44	0,357	0,357	0,222	0,484	0,000	0,135	0,0
80 - 100	1,32	0,401	0,297	0,137	0,195	0,101	0,160	63,3
100 - 120	1,29	0,415	0,302	0,134	0,113	0,168	0,168	100,0
120 - 140	1,28	0,417	0,303	0,139	0,183	0,120	0,164	73,1
140 - 160	1,42	0,366	0,308	0,159	0,218	0,090	0,150	60,3
160 - 180	1,30	0,408	0,312	0,147	0,170	0,141	0,165	85,7
180 - 200	1,31	0,406	0,305	0,147	0,147	0,158	0,158	100,0
200 - 220	1,32	0,404	0,342	0,195	0,275	0,067	0,147	45,3
220 - 240	1,18	0,456	0,370	0,204	0,237	0,132	0,165	80,2
240 - 260	1,16	0,462	0,388	0,218	0,258	0,129	0,169	76,3
260 - 280	1,07	0,495	0,375	0,184	0,154	0,190	0,190	100,0
280 - 300	1,17	0,458	0,382	0,209	0,250	0,132	0,173	76,2
300 - 320	1,13	0,473	0,386	0,218	0,253	0,132	0,167	79,0
320 - 340	1,20	0,446	0,385	0,231	0,270	0,115	0,154	74,9
340 - 360	1,20	0,449	0,370	0,212	0,238	0,131	0,158	83,1
360 - 380	1,29	0,412	0,352	0,203	0,281	0,072	0,149	47,9
380 - 400	1,22	0,439	0,330	0,161	0,180	0,150	0,169	88,7
400 - 420	1,26	0,425	0,307	0,133	0,165	0,142	0,174	81,4
420 - 440	1,29	0,413	0,316	0,142	0,193	0,124	0,174	71,1
440 - 460	1,38	0,379	0,298	0,140	0,200	0,098	0,158	61,8
460 - 480	1,46	0,348	0,320	0,191	0,291	0,029	0,128	22,6
480 - 500	1,34	0,393	0,294	0,137	0,172	0,122	0,157	77,7
500 - 520	1,30	0,411	0,281	0,113	0,128	0,153	0,168	91,0
520 - 540	1,39	0,376	0,288	0,134	0,190	0,098	0,155	63,5
540 - 560	1,30	0,409	0,324	0,176	0,232	0,093	0,148	62,6
560 - 580	1,26	0,424	0,300	0,137	0,183	0,117	0,163	72,0
580 - 600	1,43	0,362	0,315	0,165	0,267	0,048	0,150	32,1

Houve uma redução na percentagem da AD comparada ao IHO do ano 2010 (Soja) para 2011 (Milho) ao longo de toda a transeção avaliada (Tabela 14) o que indica que a cama de semeadura do milho apresentou uma condição estrutural inferior a do ano anterior reduzindo o conteúdo de água disponível para o crescimento das plantas. Estas reduções estão evidenciadas na Figura 25. Uma questão a ser enfatizada é o quão consistente o limite inferior do IHO foi determinado pela resistência do solo. Em nenhum ponto avaliado o solo alcançou a umidade a -1,5 MPa antes da resistência exceder 2MPa, limite escolhido como limitante para o crescimento das plantas.

Tabela 14 – Valores críticos dos conteúdos de água usados para calcular o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para cada faixa de 20 m na cama de semeadura da cultura do milho e a percentagem da água disponível (AD) que está disponível para as plantas no IHO

Comprimento (m)	Ds	θ_{PA}	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{RP}	IHO	AD	%
	Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³						
0 - 20	1,04	0,506	0,365	0,140	0,247	0,118	0,225	52,4
20 - 40	1,11	0,482	0,363	0,174	0,268	0,094	0,188	50,1
40 - 60	1,14	0,469	0,329	0,141	0,239	0,090	0,188	47,9
60 - 80	1,07	0,498	0,364	0,161	0,260	0,105	0,203	51,6
80 - 100	1,10	0,486	0,366	0,162	0,261	0,105	0,204	51,7
100 - 120	1,16	0,464	0,347	0,148	0,250	0,096	0,199	48,6
120 - 140	1,13	0,473	0,310	0,110	0,221	0,089	0,200	44,6
140 - 160	1,19	0,450	0,321	0,133	0,217	0,103	0,187	55,1
160 - 180	1,22	0,439	0,320	0,129	0,211	0,110	0,191	57,4
180 - 200	1,26	0,425	0,346	0,162	0,266	0,080	0,184	43,7
200 - 220	1,17	0,458	0,331	0,135	0,240	0,092	0,196	46,7
220 - 240	1,18	0,457	0,323	0,124	0,201	0,122	0,199	61,5
240 - 260	1,12	0,479	0,370	0,162	0,245	0,124	0,207	60,0
260 - 280	1,11	0,482	0,386	0,173	0,295	0,091	0,213	42,9
280 - 300	1,13	0,475	0,401	0,216	0,303	0,099	0,186	53,1
300 - 320	1,12	0,477	0,422	0,219	0,319	0,104	0,203	51,1
320 - 340	1,16	0,462	0,411	0,219	0,347	0,063	0,191	33,1
340 - 360	1,13	0,475	0,379	0,191	0,320	0,059	0,188	31,2
360 - 380	1,14	0,470	0,375	0,191	0,322	0,053	0,184	28,8
380 - 400	1,12	0,479	0,360	0,170	0,273	0,087	0,190	45,7
400 - 420	1,20	0,447	0,338	0,158	0,300	0,039	0,180	21,5
420 - 440	1,20	0,449	0,337	0,157	0,271	0,067	0,180	37,1
440 - 460	1,19	0,452	0,310	0,122	0,220	0,089	0,187	47,7
460 - 480	1,28	0,416	0,304	0,126	0,224	0,079	0,178	44,6
480 - 500	1,22	0,440	0,310	0,124	0,226	0,084	0,186	45,1
500 - 520	1,24	0,433	0,299	0,113	0,206	0,092	0,185	49,8
520 - 540	1,21	0,446	0,300	0,120	0,191	0,109	0,180	60,4
540 - 560	1,32	0,402	0,286	0,119	0,244	0,042	0,167	25,4
560 - 580	1,28	0,419	0,288	0,110	0,238	0,050	0,178	28,2
580 - 600	1,00	0,521	0,337	0,133	0,211	0,127	0,205	61,9

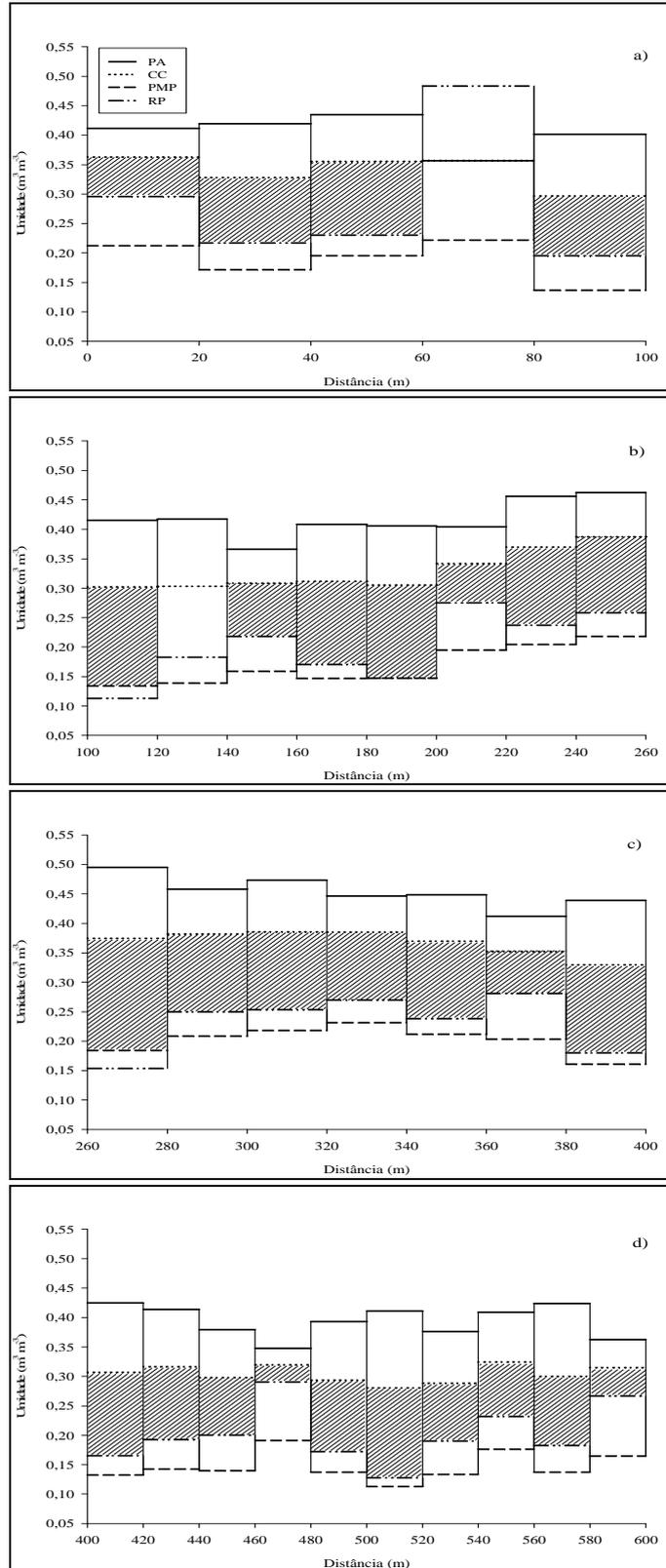


Figura 24 – Umidade do solo, na cama de sementeira da cultura da soja, para cada faixa da transeção correspondentes as classes texturais franco argilosa (a, c) e franco argilo arenosa (b, d). A área hachurada corresponde à faixa de umidade disponível as plantas (IHO)

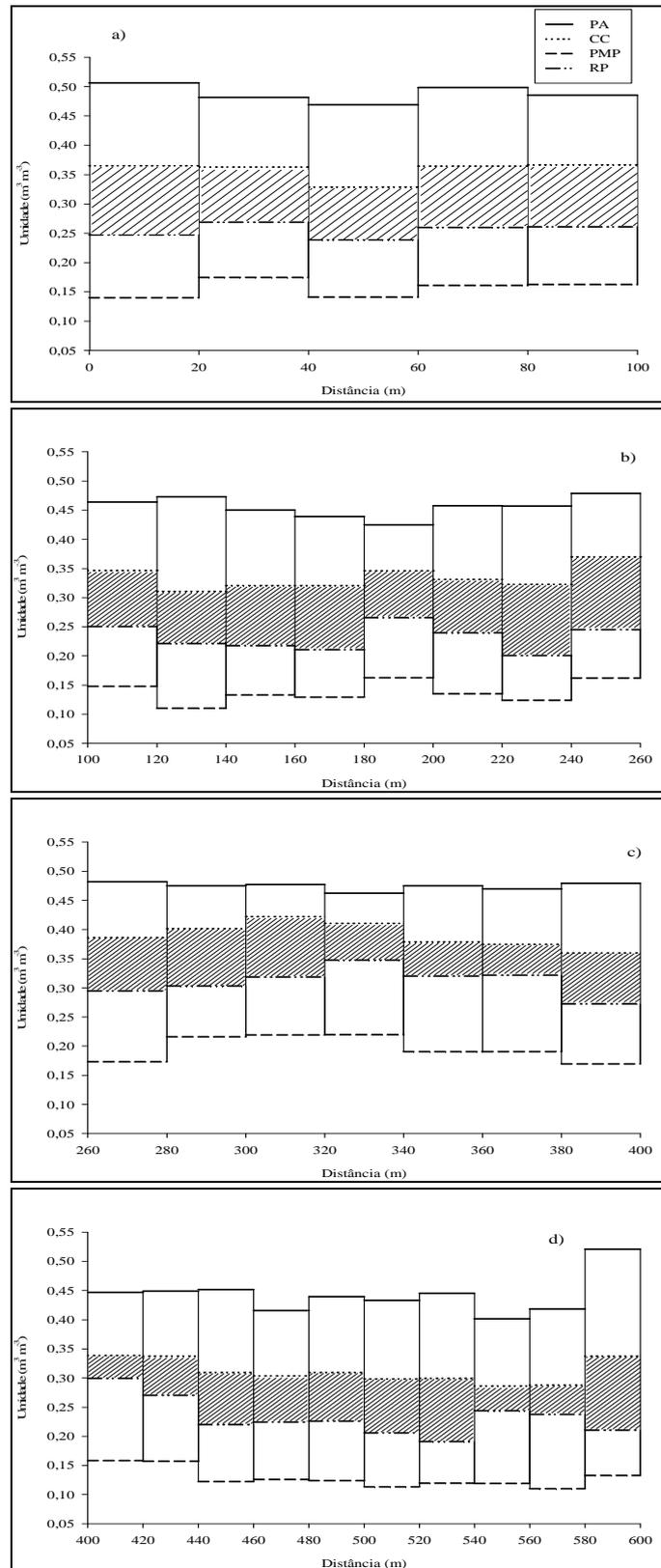


Figura 25 – Umidade do solo, na cama de sementeira da cultura do milho, para cada faixa da transeção correspondentes as classes texturais franco argilosa (a, c) e franco argilo arenosa (b, d). A área hachurada corresponde à faixa de umidade disponível as plantas (IHO)

Os valores de IHO obtidos não apresentaram nenhuma tendência geral de aumento ou diminuição com o conteúdo de argila. O limite inferior definido pela resistência na maioria dos pontos, nos dois anos de avaliação salienta que o aumento da RP durante a secagem do solo resultou em uma larga redução no IHO comparado com a AD.

O IHO é uma faixa de conteúdo de água onde as condições de umidade são favoráveis para o crescimento radicular e absorção de água. O início das limitações é gradual e os efeitos podem ser manifestados por reduções progressivas no crescimento das plantas. Assim a extração de água abaixo do IHO é possível sem invalidar o conceito (TOPP et al., 1994).

A variação do IHO e da AD vai depender das características do solo. A correlação dos dois com os atributos físicos determinados está apresentada na Tabela 15. As diferenças estruturais do solo na cama de semeadura por ocasião do cultivo da soja e do milho resultaram em correlações divergentes tanto do IHO como da AD de um ano para outro. Na cama de semeadura da cultura da soja ambos apresentaram correlação somente com a Ds e com a ka. Essa correlação com a ka não foi observada no ano seguinte. Porém, para a Ds a correlação permaneceu significativa com a AD que também apresentou correlação com o conteúdo de argila assim como com o CO. A Ds foi a propriedade do solo mais fortemente correlacionada tanto com o IHO quanto com a AD, principalmente no primeiro ano. Isto se deve pelo fato da Ds, dentre os atributos avaliados, ser aquele mais relacionado com as mudanças na estrutura do solo.

Tabela 15 – Matriz de correlação para o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Água Disponível (AD) com os demais atributos do solo

	Areia	Argila	Silte	Arg+Silte	CO	Ds	θ	RP	ka
SOJA (2010)									
IHO	-0,102ns	0,0378ns	0,344ns	0,096ns	0,123ns	-0,682**	0,019ns	-0,318ns	0,731**
AD	-0,211ns	0,153ns	0,401ns	0,208ns	0,210ns	-0,732**	0,076ns	-0,206ns	0,649**
MILHO (2011)									
IHO	0,043ns	-0,027ns	-0,106ns	-0,0434	0,123ns	-0,279ns	0,051ns	0,152ns	0,110ns
AD	-0,361ns	0,371*	0,185ns	0,361	0,503*	-0,834**	0,066ns	0,166ns	-0,027ns

*significativo a $p < 0,05$; ** significativo a $p < 0,001$; ns não significativo

CO – Carbono orgânico; Ds – Densidade do solo; θ – Umidade volumétrica; RP – resistência à penetração; ka – permeabilidade do solo ao ar.

A relação do IHO e da AD com a estrutura do solo, representada aqui pela Ds, pode ser observada na Figura 26 e os parâmetros desta relação estão apresentados na Tabela 16. Observa-se pela Figura 26 a maior dependência do IHO com relação à estrutura do solo, o que se verifica pelo maior coeficiente angular da equação (Tabela 16), evidenciando que a Ds tem um maior efeito no IHO do que na AD. A Ds foi responsável por 51% da variação dos dados de IHO e 56 % da variância da AD.

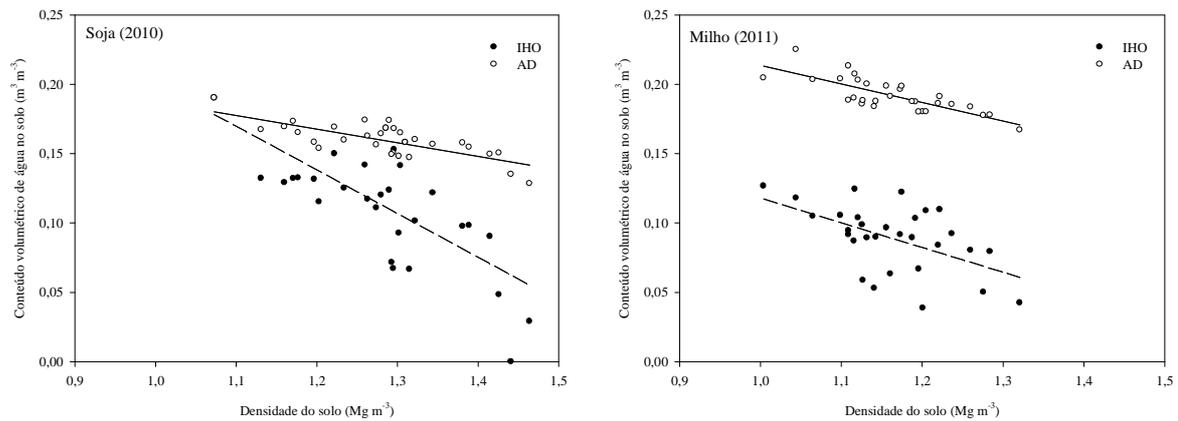


Figura 26 – Relação entre o conteúdo de água no solo disponível para as plantas (IHO e AD) avaliados em uma cama de semeadura da cultura da soja (2010) e do milho (2011)

Os parâmetros estimados foram altamente significativos ($p < 0,05$) valendo afirmar com 95% de probabilidade de evidência, de que a D_s tem efeito sobre o IHO e AD e, como salientado anteriormente, tal efeito foi mais pronunciado no primeiro ano de avaliação. Pelas condições estruturais avaliadas na cama de semeadura da soja espera-se uma redução de $0,314 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no IHO com o aumento em uma unidade da D_s enquanto que para a AD essa redução seria de apenas $0,098 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No entanto, esse efeito não foi identificado no ano subsequente, na cama de semeadura da cultura do milho, onde a expectativa de redução do IHO e da AD com o aumento da D_s é de $0,179$ e $0,133 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 16 – Parâmetros da regressão do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e Água Disponível (AD) versus a densidade do solo (D_s), obtidos pela equação: $IHO/AD = a + bD_s$

Variável	Parâmetro estimado	Erro padrão	t	$P > t $	Parâmetro estimado	Erro padrão	t	$P > t $
	IHO				AD			
	SOJA (2010)							
Intercepto(a)	0,515	0,076	6,82	<0,0001	0,285	0,021	13,48	<0,0001
D_s (b)	-0,314	0,059	-5,35	<0,0001	-0,098	0,016	-5,96	<0,0001
	F = 28,64; P > F = <0,0001; $R^2 = 0,51$				F = 35,53; P > F = <0,0001; $R^2 = 0,56$			
	MILHO (2011)							
Intercepto(a)	0,297	0,061	4,85	<0,0001	0,347	0,023	15,02	<0,0001
D_s (b)	-0,179	0,053	-3,41	0,002	-0,133	0,020	-6,73	<0,0001
	F = 11,64; P > F = 0,002; $R^2 = 0,29$				F = 45,23; P > F = <0,0001; $R^2 = 0,62$			

2.3.8 Relações entre os parâmetros de emergência das culturas e os atributos do solo

As relações entre as propriedades do solo e os parâmetros de emergência, altura da parte aérea das plântulas, comprimento radicular e massa da parte aérea e das raízes, foram primeiramente avaliadas por uma matriz de correlação linear (coeficiente de correlação de Pearson, r) cujo resultado está apresentado na Tabela 17. Os dados de massa da parte aérea e

das raízes das plântulas de milho não foram incluídos na tabela por apresentarem valores ínfimos e praticamente não mensuráveis.

Os parâmetros de emergência, avaliados em campo, nos dois anos de pesquisa não apresentaram uma correlação significativa com nenhuma das propriedades do solo determinadas. Mesmo a tendência de relação positiva ou negativa com cada propriedade não foi mantida de um ano para outro. As baixas correlações eram presumidas vista a ausência de qualquer relação entre a emergência e essas propriedades quando plotadas em um gráfico de dispersão. Exemplo desta falta de correlação pode ser observado na Figura 27, que mostra a dispersão dos dados de emergência sem qualquer relação tendencial com algumas propriedades do solo.

No entanto, as características físicas das plântulas, como altura da parte aérea, comprimento do sistema radicular e massa da planta foram mais sensíveis às propriedades do solo, principalmente para a cultura da soja. A altura da parte aérea das plântulas de soja foi negativamente correlacionada com a densidade do solo, ou seja, quanto maior a densidade menor a altura, e positivamente correlacionada com a permeabilidade do solo ao ar (k_a), com o IHO e água disponível (AD), aumentando com o aumento dessas propriedades. Com relação ao alongamento das raízes, avaliado pela medição do comprimento total do sistema radicular das plântulas, este também foi negativamente correlacionado com a densidade do solo e positivamente com a umidade. Estas relações inferem na influência da estrutura do solo, representada principalmente pela densidade, e do adequado conteúdo de água para o crescimento das plantas já nas primeiras fases do seu desenvolvimento.

A massa seca da parte aérea das plântulas de soja não apresentou correlação com as propriedades físicas do solo, porém a massa seca das raízes foi correlacionada com metade dos atributos avaliados, sobretudo com a textura do solo. Houve uma correlação positiva com o conteúdo de areia e negativa com as partículas mais finas (silte e argila). A massa seca das raízes também apresentou uma correlação negativa com a resistência à penetração e o conteúdo de carbono orgânico (CO). Esta última correlação foi inesperada, porém, esse efeito possivelmente se deve devido ao fato de que os pontos que apresentaram maior conteúdo de CO também continham o maior volume de palhada, o que pode atrasar o crescimento inicial das plântulas, portanto, por ocasião da coleta as plântulas desses locais poderiam ser menos desenvolvidas. Já a correlação negativa com os demais atributos pode estar relacionado com o possível efeito fisiológico nas plantas devido a condições de estresse. Por exemplo, o aumento da RP do solo causa um espessamento das raízes, resultante da maior multiplicação do tecido celular para compensar o efeito adverso do meio (BENGOUGH, et al., 2006). Os locais com

textura mais fina, também podem causar esse comportamento pois, a medida que reduz a umidade de um solo com maior conteúdo de argila também aumenta a sua resistência. Como observado, o comprimento das raízes apresentou uma correlação negativa com a densidade do solo, no entanto, a relação com a massa seca foi positiva, apesar de não significativa. Esses resultados salientam o efeito do aumento da densidade, pois a fisiologia da planta tende a aumentar o seu metabolismo originando raízes mais longas e mais densas.

Com relação à altura e comprimento das plântulas de milho, somente a altura da parte aérea foi positivamente correlacionada com a umidade média do solo determinada em campo.

Tabela 17 – Matriz de correlação¹ para os parâmetros de emergência, altura da planta, comprimento das raízes e massa seca com atributos do solo

Parâmetro	Areia	Silte	Argila	Arg+Silt	CO	Ds	θ	RP	ka	IHO	AD
SOJA (2010)											
Emerg	-0,208	0,075	0,217	0,207	0,122	-0,046	-0,017	-0,268	-0,012	-0,031	-0,036
IVE	0,085	0,023	-0,110	-0,093	-0,130	-0,191	-0,032	-0,163	0,060	0,249	-0,165
TE	-0,034	-0,038	0,037	0,026	-0,057	-0,135	-0,044	-0,345	0,141	0,178	-0,110
APA	-0,125	0,049	0,424	0,121	-0,024	-0,686**	0,178	-0,088	0,551*	0,546*	0,612**
CR	-0,207	0,180	0,248	0,205	0,080	-0,395*	0,531*	-0,052	0,068	0,187	0,092
MPA	0,249	-0,248	-0,172	-0,250	-0,239	-0,054	0,049	-0,017	-0,198	0,083	0,044
MR	0,546*	-0,530*	-0,501*	-0,560*	-0,490*	0,306	-0,295	-0,426*	-0,047	-0,001	0,062
MILHO (2011)											
Emerg	0,181	-0,142	-0,309	-0,181	-0,008	0,106	0,093	0,016	0,203	-0,338	-0,104
IVE	0,031	-0,012	-0,113	-0,031	0,129	0,116	0,242	0,005	0,139	-0,300	-0,081
TE	0,076	-0,059	-0,129	-0,076	0,064	0,047	0,129	0,013	0,094	-0,311	-0,006
APA	0,084	-0,105	0,044	-0,084	0,040	0,287	0,394*	0,075	0,209	0,182	-0,212
CR	0,256	-0,287	-0,020	-0,256	0,017	-0,154	0,115	0,320	-0,132	0,244	0,316

⁽¹⁾ valores sem indicação não são significativos a $P < 0,05$

*significativo a $P \leq 0,05$; **significativo a $P \leq 0,001$

Emerg: emergência (plantas m^{-1}); IVE: índice de velocidade de emergência; TE: taxa de emergência (%); CO: carbono orgânico ($g\ kg^{-1}$); Ds: densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); θ : umidade do solo ($m^3\ m^{-3}$); RP: resistência à penetração (MPa); ka: permeabilidade do solo ao ar (μm^2); IHO: intervalo hídrico ótimo ($m^3\ m^{-3}$); AD: água disponível ($m^3\ m^{-3}$)

Apesar da não correlação dos parâmetros de emergência com as propriedades do solo, análises adicionais foram executadas a fim de asseverar estes resultados e também avaliar as propriedades mais influentes no grupo das correlações significativas. Para tanto, o procedimento adotado foi a regressão *Stepwise*. Diferente de uma regressão múltipla, onde todas as variáveis independentes entram na equação final do modelo, a regressão *Stepwise* objetiva encontrar a melhor combinação de variáveis explicativas para prever a variável resposta, ou dependente. Nesta técnica, nem todas as variáveis independentes irão fazer parte da equação final do modelo de regressão.

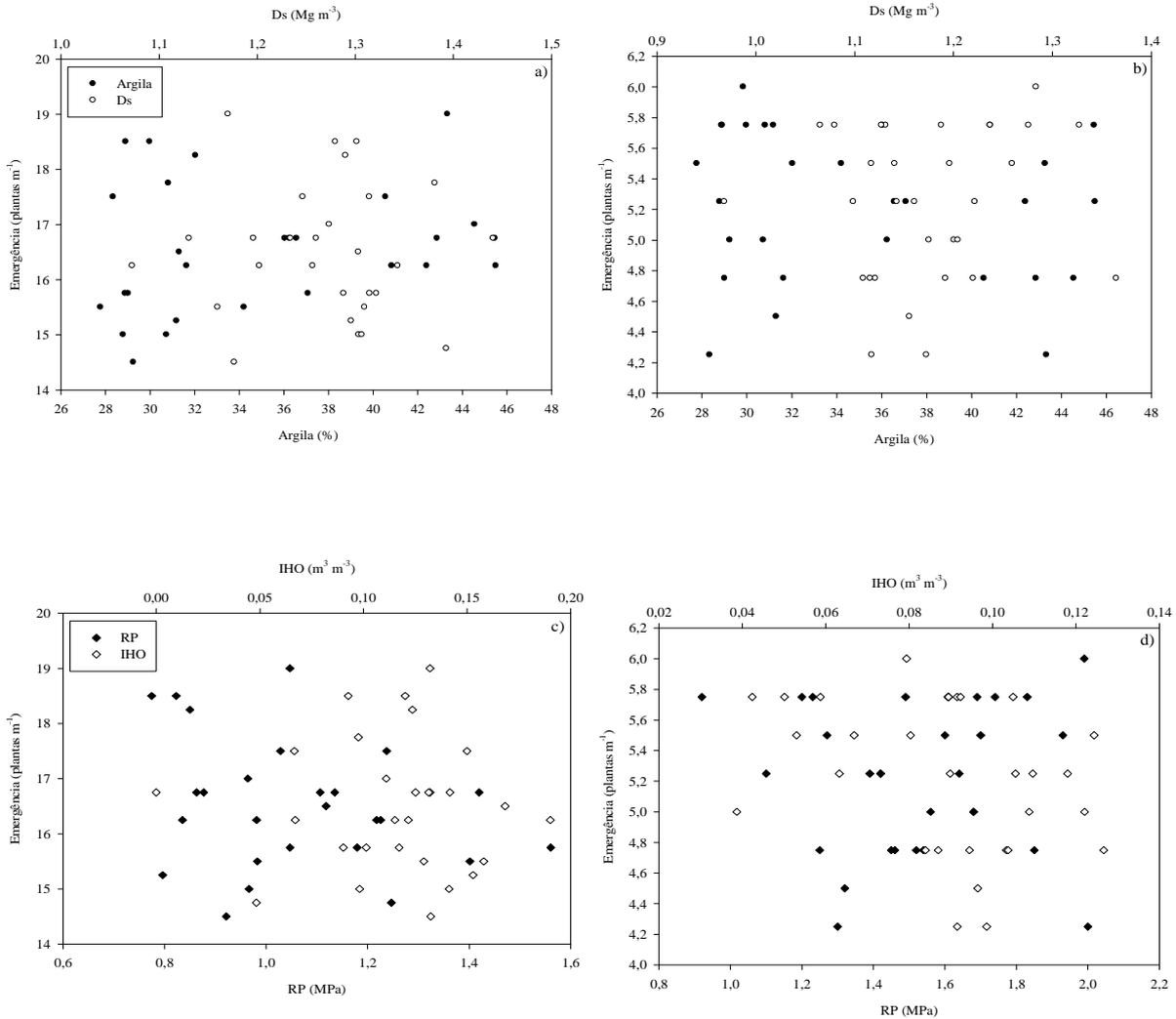


Figura 27 – Exemplos da dispersão dos dados de emergência das plantas de soja (a, c) e milho (b, d) em relação a algumas propriedades do solo (% argila, densidade do solo, Intervalo Hídrico Ótimo e resistência à penetração)

Na regressão *Stepwise* as variáveis preditoras, representadas aqui pelas propriedades do solo, são introduzidas na equação de regressão, uma de cada vez com base em critérios estatísticos. A cada passo da análise, a propriedade que mais contribui para a equação de predição da variável dependente, em termos de aumentar a correlação múltipla, será primeiramente introduzida no modelo. O processo de inclusão de novas propriedades continuará somente se as demais acrescentaram uma significância estatística na equação final. Quando nenhuma das propriedades remanescentes adicionarem alguma relevância estatisticamente significativa para a equação, a análise é então finalizada. Assim, nem todas as possíveis variáveis explicativas podem entrar na equação que melhor prediz a variável resposta.

Após a seleção das propriedades do solo mais importantes através do procedimento acima, análises subsequentes de regressões múltiplas foram realizadas a fim de identificar a

grandeza da relação entre os parâmetros de emergência e características das plântulas com estas propriedades bem como avaliar o quanto cada uma delas contribui para esta relação.

As propriedades do solo, selecionadas pela regressão *Stepwise*, mais importantes para explicar a variação nos parâmetros das plântulas de soja estão listadas na Tabela 18. Para os dados de emergência e massa seca da parte aérea e das raízes nenhuma propriedade foi encontrada ao nível de 0,15 de significância (limite estabelecido) para entrada no modelo. Cada parâmetro da planta foi relacionado por meio de regressão com as respectivas propriedades selecionadas e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 19.

Tabela 18 – Resultado da regressão *Stepwise* para os parâmetros de emergência e da planta da soja

Passo	Variável entrada	Variável removida	Nº var inclusas	R ² Parcial	R ² Modelo	C(p)	F	Pr > F
Altura da parte aérea (mm)								
1	Ds		1	0,4426	0,4426	3,1004	19,85	0,0002
2	CO		2	0,128	0,5706	-0,8941	7,16	0,0132
Comprimento da raíz (mm)								
1	θ		1	0,2931	0,2931	8,0277	10,37	0,0035
2	RP		2	0,1562	0,4493	3,1731	6,81	0,0154
Índice de velocidade de emergência (IVE)								
1	AD		1	0,1037	0,1037	-3,2551	2,89	0,1014
Taxa de emergência (%)								
1	RP		1	0,1013	0,1013	-5,3252	2,7	0,1131

Ds: densidade do solo; CO: carbono orgânico; θ: umidade do solo; RP: resistência à penetração; AD: água disponível.

Os parâmetros estimados para os modelos referentes aos parâmetros de emergência, IVE e TE, não foram significativos ($p > 0,05$) e apresentaram um baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,12$). As propriedades mais influentes na altura da parte aérea das plântulas de soja (Ds e CO) e comprimento das raízes (θ e RP) foram responsáveis por 61 e 40% da variação dos dados, respectivamente.

Os valores de intercepto representam o valor de cada parâmetro quando todas as outras variáveis forem nulas. Os parâmetros estimados para as propriedades relacionadas com o conteúdo de água no solo (θ e AD) apresentaram coeficientes positivos, indicando que o aumento em uma unidade dessas propriedades aumentará consideravelmente o comprimento das raízes e proporcionará maiores IVE, mantendo todas as outras variáveis constantes. Já para cada aumento em de unidade da Ds, CO e RP reduzirá a altura da parte aérea e comprimento das raízes das plântulas de soja assim como resultará em uma diminuição na taxa de emergência.

Tabela 19 – Resultados dos modelos de regressão para as características das plântulas e parâmetros de emergência da cultura da soja com os atributos do solo selecionados pela regressão *Stepwise*

Variável	Parâmetros estimados	Erro padrão	t	Pr > t
Altura da parte aérea (mm)				
Intercepto	295,449	32,333	9,140	<,0001
Ds	-140,067	21,380	-6,550	<,0001
CO	-1,324	0,419	-3,160	0,004
F = 21,48; P > t 0,0001; R ² = 0,61; N = 30				
Comprimento das raízes (mm)				
Intercepto	26,278	11,411	2,300	0,030
θ	296,076	72,703	4,070	0,0002
RP	-13,747	6,404	-2,150	0,042
F = 8,35; P > t 0,0017; R ² = 0,40; N = 30				
Índice de velocidade de emergência				
Intercepto	5,921	3,038	1,950	0,061
AD	36,346	19,004	1,910	0,066
F = 3,66; P > t 0,0661; R ² = 0,12; N = 30				
Taxa de emergência (%)				
Intercepto	98,944	7,204	13,730	<,0001
RP	-12,221	6,640	-1,840	0,0776
F = 3,39; P > t 0,0776; R ² = 0,12; N = 30				

A partir dos resultados das análises de regressão, as equações para melhor predição da altura da parte aérea (APA, mm), comprimento das raízes (CR, mm), índice de velocidade de emergência (IVE) e taxa de emergência (TE, %) das plântulas da cultura da soja são:

$$APA = 295,45 - 140,01Ds - 1,324CO$$

$$CR = 26,28 + 296,08\theta - 13,747RP$$

$$IVE = 5,921 + 36,35AD$$

$$TE = 98,94 - 12,22RP$$

Para o conjunto de dados de características das plantas e parâmetros de emergência da cultura do milho, a regressão *Stepwise* selecionou um maior número de propriedades físicas do solo como responsáveis pela variação dos dados resultando em modelos com até quatro variáveis explicativas (Tabela 20).

O IHO foi selecionado como a única propriedade com maior potencial de explicação para a variação dos dados de IVE e TE. Porém, esse índice de qualidade do solo foi responsável por somente 9% da variação desses dois parâmetros de emergência e por cerca de 12% da variação na emergência das plantas (Tabela 21). A combinação linear da umidade média do solo (θ), ka, RP e AD foi responsável por 45% da variância na altura da parte aérea das plântulas de milho enquanto que o conteúdo de argila (Arg), AD e ka responderam por

cerca de 35 % da variação dos dados de comprimento de raízes. As equações que melhor estimam os parâmetros listados na Tabela 21 são:

$$APA = 55,86 + 591,04\theta + 33,4ka + 19,37RP - 410,6AD$$

$$CR = -4,991 - 1,952Arg + 964,77AD - 22,4ka$$

$$Emerg = 5,77 - 7,1 IHO + 0,004CO$$

$$IVE = 3,47 - 4,14IHO$$

$$TE = 97,7 - 83,33IHO$$

Tabela 20 – Resultado da regressão *Stepwise* para os parâmetros de emergência e da planta de milho

Passo	Variável entrada	Variável removida	Nº var inclusas	R ² Parcial	R ² Modelo	C(p)	F	Pr > F
Altura da parte aérea (mm)								
1	θ		1	0,137	0,137	14,198	4,300	0,048
2	ka		2	0,177	0,314	8,157	6,710	0,016
3	RP		3	0,057	0,371	7,580	2,250	0,146
4	AD		4	0,080	0,451	5,969	3,470	0,075
Comprimento da raiz (mm)								
1	IHO		1	0,122	0,122	2,620	3,740	0,064
2	Arg		2	0,077	0,199	2,206	2,490	0,127
3	AD		3	0,091	0,289	1,351	3,190	0,086
4		IHO	2	0,000	0,289	-0,637	0,010	0,909
5	ka		3	0,059	0,348	-0,495	2,270	0,145
Emergência (plantas m ⁻¹)								
1	Silt		1	0,095	0,095	6,928	2,840	0,103
2	IHO		2	0,113	0,208	4,942	3,710	0,065
3	CO		3	0,120	0,328	2,708	4,460	0,045
Índice de velocidade de emergência (IVE)								
1	IHO		1	0,097	0,097	5,273	2,910	0,100
Taxa de emergência (%)								
1	IHO		1	0,085	0,085	1,284	2,500	0,126

O fato das propriedades físicas selecionadas nos dois anos de avaliação não corresponderem resulta principalmente de dois fatores, das diferenças nas exigências das diferentes culturas para a germinação e desenvolvimento das plântulas, e na alteração da estrutura da cama de semeadura de um ano de cultivo para outro. Esse último foi comprovado principalmente pela redução do IHO.

Tabela 21 – Resultados dos modelos de regressão para as características das plântulas e parâmetros de emergência da cultura do milho com os atributos do solo selecionados pela regressão *Stepwise*

Variável	Parâmetros estimados	Erro padrão	t	Pr > t
Altura da parte aérea (mm)				
Intercepto	55,855	56,968	0,980	0,337
θ	591,037	161,533	3,660	0,001
ka*	33,391	11,053	3,020	0,006
RP	19,373	10,319	1,880	0,073
AD	-410,574	220,386	-1,860	0,075
F = 4,92; P < 0,0048; R ² = 0,4506; N = 30				
Comprimento das raízes (mm)				
Intercepto	-4,991	61,616	-0,080	0,936
Arg	-1,952	0,672	-2,900	0,008
AD	964,767	336,214	2,870	0,008
ka*	-22,381	14,868	-1,510	0,145
F = 4,45; P < 0,0123; R ² = 0,348; N = 30				
Emergência (plantas m ⁻¹)				
Intercepto	5,77016	0,53166	10,85	<0,0001
IHO	-7,09771	3,78431	-1,88	0,0716
CO	0,00398	0,021	0,19	0,851
F = 1,76; P < 0,1913; R ² = 0,1153; N = 30				
Índice de velocidade de emergência				
Intercepto	3,47541	0,22822	15,23	<0,0001
IHO	-4,14059	4,48725	-1,66	0,1071
F = 2,77; P < 0,1071; R ² = 0,09; N = 30				
Taxa de emergência (%)				
Intercepto	97,70021	4,42015	22,1	<,0001
IHO	-83,3345	48,17314	-1,73	0,0947
F = 2,99; P < 0,0947; R ² = 0,0966; N = 30				

* logka

2.3.9 Tomografia Computadorizada

As imagens obtidas por μ TC de Raio-X permitiram a clara visualização, em 3-D, dos efeitos do déficit hídrico, compactação do solo e reduzida temperatura no crescimento inicial das plântulas de milho (Figuras 29, 31 e 33). No entanto, como pode ser notado nas imagens, o sistema radicular não foi segmentado em sua totalidade. Apesar da técnica não destrutiva de μ TC de Raio-X ser, atualmente, um método bem estabelecido para a caracterização e avaliação em 3-D de diferentes materiais, incluindo o solo e materiais orgânicos, como as raízes, a otimização do método é bastante dependente de certos fatores dentre eles o tamanho da amostra. Visto que a resolução da imagem é afetada, principalmente pelo tamanho do ponto focal do tubo de Raio-X, uma condição para a obtenção de uma reconstrução adequada é a de que a altura total da amostra permaneça dentro do campo de visão e, para alcançar esta melhor resolução nas condições deste trabalho, a altura da amostra foi limitada a apenas metade da sua altura devido às restrições no interior da câmara do tomógrafo.

A maior parte do sistema radicular extraído das imagens foi representado pelas raízes primárias e seminais, com poucas raízes laterais. Esta limitação para a observação das raízes laterais, com menor diâmetro, é uma função da resolução e qualidade da imagem (KAESTNER et al., 2006). Apesar das raízes segmentadas das imagens terem subestimado o volume do sistema radicular, os resultados mostraram a mesma resposta às condições adversas do solo quando avaliadas pelo método destrutivo utilizando o WinRHIZO® (Figuras 28, 30 e 32).

Nos três experimentos realizados os tratamentos impostos tiveram efeito significativo no crescimento radicular das plântulas de milho assim como a textura do solo.

Para o tratamento com diferentes conteúdos de água no solo, os resultados para as características do sistema radicular obtidas pelos programas VGStudioMAX e WinRHIZO® apresentaram efeito principal significativo tanto para solo como para tratamento ($p < 0,05$), todos com alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,80$). A interação entre solo e tratamento para todas as variáveis não foi significativa (Tabela 22).

Tabela 22 – Valores de P para as características morfológicas das raízes e coeficiente de determinação (R^2) para a análise de variância

Variável	Déficit hídrico				Compactação				Temperatura			
	S	T	S x T	R^2	S	T	S x T	R^2	S	T	S x T	R^2
Comp.	0,002	<,0001	0,329	0,86	0,140	<,0001	0,364	0,94	0,545	<,0001	0,605	0,88
Diâmetro	0,004	<,0001	0,227	0,84	0,0002	<,0001	0,003	0,86	0,613	<,0001	0,613	0,83
Volume ¹	<,0001	0,0007	0,325	0,82	0,033	0,008	0,044	0,63	0,341	<,0001	0,668	0,78
Área sup. ¹	<,0001	<,0001	0,469	0,84	0,546	<,0001	0,129	0,86	0,054	<,0001	0,091	0,92
Volume ²	0,002	<,0001	0,314	0,87	0,581	0,002	0,086	0,61	0,002	<,0001	0,124	0,88
Área sup. ²	<,0001	<,0001	0,482	0,87	0,287	0,010	0,848	0,50	0,003	<,0001	0,127	0,97

Comp.: comprimento; Área sup.: área superficial. S: solo; T: tratamento; S x T: interação solo x tratamento.

¹ determinado pelo WinRHIZO®

² determinado pelo VGStudio MAX

Após 6 dias, o comprimento total das raízes foi maior no solo areia franca (438,74 cm) do que no franco argiloso (318,23 cm). Com relação aos tratamentos a maior redução no comprimento das raízes foi observada quando nenhuma água foi adicionada durante o período (SAA) onde o comprimento total foi de apenas 188,06 cm comparado com 610,12 cm no tratamento CC e 321,01 cm no CC_{30%} (Figura 28). A redução entre os solos foi de aproximadamente 27,5% enquanto que para os tratamentos foi mais considerável, cerca de 70% entre CC e SAA.

Apesar dos dois solos apresentarem médias similares com relação ao diâmetro médio das raízes, 0,55 e 0,49 mm para o areia franca e franco argiloso, respectivamente, a diferença foi significativa ($p < 0,05$). Quanto aos tratamentos, as raízes das amostras mantidas na

capacidade de campo (CC) apresentaram menor diâmetro médio, porém a diferença entre $CC_{30\%}$ e SAA não foi significativa.

Nota-se, na Figura 28, que o solo mais arenoso (areia franca) também exibiu maior área superficial e volume das raízes. A área superficial foi 1,7 vezes maior neste solo ($72,9 \text{ cm}^2$) do que no franco argiloso ($43,3 \text{ cm}^2$), enquanto que o volume foi quase 2 vezes superior ($0,98$ e $0,49 \text{ cm}^3$). A área superficial foi notavelmente reduzida quando não houve adição de água durante o período de 6 dias (35 cm^2) comparado com o $CC_{30\%}$ ($58,2 \text{ cm}^2$) e CC (80 cm^2). O primeiro (SAA) também reduziu consideravelmente o volume de raízes ($0,53 \text{ cm}^3$), enquanto que a manutenção de apenas 30% da umidade da capacidade de campo ($CC_{30\%}$) não afetou significativamente o volume do sistema radicular ($0,84 \text{ cm}^3$) em relação ao tratamento mantido na CC ($0,85 \text{ cm}^3$). A redução do volume de raízes quando não houve adição de água por um período de seis dias se deve, provavelmente, não somente ao déficit hídrico, mas também ao aumento da resistência com o secamento do solo.

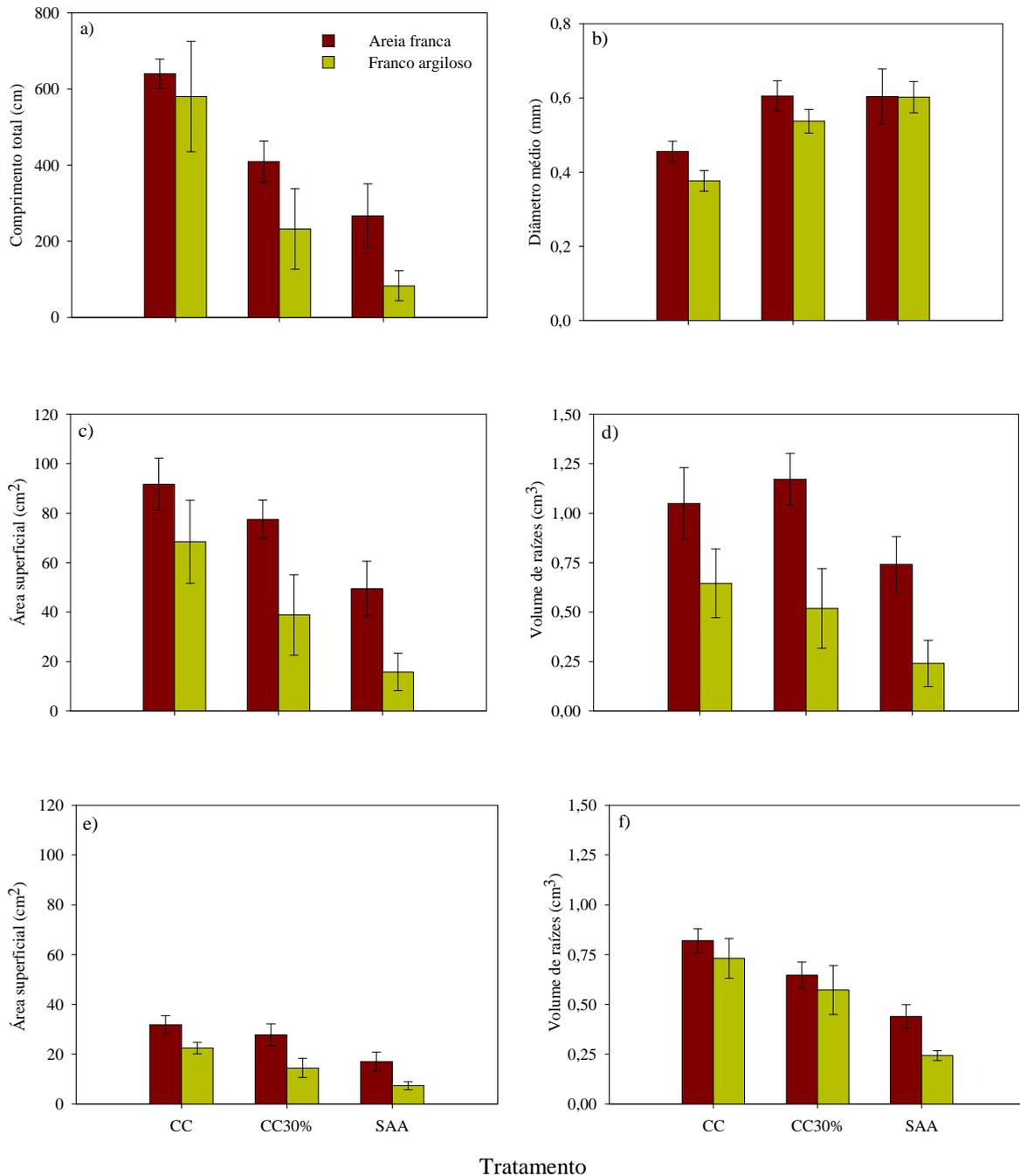


Figura 28 – Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de conteúdo de água e tipo de solo. As barras representam o erro médio padrão da média

Como mostrado na Tabela 22, a análise das características do sistema radicular utilizando μ CT mostrou o mesmo efeito principal para solo e tratamento e não apresentou efeito interativo entre eles. O solo areia franca exibiu um sistema radicular com área superficial (25,5 cm²) e volume (0,635m³) significativamente maiores em relação ao solo franco argiloso (15,4 cm² e 0,539 cm³). Para os tratamentos tanto para a área superficial

quanto para o volume de raízes a sequência foi $CC > CC_{30\%} > SAA$ (Figura 28). O efeito da manutenção do conteúdo de água adequado no melhor desenvolvimento radicular pode ser visualizado na Figura 29.

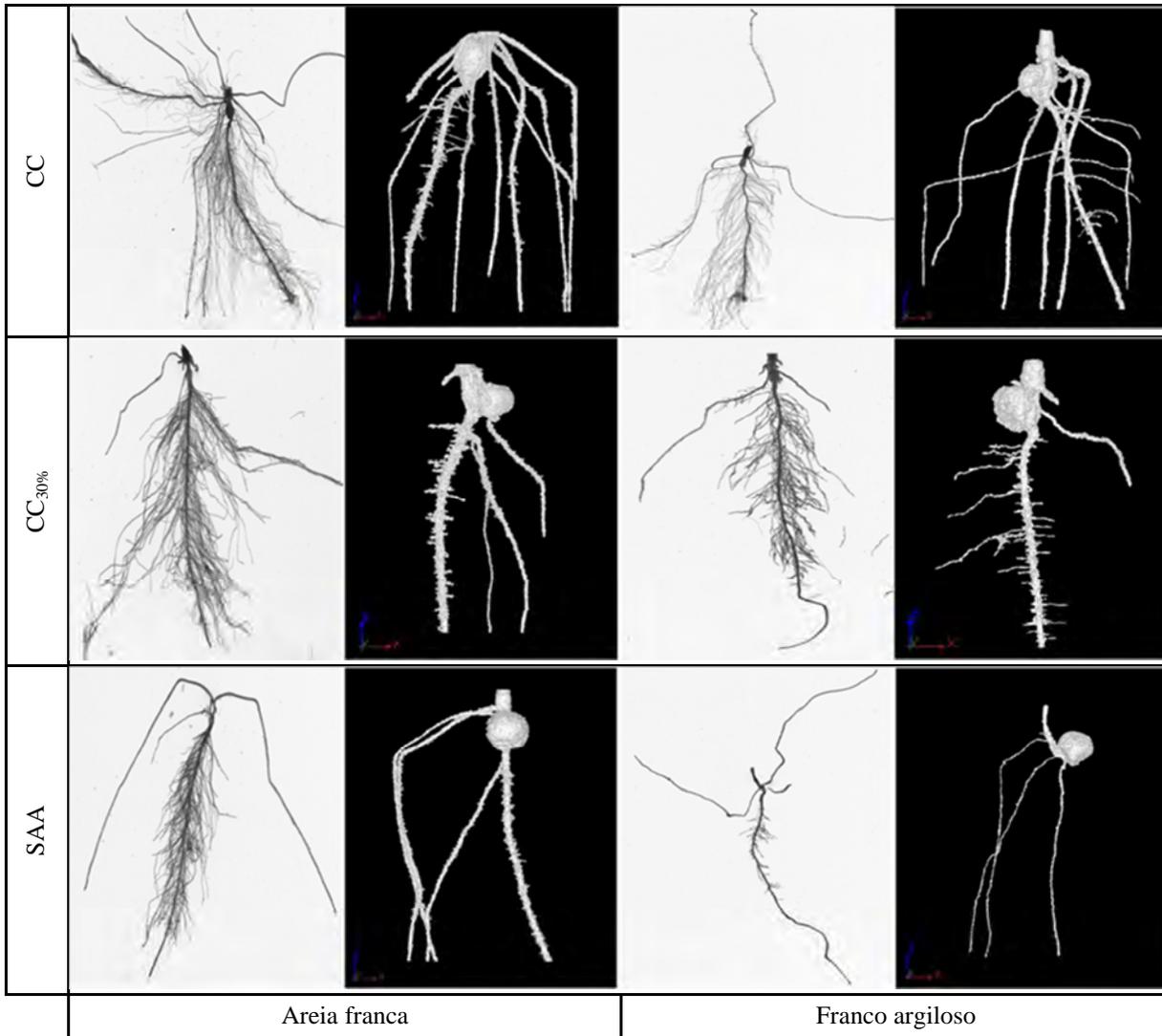


Figura 29 – Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, mantidas a três conteúdos de água no solo. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas

Estes resultados atestam que a insuficiência de um adequado conteúdo de água no solo, durante as fases iniciais de crescimento das plantas, germinação e emergência podem, significativamente, afetar seu estabelecimento. Se tais condições persistirem, o crescimento das plantas pode ser retardado ou até mesmo cessado, afetando a produção. Çakir (2004) observou que o crescimento vegetativo do milho foi fortemente afetado pelo déficit hídrico em diferentes estágios fenológicos e que, durante a fase de rápido crescimento essa condição reduziu a altura das plantas. Achakzai (2009), avaliando o efeito do potencial mátrico em seis

cultivares de milho também constataram que a redução do conteúdo de água causou um decréscimo na imbibição, germinação e crescimento das plântulas para todas as cultivares.

O aumento da densidade do solo resultou em uma interação significativa para solo e tratamento com relação ao diâmetro médio ($F=13,38$, $p=0,003$) e volume das raízes ($F=5,04$, $p=0,04$) quando determinados pelo WinRHIZO[®] (Tabela 22). O desdobramento destas interações revelou efeito simples para tratamento para o diâmetro médio das raízes no solo de textura areia franca ($F=51,73$, $p<0,05$). As amostras com alta densidade apresentaram raízes com maior diâmetro médio (1,12 mm) que a baixa densidade (0,83 mm). O mesmo foi observado no solo franco argiloso onde os diâmetros corresponderam a 0,92 e 0,79 mm para a alta e baixa densidade, respectivamente (Figura 30). Para o volume somente no solo mais argiloso (franco argiloso) houve diferença entre os tratamentos onde as amostras não compactadas, com menor densidade, apresentaram volume de raízes significativamente maior ($1,98 \text{ cm}^3$) que as amostras com alta densidade ($1,38 \text{ cm}^3$). O efeito simples para tratamento no solo de textura areia franca não foi significativo. O volume de raízes determinado a partir das imagens segmentadas não revelou efeito para o tipo de solo, porém, foi maior nas amostras com maior densidade do solo ($0,56$ e $0,45 \text{ cm}^3$). Exemplos das raízes extraídas das imagens obtidas neste tratamento podem ser visualizados na Figura 31.

Para as demais características avaliadas tanto por este método quanto pela μCT esta interação não foi observada e houve efeito principal somente para tratamento (Tabela 22). A alta densidade do solo reduziu o comprimento total das raízes em cerca de 50% (385,76 para 199,78 cm). A área superficial, avaliada pelos dois métodos, também foi reduzida com o aumento da densidade do solo (Figura 30).

Tanto o déficit hídrico como o aumento da densidade do solo possivelmente resultaram em aumento da resistência do solo o que induziu o espessamento do diâmetro médio das raízes. Uma explicação pode ser o fato de que a resposta inicial das raízes em solos compactados se dá pelo aumento do diâmetro radial (BENGOUGH et al., 2006), resultando em raízes mais curtas e espessas. Materechera, Dexter e Alston (1991), avaliando vinte e duas espécies de plantas, concluíram que o diâmetro das raízes de plântulas crescendo em solo compactado aumentou em até duas vezes devido à expansão do diâmetro das células corticais e, ocasionalmente, a presença de camadas de células adicionais (De KROON; VISSER, 2003). Tracy et al. (2012) também encontraram uma redução no comprimento total e aumento do diâmetro médio de raízes de trigo com a compactação do solo. O efeito restritivo da compactação do solo pode ocasionar limitações morfológicas e fisiológicas no crescimento

das plantas afetando a produtividade, tudo isto devido ao desenvolvimento inadequado do sistema radicular (IJIMA et al., 1991; GRZESIAK et al., 2002).

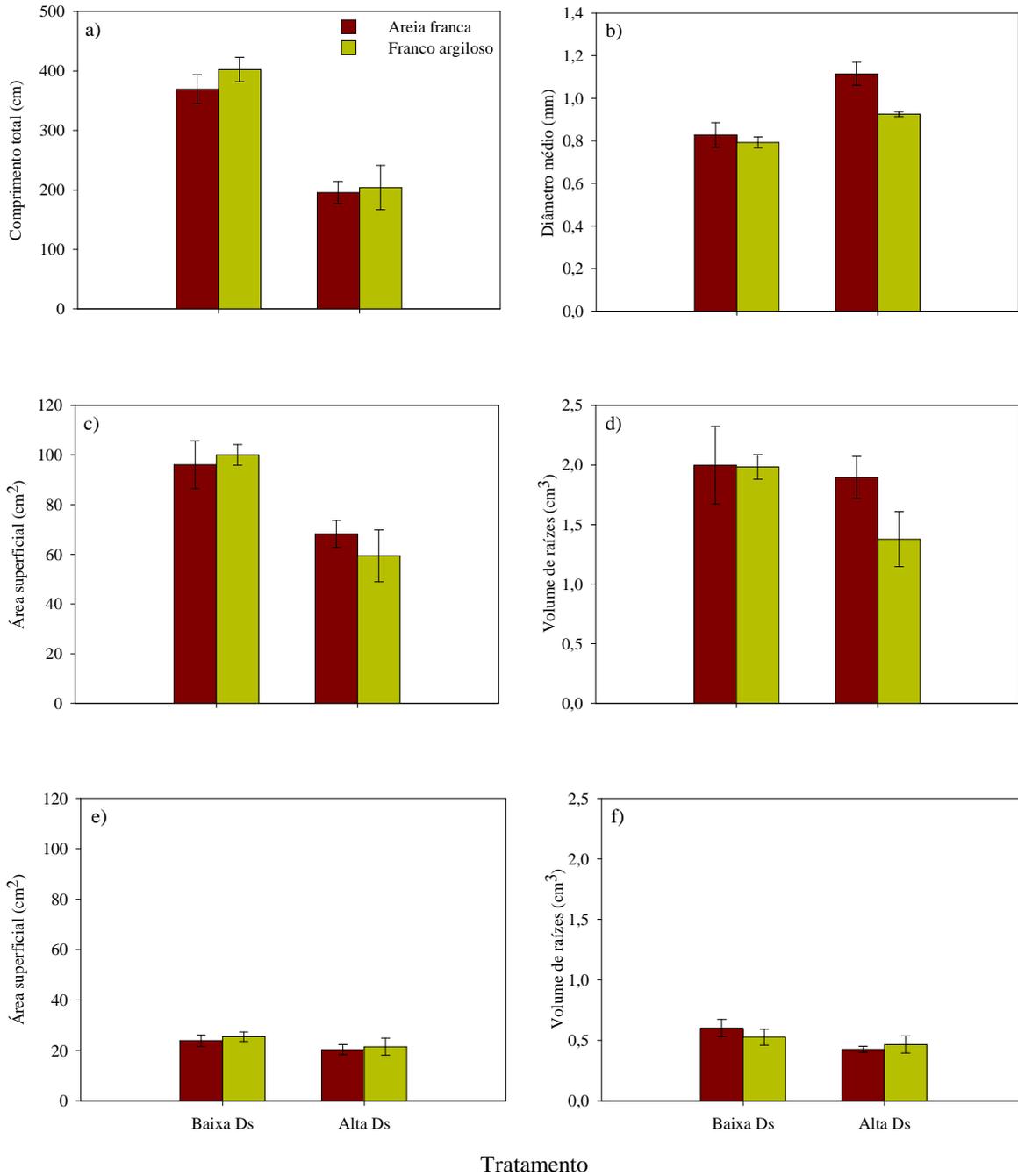


Figura 30 – Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de densidade do solo. As barras representam o erro médio padrão da média

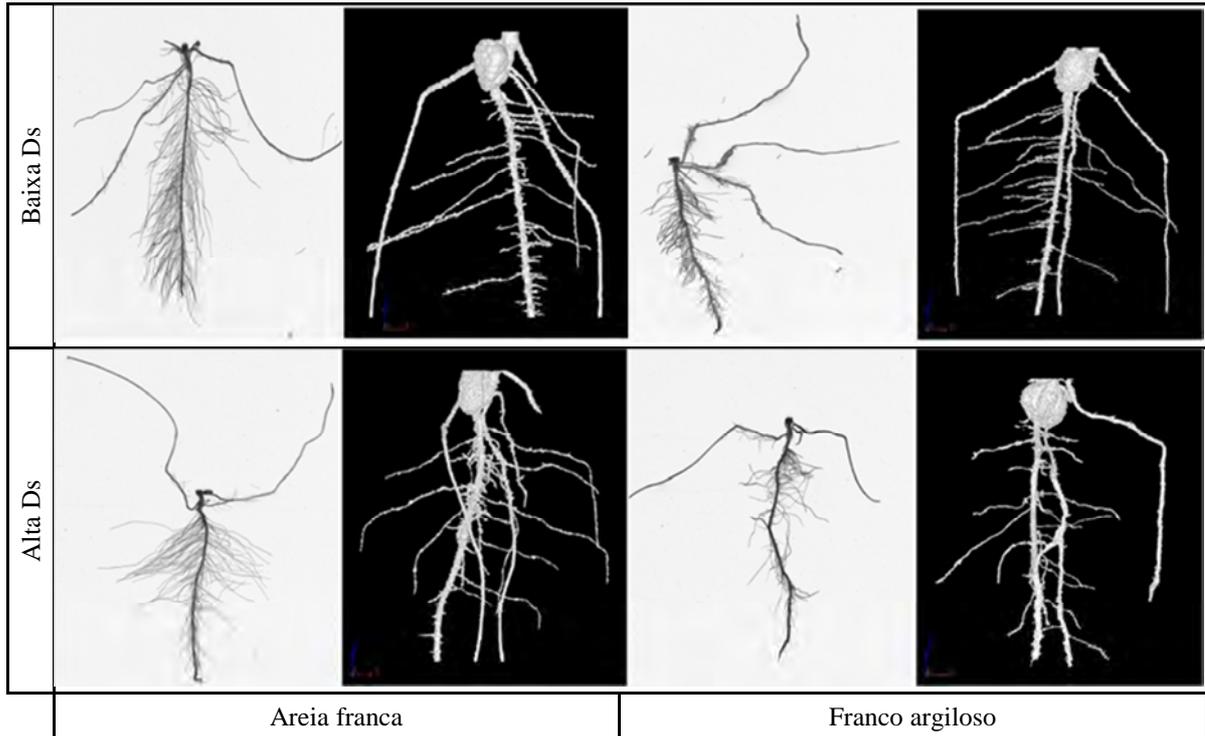


Figura 31 – Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, em baixa e alta densidade do solo. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas

A baixa temperatura teve o efeito mais expressivo na emergência das plântulas de milho. Todos os parâmetros radiculares, estimados tanto pelo WinRHIZO[®] como pelo VGStudioMAX, apresentaram efeito principal apenas para tratamento, com alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,80$). A textura do solo não teve influência significativa (Tabela 22).

A diminuição da temperatura reduziu consideravelmente o início da emergência. Após 6 dias mantidas em sala de crescimento à 15°C o comprimento total das raízes foi de apenas 2,95 cm, 89,4% menor do que o do sistema radicular das raízes das amostras mantidas a 25°C (329,92 cm²) (Figura 32). Por conseguinte houve também uma considerável redução da área superficial e volume das raízes quando mantidas a contrastantes temperaturas. A diferença da área superficial do sistema radicular das plântulas de milho, obtido a partir da segmentação de imagens, foi de 22,43 para 5,06 cm² enquanto que o volume foi de 0,6 para 0,4 cm³. Esta redução foi posteriormente atestada pela análise das raízes utilizando o WinRHIZO[®], onde a área superficial e volume das raízes foi de 58,1 cm² e 0,72 cm³ quando mantidas a 25°C e 1,54 cm² e 0,06 cm³ à temperatura de 15°C.

Dentre os três tratamentos, portanto, a baixa temperatura resultou no efeito mais severo na emergência do milho (Figuras 32 e 33). Sendo uma cultura de clima quente, sua ótima germinação e emergência ocorrem quando as temperaturas ficam entre 20 e 25°C. Muitos trabalhos tem atestado o efeito adverso da temperatura inadequada na emergência da

cultura do milho (ALBUQUERQUE; DE CARVALHO, 2003; EGLI; RUCKER, 2012; LIU et al., 2013).

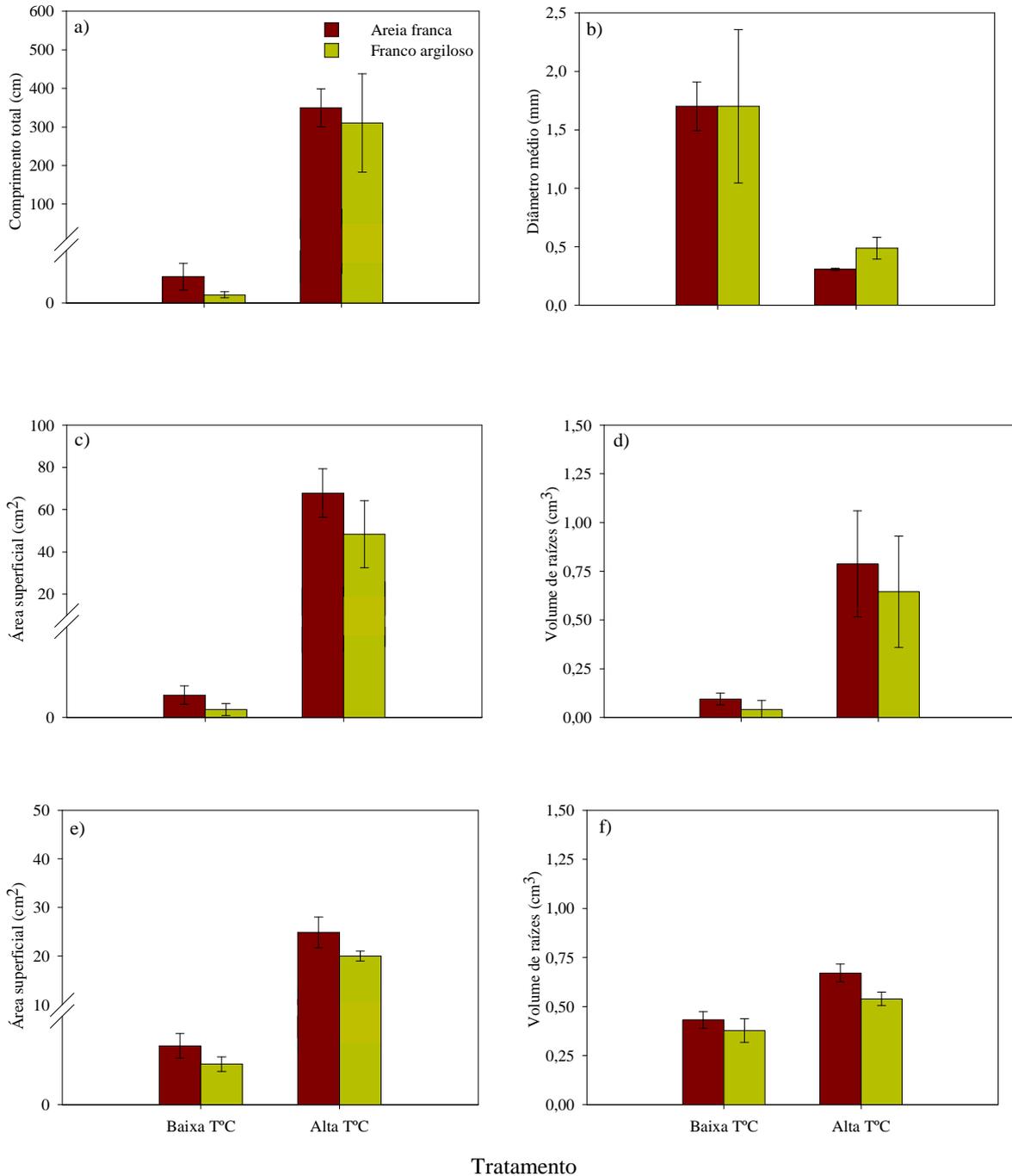


Figura 32 – Médias do comprimento total das raízes (a), área superficial (b), diâmetro médio (c) e volume (d) de raízes (c) avaliados com o WinRHIZO® e área superficial (e) e volume de raízes (f) avaliado por μ TC de Raio-X, para cada tratamento de temperatura. As barras representam o erro médio padrão da média

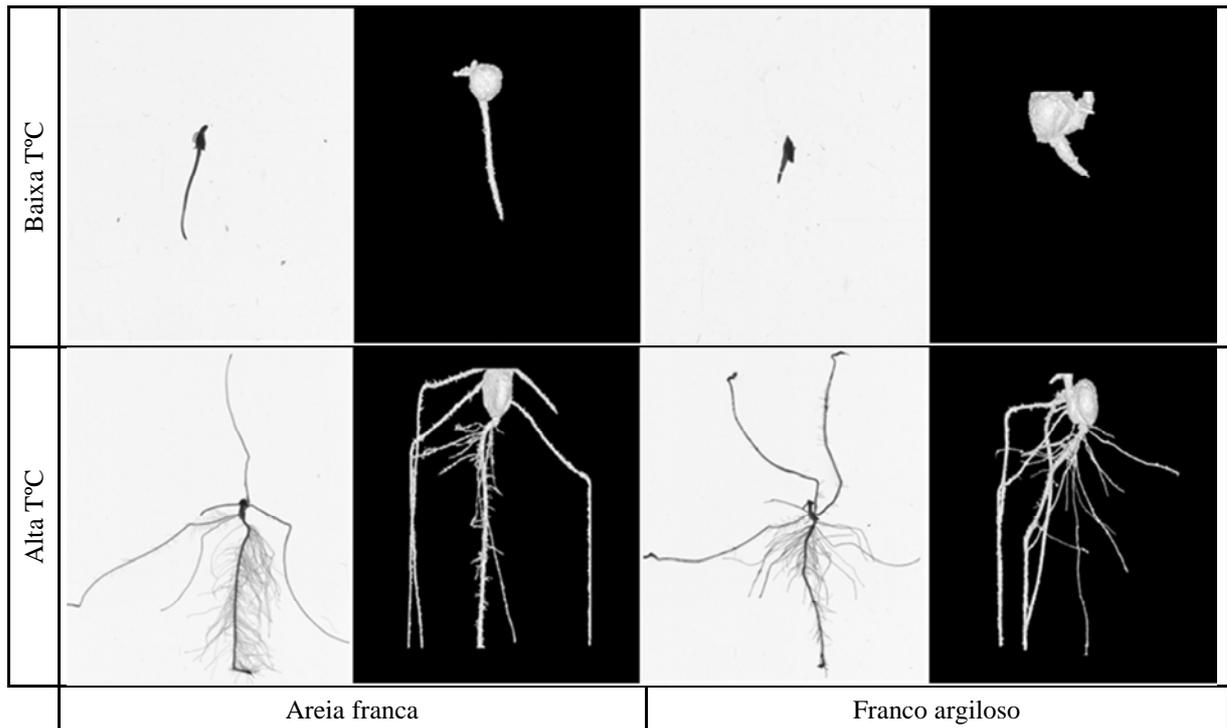


Figura 33 – Exemplos de raízes de milho, segmentadas (fundo preto) a partir de imagens de μ TC de Raio-X, seis dias após a emergência, em baixa e alta temperatura. Ao lado (fundo branco) as mesmas raízes depois de retiradas dos tubos e lavadas

A velocidade de germinação das sementes quando mantidas em baixa temperatura foi bastante reduzida. O tempo de emergência das sementes de milho pode ser de aproximadamente 30 dias sem a ocorrência de maiores danos ao estabelecimento da cultura, desde que o solo esteja suficientemente seco a fim de evitar o ataque de fungos, assim como prevenir a absorção de água pela semente. Uma germinação lenta predispõe a semente e as plântulas a uma menor resistência as condições adversas do meio, principalmente o ataque de patógenas, especialmente os fungos.

A agricultura é extremamente dependente das condições climáticas. Várias simulações de cenários tem apontado que as mudanças climáticas são bastante incertas mas espera-se que a produção agrícola seja afetada no século 21 (LEE; GRYZE; SIX, 2011). Eventos climáticos extremos podem impactar a produtividade negativamente pelo efeito fisiológico nas plantas e pelos efeitos danosos diretos, assim como também afetam o tempo e condições das operações de manejo (VAN DER VELDE et al., 2012). Altas temperaturas e baixas precipitações são as consequências mais prováveis. Por exemplo, no Brasil, o terceiro maior produtor mundial de milho (FAO), há indicativos de que regiões como o nordeste e centro-leste da Amazônia possam vir a ter deficiência de chuvas no futuro, e as projeções também exibem uma diminuição da precipitação na região Sul durante o outono (DAI; TRENBERTH; KARL, 1998; JONES; MANN, 2004; IPCC, 2007). Entender como estes eventos podem modificar a

produção das principais culturas é essencial para planejar manejos apropriados sob os atuais e futuros regimes climáticos (VAN DER VELDE et al., 2012). Este resumido trabalho apenas evidenciou a consequência de algumas condições adversas do solo na emergência da cultura do milho, demonstrando, pelo uso da análise de imagens, que as plantas sofrem os efeitos destas condições desfavoráveis desde os primeiros estágios do seu desenvolvimento. O trabalho também ressaltou a potencialidade do uso da técnica de μ TC de Raio-X para estudos na área da ciência do solo.

3 CONCLUSÕES

A hipótese testada neste trabalho, de que a variabilidade textural do solo em uma área cultivada sob sistema de plantio direto poderia resultar em condições físicas heterogêneas na cama de semeadura e, conseqüentemente influenciar na eficácia da germinação e emergência das culturas de soja e milho, não foi comprovada. As condições físicas da cama de semeadura nos dois anos foram distintas porém, não interviram no estabelecimento do número final de plantas emergidas das duas culturas.

O conteúdo de argila variou de 27,78 a 45,51 % e não teve influência no número final de plantas emergidas nos dois anos avaliados. A análise de estabilidade temporal da umidade do solo sugere que amostragens, para avaliação da umidade devem, nesta área, ser realizadas na faixa da transeção que vai de 300 a 600 m por apresentarem valores mais próximos da média para qualquer tempo.

O conteúdo de água disponível para as plantas sem que haja limitações de resistência e aeração, IHO, foi reduzido de um ano para o outro, indicando que a qualidade física da cama de semeadura do milho foi relativamente inferior a da soja. O limite inferior do IHO foi determinado pela umidade do solo, na qual a resistência a penetração é limitante, ao longo de toda a transeção. Os atributos físicos do solo não foram significativamente relacionados com os parâmetros e emergência das culturas, mas tiveram influência na altura da parte aérea e comprimento das raízes. O efeito das condições físicas no crescimento radicular das plântulas de milho também foi evidenciado a partir da análise de imagens obtidas por μ TC de Raio -X.

REFERÊNCIAS

- ACHAKZAI, A. K. K. Effect of water stress on imbibition, germination and seedling growth of maize cultivars. **Sarhad Journal of Agriculture**, Sarhad, v. 25, n. 2, p. 8, 2009.
- ALBUQUERQUE, M. C. D.; DE CARVALHO, N. M. Effect of the type of environmental stress on the emergence of sunflower (*Helianthus annuus* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) and maize (*Zea mays* L.) seeds with different levels of vigor. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 31, n. 2, p. 465-479, 2003.
- ANDERSON, D.W.; SAGGAR, S.; BETTANY, J.R.; STEWART, J.W.B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic-matter .1. the nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 767-772, 1981.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337-345, 2004.
- ARVIDSSON, J., KELLER, T., GUSTAFSSON, K. Specific draught formouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p.221–231, 2004.
- ATKINSON, B. S.; SPARKES, D. L.; MOONEY, S. J. Using selected soil physical properties of seedbeds to predict crop establishment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 218-228, 2007.
- ATKINSON, B.S.; SPARKES, D.L.; MOONEY, S.J. Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 291–301, 2009.
- AYLMORE, L.A.G. Use of computer-assisted tomography in studying water-movement around plant-roots. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 49, p. 1-54, 1993.
- BALL, B. C.; HARRIS, W.; BURFORD, J. R. A laboratory method to measure gas-diffusion and flow in soil and other porous materials. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, n. 3, p. 323-334, 1981.
- BALL, B. C.; OSULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas-diffusion, fluid-flow and derived pore continuity indexes in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, London, v. 39, n. 3, p. 327-339, 1988.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K.; O'SULLIVAN, M. F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, n. 4, p. 593-601, 1997.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase a matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.687-694, 1999.
- BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth responses: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 341-358, 1990.

- BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 2, Jan. 2006.
- BENJAMIN, J. G.; NIELSON, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 137-148, 2003.
- BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1384-1393, 1998.
- BHERING, S.B.; SANTOS, H.G; BOGNOLA, I.A.; CÚRCIO, G.R.; MANZATTO, C.V.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; ÁGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S. **Mapa de solos do Estado do Paraná**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: EMBRAPA; IAPAR, 2008. 74p.
- BILBRO, J.D.; WANJURA, D.F. Soil crusts and cotton emergences relationships. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p. 1485-1488, 1982.
- BINGHAM, I.J., BENGOUGH, A.G. Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength. **Plant and Soil**, The Hague, v. 250, p. 273–282, 2003.
- BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C.; MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 215-228, 1990.
- BLAINSKI, E.; GONCALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARAES, R. M. L. Least limiting water range of an irrigated dystroferic Red Nitosol. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 273-281, 2009.
- BLAKE, J.J., SPINK, J.H., DYER, C. **Factors Affecting Cereal Establishment and its Prediction (Research Review)**. Kenilworth: Home-Grown Cereals Authority (HGCA), 2003. 51p.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237–264.
- BOSO, M.; ROMERO, E.; TARANTINO, A. The use of different suction measurement techniques to determine water retention curves. In: SCHANZ, T. (Ed.). **Unsaturated Soils: Experimental Studies**, Berlin:Springer, 2005. p.169-181. (Springer Proceedings in Physics).
- BOUWMAN, I.A.; ARTS, W.B.M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.14, p.213–222, 2000.
- BOWEN, H.D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M. (Ed.). **Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress**. Michigan: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1981. p. 21–57.
- BRADBEER, J.W. **Seed Dormancy and Germination**. London: Blackie, 1988. 160p.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A.(Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 463-478.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The Nature and Properties of Soils**. 12th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 881p.

BRAUNACK, M.V.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed - A Review .1. properties of aggregates and beds of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 259-279, 1989.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1/2, p. 3-22, 2005.

BROWN, A.D.; DEXTER, A.R.; CHAMEN, W.C.T.; SPOOR, G. Effect of soil macroporosity and aggregate size on seed-soil contact. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 203-216, 1996.

BURKE, I.C.; YONKER, C.M.; PARTON, W.J.; COLE, C.V.; FLACH, K.; SCHIMEL, D.S. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic-matter content in us grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 3, p. 800-805, 1989.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

CAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 1-16, 2004.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Soil aggregate stability after management with crop rotation and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1399-1407, 2008.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4.ed. Piracicaba: ESALQ/FEALQ, 1983. 349p.

CARVALHO JÚNIOR, I.A.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 505-514, 1998.

CAVALIERI, K.M.V.; DA SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 158-164, 2009.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p.137-147, 2006.

CHIEF, K.; FERRE, T.P.A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, n. 4, p. 1257-1263, 2006.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, The Hague, v.255, p.93–104, 2003.

COOK, F.J. One-dimensional oxygen diffusion into soil with exponential respiration - analytical and numerical-solutions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 78, n. 3, p. 277-283, 1995.

COSTA, C.; CORBEELS, M.; BERNOUX, M.; PICCOLO, M.C.; NETO, M.S.; FEIGL, B. J.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; SCOPEL, E. ;LAL, R. Assessing soil carbon storage rates under no-tillage: Comparing the synchronic and diachronic approaches. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 134, p. 207-212, 2013.

CZYŻ, E.; KUKIER, U. The effect of soil bulk density and water content on soil aeration, nitrogen forms and barley yield. **Fragmenta Agronomica**, Pulawy, v. 2A, p.163–166, 1997.

CZYŻ, E.A.; TOMASZEWSKA, J.; DEXTER, A.R. Response of spring barley to changes of compaction and aeration of sandy soil under model conditions. **International Agrophysics**, Dublin, v. 15, p. 9–12, 2001.

DA SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 184, n. 2, p. 323-329, 1996.

DA SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

DAI, A.; TRENBERTH, K.E.; KARL, T.R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 25, n. 17, p. 3367-3370, 1998.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.H. Water retention and storage. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. IV: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 671-717.

DE ALMEIDA, J.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; DO AMARAL, A.J.; ZOLDAN, W.A. Chemical properties of a Humic Cambisol under conventional tillage and no-tillage after six years of cropping. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 437-445, 2005.

DE KROON, H.; VISSER, E. **Root ecology**. Berlim: Springer, 2003. 394p.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 471-477, 1993.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Development and Current Status of No-till Adoption in the World. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, 18., 2009, Izmir. **Proceedings** ...,Izmir: ISTRO, 2009. 1 CD-ROM.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. **Controle de erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Londrina: GTZ: IAPAR, 1991. 271p.

DIAS Jr., M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 225-232, 2009.

EGLI, D.B.; RUCKER, M. Seed Vigor and the Uniformity of Emergence of Corn Seedlings. **Crop Science**, Madison, v. 52, n. 6, p. 2774-2782, 2012.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2000. 412p.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2003**. Disponível em:

<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/SojaCentralBrasil2003.htm>>. Acesso em: 01 dez. 2010.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Disponível em:

<<http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html>>. Acesso em: 15 set. 2011.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n.4, p. 448-453, 2010.

FIGUEIREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FILHO, O.G. **Qualidade física da cama de semeadura do solo em sistemas de manejo**. 2012. 157p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2012.

FISH, A.N.; KOPI, A.J. The use of a simple field air permeability as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 55-264, 1994.

GAMI, S.K.; LAUREN, J.G.; DUXBURY, J.M. Influence of soil texture and cultivation on carbon and nitrogen levels in soils of the eastern Indo-Gangetic Plains. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, n. 3/4, p. 304-311, 2009.

GASSEN, D.; GASSEN, F. **Plantio direto: o caminho do futuro**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 27p.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-Size Analysis In. DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed). **Methods of soil analysis**. IV: Physical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-289.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Florida: CRC Press, 1990. 250p.

GLINSKI, J.; STEPNIIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. CRC Press, Boca Raton, FL. 1985. 229p.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô-central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.1555-2164, 1999.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GREGORY, P.J. Roots, rhizosphere and soil: the route to better understanding of soil science? **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, p. 2–12, 2006

GROENEVELT, P. H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1984.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis. IV: Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 201-225.

GRZESIAK, S.; GRZESIAK, M.T.; FELEK, W.; HURA, T.; STABRYLA, J. The impact of different soil moisture and soil compaction on the growth of triticale root system. **Acta Physiologiae Plantarum**, Kraków, v. 24, n. 3, p. 331-342, 2002.

HAKANSSON, I.; MYRBECK, A.; ETANA, A. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, n. 1/2, p. 23-40, 2002.

HAKANSSON, I.; VONPOLGAR, J. Experiments on the effects of seedbed characteristics on seedling emergence in a dry weather situation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 115-135, 1984.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems – A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p.121–145, 2005.

HASSAN, F.U.; AHMAD, M.; AHMAD, N.; ABBASI, M. K. Effects of subsoil compaction on yield and yield attributes of wheat in the sub-humid region of Pakistan. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1/2, p. 361-366, 2007.

HONTORIA, C.; RODRIGUEZ-MURILLO, J. C.; SAA, A. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 3, p. 614-621, 1999.

IJIMA, M.; KONO, Y.; YAMAUCHI, A.; PARDALES, J. R. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 31, n. 3, p. 333-342, 1991.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.11-18, 2001.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD ROM.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2007: Mitigation of Climate Change. In: METZ, B.; DAVIDSON, O.R.; BOSCH, P.R.; DAVE, R.; MEYER, L.A. (Ed.). **Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 862p.

JAKOBSEN, B.F.; DEXTER, A.R. Effect of soil structure on wheat root growth, water uptake and grain yield. A computer simulated model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 10, p. 331–345, 1987.

JOBAGY, E.G.; JACKSON, R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, Tempe, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000.

JONES, P.D.; MANN, M.E. Climate over past millennia. **Reviews of Geophysics**, Washington, v. 42, n. 2, p. 1-42, 2004.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; SHAXSON, F.; PRETTY, J. The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake. **International Journal of Agricultural Sustainability**, Oxford, v.7, n.4, p. 292–320, 2009.

KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 2, p. 1-51, 1990.

KONDO, M.K.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 497-506, 1999.

KONONOVA, M.M. **Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility**, 2nd ed. Oxford: Pergamon, 1966. 544p

LAL, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science**, Baltimore, v.135, p.191-207, 2000.

LARNEY, F.J.; BREMER, E.; JANZEN, H.H.; JOHNSTON, A.M.; LINDWALL, C.W. Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, n. 4, p. 229-240, 1997.

LEÃO, T.P.; DA SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279–285, 2006.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LEE, J.; DE GRYZE, S.; SIX, J. Effect of climate change on field crop production in California's Central Valley. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, p. 335-353, 2011.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.20, p.1-12, 1996.

LICHT, M.A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, n. 1/2, p. 233-249, 2005.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p. 107-136, 2003.

LIU, Y.E.; XIE, R.Z.; HOU, P.; LI, S.K.; ZHANG, H.B.; MING, B.; LONG, H.L.; LIANG, S. M. Phenological responses of maize to changes in environment when grown at different latitudes in China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 144, p. 192-199, 2013.

LOGSDON, S.D.; JAYNES, D.B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 703-709, 1996.

LOURENCO, S.D.N.; GALLIPOLI, D.; TOLL, D.G.; AUGARDE, C.E.; EVANS, F.D. A new procedure for the determination of soil-water retention curves by continuous drying using high-suction tensiometers. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 48, n. 2, p. 327-335, 2011.

MACHADO, P.L.A.; BERNADI, A.C.C.; SILVA, C.A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. 209p.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, p.176-177, 1962.

MASLE, J.; PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal Plant Physiology**, Sydney, v. 14, 643-656, 1987.

MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant-species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 135, n. 1, p. 31-41, 1991.

MATERECHERA, S.A.; MLOZA-BANDA, H.R. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, p.13-24, 1997.

McINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and no parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v.88, p. 133-137, 1959.

MCKENZIE, D.C.; McBRATNEY, A.B. Cotton root growth in a compacted Vertisol (Grey Vertosol): I. Predictions using strength measurements and limiting water ranges. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 39, p.1157-1168, 2001.

MELLO, I.; VAN RAIJ, B. No-till for sustainable agriculture in Brazil. Proc. World Assoc. **Soil and Water Conservation**, Washington, v.1, p.49-57, 2006.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n. 4, p. 789-793, 2002.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJONNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, 2001.

MOONEY, S.J.; PRIDMORE, T.P.; HELLIWELL, J.; BENNETT, M.J. Developing X-ray Computed Tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 352, n. 1-2, 2012.

NASR, H.M.; SELLES, F. Seeding emergence as influenced by aggregate size, bulk density and penetration resistance of the seedbed. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, p. 61-76, 1995.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. 2000. Fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. v. 2. p. 393-486.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 119-129, 2003.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. 2003. Image analysis and microscopic techniques to characterize soil pore systems. In: BLAHOVEC, J., KUTILEK, M. (Ed.). **Physical Methods in Agriculture: Approach to Precision and Quality**. Berlim: Springer, 2003, 454p.

PEÑA, Y.A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R.O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 517-523, 1996.

PERDOK, U.D.; KOUWENHOVEN, J.K. Soil-tool interactions and field performance of implements. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 283-326, 1994.

PERRET, J.S.; AL-BELUSHI, M.E.; DEADMAN, M. Non-destructive visualization and quantification of roots using computed tomography. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 39, n. 2, p. 391-399, 2007.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477p.

PIRES, L.F.; BORGES, J.A.R.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

Rally da Safra 2011. Disponível em:

<<http://www.rallydasafra2011.com.br/apresentacao.php>> Acesso em: set. 2011.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, p. 211-216, 1988.

RIBEIRO JUNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. Piracicaba, 1995. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

- RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 105-114, 2011.
- ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society America Journal**, Oxford, v. 54, p. 969-974, 1990.
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 923-992, 1991.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, p. 313-319, 1995.
- SAS INSTITUTE. **SAS: User's guide: statistics**. 9th ed. Cary, 2002. 943p.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p. 844-851, 1996.
- SCHIMEL, D.S.; PARTON, W.J. Microclimatic controls of nitrogen mineralization and nitrification in shortgrass steppe soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 93, n. 3, p. 347-357, 1986.
- SCHJONNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; MOLDRUP, P.; JACOBSEN, O.H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, n. 2, p. 331-339, 2002.
- SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2003.
- SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira**. 2000. 75p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika**, London, v. 52, p.591-611 , 1965.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, The Hague, v.184, p. 323-329, 1996.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; LEO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.1535-1545, 2009.
- SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SILVEIRA JUNIOR, S.D. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à escarificação mecânica e biológica**. 2012. 64p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SOFFE, R.J. (Ed.). **The agricultural notebook**. 20th ed. Oxford: Blackwell Science, 2003. 768p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes preparos e rotações de culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Caderno de resumos...** Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas; Embrapa Informática Agropecuária, 2004. p. 50-51.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.

TAYLOR, H.M.; RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, Baltimore, v.108, p. 113-119, 1969.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.R. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. ORGANIC-MATTER AND WATER-STABLE AGGREGATES IN SOILS. **Journal of Soil Science**, London, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TOKER, N.K.; GERMAINE, J.T.; SJOBLUM, K.J.; CULLIGAN, P. J. A new technique for rapid measurement of continuous soil moisture characteristic curves. **Geotechnique**, London, v. 54, n. 3, p. 179-186, 2004.

TOPP, G.C.; GALGANOV, K.C.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non-limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program Technical Report 2. Centre for Land and Biological Resources Research, Ottawa, 1994. 36p.

TORMENA, C.A.; DA SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, 1999.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p. 211-219, 2007.

TRACY, S.R.; BLACK, C.R.; ROBERTS, J.A. MCNEILL, A.; DAVIDSON, R.; TESTER, M.; SAMEC, M.; KOROSAK, D.; STURROCK, C.; MOONEY, S.J. Quantifying the effect of soil compaction on three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) using X-ray Micro Computed Tomography (μ CT). **Plant and Soil**, The Hague, v. 353, n. 1/2, p. 195-208, 2012.

TRACY, S.R.; ROBERTS, J.A.; BLACK, C.R.; MCNEILL, A.; DAVIDSON, R.; MOONEY, S.J. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 2, 2010.

TYNER, J.S.; WRIGHT, W.C.; LEE, J.; CRENSHAW, A.D. A dynamic air permeameter for coarse-textured soil columns and cores. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, n. 2, p. 428-433, 2005.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F.; CHIEPPE JÚNIOR, J. B. Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-escuro argiloso, sob pivô central. **Irriga**, Botucatu, v.1, n. 3, p. 8-15, 1996.

VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, p. 822-827, 1985.

VAN DER VELDE, M.; TUBIELLO, F.N.; VRIELING, A.; BOURAOUI, F. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 113, n. 3/4, p. 751-765, 2012.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, Minneapolis, v.2, p. 71-78, 1927.

WALKLEY, A. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils - effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. **Soil Science**, Baltimore, v. 63, n. 4, p. 251-264, 1947.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUNSON, F.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Non limiting water range (NLWR) as index of soil quality as related to physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, p.401-414, 2003.

WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H.; RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 17-33, 1992.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, n. 1/2, p. 168-173, 2005.

ZOU, C.; FENFOLD, C.; SANDS, R.; MISRA, R.R.; HUDSON, I. Effects of soil air-filled porosity, matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, The Hague, v.236, p.105-115, 2001.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Madison, v.38, p.947-958, 2000.

ANEXOS

ANEXO A – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nos dias avaliados segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros durante a emergência da cultura da soja (2010)

DAS ¹	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	0,234	0,232	0,027	11,58	0,172	0,294	0,047	-0,616
2	0,180	0,179	0,025	13,88	0,135	0,248	0,525	-0,106
3	0,166	0,162	0,027	16,07	0,108	0,240	0,461	0,379
4	0,165	0,161	0,030	18,14	0,109	0,250	0,502	0,017
5	0,153	0,151	0,031	20,01	0,102	0,241	0,582	-0,036
6	0,149	0,150	0,031	20,90	0,082	0,227	0,192	-0,267
7	0,180	0,177	0,024	13,58	0,134	0,244	0,395	-0,498
8	0,176	0,168	0,038	21,57	0,122	0,314	1,240	1,784
9	0,189	0,181	0,034	17,77	0,137	0,301	1,033	1,027
10	0,177	0,174	0,032	17,87	0,118	0,274	0,750	0,542
11	0,164	0,157	0,036	21,83	0,100	0,273	0,784	0,445
12	0,159	0,156	0,033	20,90	0,102	0,242	0,437	-0,504

¹ Dia Após a Semeadura

ANEXO B – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transecto de 600m durante a emergência da cultura da soja (2010) (média dos 12 dias avaliados)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	0,181	0,172	0,038	21,22	0,114	0,282	0,740	0,036
2	0,167	0,159	0,033	19,67	0,122	0,256	0,953	0,275
3	0,176	0,170	0,034	19,32	0,113	0,267	0,632	0,550
4	0,195	0,189	0,042	21,48	0,130	0,273	0,297	-1,293
5	0,184	0,187	0,044	24,02	0,123	0,301	0,897	-0,070
6	0,164	0,158	0,031	19,05	0,102	0,253	0,284	0,742
7	0,156	0,152	0,029	18,84	0,096	0,219	0,234	-0,088
8	0,182	0,181	0,031	17,24	0,103	0,250	-0,090	-0,114
9	0,167	0,155	0,035	21,02	0,109	0,251	0,379	-0,789
10	0,171	0,172	0,034	20,02	0,110	0,278	0,636	0,832
11	0,176	0,176	0,032	18,12	0,119	0,269	0,785	1,156
12	0,196	0,191	0,035	17,71	0,118	0,294	0,404	0,343
13	0,187	0,180	0,037	19,75	0,130	0,276	0,635	-0,064
14	0,202	0,202	0,042	20,68	0,116	0,314	0,526	0,256
15	0,171	0,171	0,034	20,06	0,104	0,256	0,694	0,509
16	0,183	0,179	0,040	21,78	0,107	0,280	0,622	0,484
17	0,195	0,195	0,043	22,17	0,116	0,297	0,397	-0,190
18	0,202	0,199	0,034	16,88	0,134	0,279	0,349	-0,379
19	0,180	0,177	0,033	18,23	0,126	0,267	0,575	-0,094
20	0,175	0,172	0,035	19,99	0,107	0,260	0,585	0,101
21	0,149	0,147	0,036	23,86	0,091	0,277	1,186	2,518
22	0,163	0,159	0,039	24,02	0,082	0,293	0,809	1,696
23	0,178	0,175	0,035	19,61	0,102	0,261	0,287	-0,267
24	0,169	0,170	0,031	18,36	0,103	0,253	0,522	0,763
25	0,154	0,152	0,027	17,65	0,102	0,222	0,372	0,208
26	0,148	0,143	0,030	20,19	0,103	0,218	0,494	-0,441
27	0,173	0,173	0,029	16,96	0,108	0,233	-0,081	-0,493
28	0,165	0,166	0,030	17,99	0,118	0,233	0,510	-0,239
29	0,172	0,169	0,029	17,04	0,119	0,266	0,861	1,518
30	0,150	0,150	0,029	19,55	0,102	0,222	0,390	-0,549

ANEXO C – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nas quatro classes texturais ao longo da transeção por um período de 12 dias durante a emergência da cultura da soja (2010)

Classe textural	N Obs	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
Argilo arenosa 1	240	0,180	0,170	0,039	21,71	0,113	0,301	0,753	-0,174
Franco argilo arenosa 1	384	0,175	0,173	0,035	20,08	0,096	0,294	0,433	0,195
Argilo arenosa 2	336	0,187	0,183	0,039	20,85	0,104	0,314	0,543	0,081
Franco argilo arenosa 2	480	0,162	0,160	0,033	20,46	0,082	0,293	0,519	0,473

Anexo D – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos dias avaliados segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros durante a emergência da cultura do milho (2011)

DAS ¹	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
4	0,228	0,226	0,020	8,97	0,184	0,287	0,341	0,370
5	0,193	0,193	0,018	9,49	0,145	0,227	-0,040	-0,398
6	0,204	0,204	0,019	9,17	0,155	0,247	0,040	-0,557
7	0,179	0,183	0,018	9,60	0,135	0,226	-0,420	-0,229
8	0,190	0,194	0,020	11,42	0,127	0,227	0,083	-0,540
10	0,260	0,255	0,021	8,21	0,222	0,304	0,324	-0,825

¹ Dia Após a Semeadura

ANEXO E – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transecto de 600m durante a emergência da cultura do milho (2011) (média dos 7 dias avaliados)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	0,178	0,187	0,028	13,94	0,160	0,265	0,715	-0,164
2	0,174	0,180	0,021	10,24	0,172	0,275	1,339	3,000
3	0,191	0,200	0,023	10,92	0,168	0,269	0,540	0,537
4	0,217	0,205	0,025	12,47	0,168	0,250	0,459	-1,186
5	0,214	0,213	0,037	18,14	0,146	0,280	0,499	-0,398
6	0,183	0,186	0,043	22,29	0,135	0,282	0,859	-0,065
7	0,196	0,204	0,028	12,62	0,176	0,289	1,105	1,347
8	0,188	0,191	0,030	15,31	0,151	0,246	0,184	-1,073
9	0,212	0,206	0,040	20,55	0,134	0,280	0,145	-0,743
10	0,202	0,210	0,032	15,08	0,127	0,269	-0,688	1,559
11	0,201	0,199	0,040	19,47	0,151	0,296	0,676	-0,260
12	0,232	0,227	0,036	16,43	0,168	0,304	0,711	0,049
13	0,236	0,216	0,034	15,44	0,168	0,297	0,455	-0,554
14	0,218	0,212	0,031	14,21	0,174	0,287	0,939	0,488
15	0,227	0,219	0,037	16,76	0,165	0,299	0,796	-0,287
16	0,252	0,243	0,040	18,05	0,167	0,300	0,730	-0,957
17	0,229	0,217	0,026	12,78	0,170	0,268	0,445	-0,416
18	0,204	0,202	0,031	15,21	0,157	0,278	0,914	1,273
19	0,220	0,195	0,041	19,27	0,145	0,292	0,565	-0,645
20	0,198	0,202	0,031	14,48	0,157	0,266	-0,181	-0,709
21	0,210	0,203	0,030	14,57	0,152	0,266	0,283	-0,664
22	0,215	0,227	0,024	10,54	0,170	0,287	0,022	1,878
23	0,223	0,205	0,038	19,20	0,147	0,282	0,535	-0,632
24	0,199	0,200	0,028	13,84	0,153	0,252	-0,006	-1,159
25	0,205	0,198	0,033	16,31	0,156	0,273	0,912	-0,108
26	0,208	0,211	0,033	15,09	0,174	0,283	0,606	-0,694
27	0,194	0,186	0,029	15,31	0,149	0,251	0,675	-0,515
28	0,206	0,211	0,034	17,63	0,145	0,250	0,464	-1,114
29	0,216	0,180	0,035	17,75	0,153	0,272	0,771	-0,612
30	0,224	0,220	0,031	15,39	0,169	0,280	0,696	-0,490

ANEXO F – Resumo estatístico para o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$) nas quatro classes texturais ao longo da transeção por um período de 6 dias durante a emergência da cultura do milho (2011)

Classe textural	N Obs	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
Argilo arenosa 1	120	0,195	0,201	0,027	13,18	0,146	0,280	0,473	0,035
Franco argilo arenosa 1	192	0,206	0,204	0,037	17,63	0,127	0,304	0,293	-0,157
Argilo arenosa 2	168	0,221	0,218	0,034	16,06	0,145	0,300	0,679	-0,149
Franco argilo arenosa 2	240	0,210	0,208	0,033	16,12	0,145	0,287	0,378	-0,714

Anexo G – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos dias avaliados segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros durante a emergência da cultura da soja (2010)

DAS ¹	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	0,70	0,54	0,52	74,97	0,08	2,85	1,503	2,547
2	0,82	0,70	0,49	60,24	0,20	2,47	1,166	1,329
3	0,85	0,67	0,59	69,62	0,11	2,99	1,320	1,383
4	1,02	0,77	0,59	58,16	0,16	3,21	1,274	1,417
5	1,09	0,95	0,70	64,65	0,03	3,40	1,407	1,929
6	1,30	1,29	0,67	51,03	0,23	3,63	0,826	0,591
7	1,43	1,33	0,74	51,89	0,30	3,80	0,718	0,129
8	1,32	1,24	0,66	50,27	0,15	3,35	0,646	0,130
9	1,04	0,86	0,60	57,70	0,29	3,53	1,581	3,200
10	1,25	1,13	0,72	57,67	0,24	3,73	1,173	1,166
11	1,19	1,06	0,65	55,00	0,21	2,99	0,753	-0,076
12	1,26	1,05	0,71	56,51	0,20	3,13	0,809	-0,001

ANEXO H – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transecto de 600m durante a emergência da cultura da soja (2010) (média dos 12 dias avaliados)

(continua)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	0,98	0,74	0,58	59,13	2,99	0,30	1,408	1,975
2	0,96	0,73	0,68	70,04	2,75	0,12	1,239	0,615
3	0,86	0,73	0,49	56,33	2,71	0,24	1,741	3,849
4	1,42	1,29	0,81	56,97	3,62	0,16	0,465	-0,254
5	1,18	0,94	0,80	67,68	3,62	0,15	1,234	1,036
6	1,12	0,87	0,82	73,40	3,23	0,08	1,122	0,603
7	0,77	0,64	0,51	66,30	2,44	0,20	1,458	2,191
8	1,56	1,51	0,81	51,81	3,73	0,03	0,478	0,215
9	0,97	0,76	0,67	69,61	2,79	0,10	1,235	0,765
10	0,98	0,84	0,63	63,74	3,80	0,24	2,393	8,066
11	1,24	1,31	0,58	47,10	2,42	0,19	0,077	-1,098
12	0,92	0,85	0,48	52,23	2,13	0,11	0,621	0,015
13	1,40	1,35	0,64	46,01	2,85	0,29	0,381	-0,638
14	1,23	1,15	0,60	49,12	2,72	0,30	0,542	-0,452
15	1,05	1,04	0,50	48,01	2,42	0,21	0,458	-0,083
16	1,13	1,03	0,68	60,35	2,96	0,31	1,052	0,573
17	1,22	1,21	0,66	54,07	2,58	0,23	0,272	-1,028
18	1,11	1,11	0,43	38,45	1,93	0,25	0,023	-0,648
19	1,18	1,17	0,63	52,99	3,21	0,19	0,710	0,910
20	1,03	0,79	0,57	55,48	2,44	0,20	0,905	-0,073
21	0,88	0,75	0,51	58,46	2,41	0,16	1,118	1,062
22	0,85	0,72	0,48	55,93	2,62	0,16	2,106	5,130
23	1,69	1,51	0,72	42,82	3,11	0,45	0,206	-0,802
24	0,97	0,92	0,58	60,43	2,80	0,19	0,916	0,802

ANEXO H – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transecto de 600m durante a emergência da cultura da soja (2010) (média dos 12 dias avaliados)

(conclusão)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
25	0,84	0,56	0,63	74,97	2,92	0,12	1,527	2,454
26	0,80	0,73	0,45	56,61	2,05	0,12	0,876	0,406
27	1,73	1,44	1,05	60,77	3,63	0,18	0,229	-1,313
28	0,82	0,70	0,42	51,60	1,92	0,18	0,950	0,396
29	1,05	0,96	0,50	47,66	2,00	0,15	0,095	-1,005
30	1,25	1,16	0,68	54,65	3,01	0,24	0,817	0,263

ANEXO I – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nas quatro classes texturais ao longo da transeção por um período de 12 dias durante a emergência da cultura da soja (2010)

Classe textural	N Obs	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
Argilo arenosa 1	240	1,08	0,84	0,70	65,09	3,62	0,12	1,205	1,004
Franco argilo arenosa 1	384	1,12	0,95	0,69	61,92	3,80	0,03	1,008	0,864
Argilo arenosa 2	336	1,13	1,07	0,59	51,72	3,21	0,19	0,681	0,096
Franco argilo arenosa 2	480	1,09	0,91	0,71	65,14	3,63	0,12	1,181	1,042

ANEXO J – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos dias avaliados segundo uma transeção de 30 pontos espaçados de 20 metros durante a emergência da cultura do milho (2011)

DAS ¹	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
4	2,00	1,97	0,66	32,94	0,41	3,81	0,075	0,245
5	1,51	1,50	0,64	42,71	0,32	3,88	0,453	0,534
6	1,49	1,41	0,74	49,80	0,15	3,39	0,364	-0,393
7	1,50	1,47	0,58	38,35	0,20	3,21	0,482	0,181
8	1,63	1,67	0,73	44,89	0,35	4,12	0,438	0,225
10	1,02	1,00	0,50	49,08	0,18	2,34	0,490	-0,265

ANEXO K – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transeção de 600m durante a emergência da cultura do milho (2011) (média dos 6 dias avaliados)

(continua)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
1	1,39	1,47	0,61	43,99	0,17	2,63	-0,159	-0,328
2	1,54	1,64	0,53	34,80	0,23	2,48	-0,633	0,552
3	1,42	1,27	0,57	40,04	0,53	2,52	0,558	-0,670
4	1,69	1,57	0,69	40,73	0,61	4,12	1,859	5,931
5	1,64	1,66	0,56	34,18	0,73	2,53	-0,111	-1,183
6	1,32	1,20	0,70	53,29	0,39	2,99	0,883	0,200
7	1,83	1,81	0,63	34,70	0,84	2,83	-0,039	-1,275
8	1,46	1,63	0,63	43,25	0,34	2,50	-0,254	-1,088
9	1,42	1,43	0,65	45,58	0,38	2,59	0,030	-1,034
10	1,70	1,66	0,76	44,69	0,42	3,25	0,203	-0,926
11	2,00	2,07	0,70	34,75	0,74	3,07	-0,265	-0,968
12	1,56	1,66	0,55	34,95	0,29	3,16	0,359	2,905
13	1,93	1,84	0,57	29,38	0,76	3,39	0,500	0,925
14	1,74	1,85	0,54	30,95	0,50	2,56	-0,612	0,185
15	1,52	1,52	0,58	38,37	0,31	2,68	-0,286	-0,038
16	1,10	0,80	0,71	64,42	0,20	2,50	0,570	-1,209

ANEXO K – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nos trinta pontos avaliados ao longo de um transeção de 600m durante a emergência da cultura do milho (2011) (média dos 6 dias avaliados)

(conclusão)

Pontos	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
17	1,49	1,23	0,92	61,87	0,15	3,40	0,789	-0,255
18	1,85	1,67	0,88	47,45	0,48	3,33	0,215	-1,151
19	1,68	1,70	0,67	39,80	0,30	3,28	0,203	0,222
20	1,6	1,52	0,79	49,23	0,42	3,25	0,555	-0,641
21	1,23	1,04	0,64	52,03	0,35	2,45	0,331	-1,069
22	1,99	1,87	1,13	56,63	0,45	3,88	0,25	-1,32
23	1,45	1,6	0,5	34,23	0,37	2,1	-0,761	-0,234
24	1,2	1,13	0,57	48,03	0,28	2,37	0,458	-0,302
25	1,68	1,76	0,6	35,58	0,47	2,61	-0,52	-0,244
26	1,61	1,52	0,7	43,82	0,53	3,09	0,799	0,069
27	0,92	0,8	0,55	59,82	0,32	2,25	1,26	0,758
28	1,25	1,29	0,7	56,3	0,18	2,72	0,196	-0,711
29	1,39	1,47	0,61	43,99	0,17	2,63	-0,159	-0,328
30	1,54	1,64	0,53	34,8	0,23	2,48	-0,633	0,552

ANEXO L – Resumo estatístico para a resistência do solo à penetração (MPa) nas quatro classes texturais ao longo da transeção por um período de 6 dias durante a emergência da cultura do milho (2011)

Classe textural	N Obs	Média	Mediana	Desvio padrão	C.V. %	Mín.	Máx.	Assi	Curt
Argilo arenosa 1	120	1,54	1,53	0,60	38,89	0,17	4,12	0,517	1,868
Franco argilo arenosa 1	192	1,65	1,66	0,68	41,24	0,29	3,39	0,130	-0,593
Argilo arenosa 2	168	1,47	1,41	0,73	49,63	0,15	3,40	0,463	-0,238
Franco argilo arenosa 2	240	1,46	1,36	0,75	51,55	0,18	3,88	0,629	0,183