

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS E AMBIENTAIS
CURSO DE AGRONOMIA

Vinicius da Silva Miguel

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO
SOLO À PENETRAÇÃO EM SISTEMAS DE PLANTAS DE
COBERTURA DE INVERNO**

Frederico Westphalen, RS

2021

Vinicius da Silva Miguel

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO**

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Agrônomo**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luis Santi

Frederico Westphalen, RS

2021

Vinicius da Silva Miguel

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO**

Trabalho apresentado ao curso de graduação em
Agronomia, da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a
obtenção do título de **Engenheiro Agrônomo**.

Aprovado em 09 de setembro de 2021

Prof. Dr. Antônio Luis Santi (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva (UFSM)

Eng. Agr. Caroline Montanari Giraldi (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

2021

DEDICATÓRIA

À toda a minha família, em especial ao meu pai José Luis de Bem Miguel, à minha mãe, Marcia da Silva Miguel, e à minha noiva, Aline de Fátima Rocha da Rosa, que me proporcionaram aconchego, tranquilidade, fortaleza e me incentivaram nos momentos mais difíceis dessa longa caminhada até a conclusão do curso.

AGRADECIMENTOS

A graduação e a elaboração deste trabalho passaram por diferentes etapas, conquistas, realizações, aprendizado e algumas dificuldades. E, com isso, algumas pessoas destacaram-se na minha vida me ajudando, proporcionando momentos de alegrias e me incentivando nos momentos mais difíceis. Por isso, agradeço:

- Primeiramente à Deus pela saúde, proteção e perseverança para que eu tivesse forças para seguir lutando para realizar meus sonhos e alcançar minhas metas e objetivos.

- À toda a minha família, especialmente ao meu pai José Luis, à minha mãe Marcia e à minha noiva Aline, pelo carinho e apoio incondicional de sempre. “Nos momentos mais difíceis vocês foram o meu divã”;

- Ao Professor Dr. Antônio Luis Santi, por ter aberto as portas do LAPSul para mim, pela sua inestimável amizade e por ter me orientado na elaboração deste trabalho;

- À coordenadora do curso de Agronomia da UFSM-FW, Professora Dra. Denise Schmidt, pela compreensão e disposição em me ajudar sempre que precisei;

- À todos os professores que participaram da minha formação profissional e, acima de tudo, cidadã. Professores, considero-os como sendo o coração de uma sociedade de bem;

- À todos (as) os (as) colegas e ex-colegas de LAPSul pela amizade, parceria e companheirismo de sempre, especialmente ao Fagner, Diandra, Luis F. Gerlach, Caio, Carolina Previatti e Mariana Poll, por terem me ajudado tanto na coleta de dados no campo bem como na organização dos mesmos e no arranjo da parte escrita;

- Aos colegas de turma pelas amizades que fiz, pelas experiências compartilhadas, momentos de descontração e organização de trabalhos em grupo;

Enfim, à todos aqueles que fizeram (e ainda fazem) parte da minha vida, que me auxiliaram durante esta longa e árdua caminhada na graduação e no meu cotidiano, ajudando-me a tornar, a cada dia que passa, um profissional e ser humano melhor.

RESUMO

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO

AUTOR: Vinicius da Silva Miguel

ORIENTADOR: Professor Dr. Antônio Luis Santi

A resistência do solo à penetração é um atributo físico quantificador da compactação. Dessa forma, sua quantificação é importante na manutenção da qualidade do solo, principalmente no sistema plantio direto. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência do solo à penetração e sua variabilidade espacial, em diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno. Avaliou-se a resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,40 m, em 9 diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno. Para a quantificação da dispersão espacial foram classificados os valores de CV da seguinte maneira: $CV < 12\%$ para baixa variabilidade; $12\% < CV < 60\%$ para média variabilidade e, $CV > 60\%$ para alta variabilidade. Para fins de espacialização dos resultados, foram confeccionados mapas temáticos utilizando-se o software Gs+. A resistência a penetração teve comportamento variado em função dos sistemas de plantas de cobertura e das profundidades observadas. O consórcio Aveia branca+Ervilhaca+Centeio proporcionou menores valores desta variável até a profundidade de 0,25m, enquanto que o Nabo forrageiro apresentou os menores valores de resistência a penetração abaixo de 0,25m. Já os sistemas com Aveia preta reduziram a variabilidade espacial da resistência do solo a penetração. A utilização de plantas de cobertura em consórcio é uma alternativa viável para a descompactação e proteção do solo. O sistema em pousio apresentou o menor teor de umidade, em função da menor quantidade de massa verde produzida pelas plantas voluntárias do local. A quantificação da resistência à penetração é uma importante ferramenta para a definição de estratégias de redução da sua compactação.

Palavras-chave: Plantas de cobertura. Resistência a penetração. Sistema Plantio Direto.

ABSTRACT

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO

AUTHOR: Vinicius da Silva Miguel
ADVISOR: Professor Dr. Antônio Luis Santi

Soil resistance to penetration is a quantifying physical attribute of compaction. Thus, its quantification is important in maintaining soil quality, especially in the no-tillage system. In this sense, the present work aimed to evaluate the soil resistance to penetration and its spatial variability, in different systems of winter cover crops. Soil resistance to penetration to a depth of 0.40 m was evaluated in 9 different systems of winter cover crops. To quantify the spatial dispersion, CV values were classified as follows: $CV < 12\%$ for low variability; $12\% < CV < 60\%$ for medium variability and $CV > 60\%$ for high variability. For purposes of spatialization of the results, thematic maps were made using the Gs+ software. Penetration resistance had a varied behavior depending on the cover crop systems and the depths observed. The Oat + Vetch + Rye intercropping provided the lowest values of this variable up to a depth of 0.25m, while the forage radish showed the lowest penetration resistance values below 0.25m. On the other hand, the systems with Black Oat reduced the spatial variability of soil resistance to penetration. The use of cover crops in intercropping is a viable alternative for soil decompaction and protection. The fallow system had the lowest moisture content, due to the smaller amount of green mass produced by volunteer plants in the area. The quantification of soil resistance to penetration is an important tool for defining strategies to reduce soil compaction.

Keywords: Cover plants. Penetration resistance. No-tillage system.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVO GERAL	10
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

A adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) na agricultura brasileira proporcionou inúmeras vantagens no que diz respeito ao uso, manejo e conservação do solo, principalmente para os recursos hídricos do solo e produtividade de cultivos. Para Alvarenga et. al (2001), o SPD cria um ambiente extremamente favorável às condições físicas, químicas e biológicas do solo, contribuindo para o controle de plantas daninhas, estabilização da produção e recuperação da qualidade do solo. Por outro lado, o uso do SPD associado a fatores como a mecanização das operações agrícolas e o intenso tráfego de máquinas nas lavouras, tem resultado no aumento do grau de compactação.

Segundo Reinert et. al (2008), a compactação é um grave problema para a qualidade do solo e o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, pois modifica os fluxos de água e ar no solo e reduz a produtividade das culturas agrícolas. Em trabalho realizado com híbridos de milho, em Latossolo Vermelho-Escuro distroférico, Foloni et. al (2003), constataram que a compactação comprometeu o desenvolvimento das plantas de milho, demonstrando, que o sistema radicular do milho não foi capaz de romper uma camada de solo com resistência mecânica de 1,4 MPa. Esta compactação é determinada através da redução do volume do solo, quando o mesmo é exposto à uma pressão externa. Como consequência, a compactação do solo acarreta a redução da porosidade total, ocasionando a diminuição no volume de macroporos, e o incremento do volume de microporos (NICOLOSO et al., 2008).

A resistência do solo à penetração (RP) é um dos atributos físicos mais utilizados para quantificar esta compactação, uma vez que se comporta como um método de avaliação ágil, e capaz de demonstrar o grau de qualidade estrutural do solo para o adequado estabelecimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. De acordo com Santi et. al (2014), a RP apresenta relação direta com fatores intrínsecos do solo como: a textura e a umidade. Isto vai de encontro ao que também foi observado por Campos et.al (2012), concluindo que a RP e o teor de umidade do solo apresentaram dependência espacial em todas as profundidades estudadas.

Segundo Silveira et. al (2010), a RP é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação presente no solo e, conseqüentemente, a facilidade que este oferece à penetração das raízes. As avaliações de RP permitem identificar a presença das camadas de impedimento dentro do perfil do solo, onde geralmente encontradas dentro dos

primeiros 0,15 metros. Os maiores valores de RP apresentam alta correlação com menores produções e alongação de raízes, restringindo a absorção de água e nutrientes pela planta, prejudicando a capacidade produtiva da mesma. Conforme Corado et. al (2015), a variabilidade espacial tem se mostrado uma ferramenta fundamental na interpretação dos resultados de atributos do solo, utilizando mapas para a identificação da sua degradação, bem como na recomendação de manejos para a recuperação do mesmo.

No entanto, devido ao fato de que a RP está diretamente relacionada com a umidade do solo, seus valores podem ser alterados rapidamente de uma condição limitante para outra não-limitante, em decorrência da alteração da umidade do local de coleta dos dados. Nesse sentido, para Cunha et al. (2002), *apud* Santi et. al (2014), se faz necessário uma condição ideal de umidade para a avaliação de RP, uma vez que condições de baixa umidade do solo resultam em maiores valores de RP, enquanto o aumento da umidade provoca a redução desses valores. Genro Junior et. al (2004) constatou que a RP teve grande variação temporal e foi associada ao teor de água para cada condição de densidade do solo ou estado de compactação. Logo, a definição da época de avaliação torna-se um parâmetro de grande relevância, pois o solo está exposto à externalidades que interferem direta e indiretamente na RP, como, por exemplo, a oscilação pluviométrica em determinadas épocas do ano, bem como a atuação de plantas de cobertura do solo promovendo a descompactação ou aumentando ainda mais o seu nível. Nesse sentido, é de fundamental importância a verificação do potencial de diferentes culturas, capazes de aumentar ou reduzir os valores de RP no solo (SANTI et al., 2014).

Estudando o comportamento de quatro espécies de plantas de cobertura em diferentes níveis de compactação, Jimenez et. al (2008) verificaram que a compactação em subsuperfície influenciou no crescimento de raízes das espécies estudadas, concluindo, também, que o aumento da densidade do solo na camada compactada não influenciou no comprimento radicular das coberturas avaliadas, destacando, por sua vez, o potencial do milho como planta descompactadora do solo. Assim, a utilização de plantas de cobertura pode ser encarada como uma alternativa para contornar os problemas causados pela compactação, tendo em vista que algumas espécies apresentam um sistema radicular vigoroso e de crescimento agressivo, que alcançam maiores profundidades, promovendo a abertura de poros ao longo do perfil do solo através da ação das raízes secundárias, o que resulta na redução dos índices de compactação. Além disso, o uso de plantas de cobertura permite que sejam excluídas do SPD técnicas consideradas como não-conservacionistas, como por exemplo a escarificação (SANTI et al., 2014).

Conforme Nicoloso et al. (2008), a escarificação do solo apresenta grande eficiência no rompimento de camadas até 0,30 m de profundidade com indícios de compactação. No entanto, um bom plano de rotação de culturas, com utilização de plantas com capacidade para minimizar os efeitos da compactação também é importante por promover a escarificação biológica. Com isso, se faz necessário a verificação do efeito de plantas de cobertura no SPD, que sejam economicamente viáveis e que apresentem potencial para a redução dos valores de RP no solo.

2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e quantificar a resistência do solo a penetração em diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Destacar quais sistemas apresentaram menores valores de RP.
- II. Analisar os sistemas que mostraram menor variabilidade espacial.
- III. Verificar a influência dos diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno sobre a umidade do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta de dados no campo para a elaboração do estudo ocorreu em área experimental pertencente à Universidade Federal de Santa Maria, município de Frederico Westphalen, situada nas coordenadas geográficas 27°23'54,33" S (latitude) 53°25'37,42" O (longitude), localizada na região fisiográfica do Médio Alto Uruguai, norte do Estado do Rio Grande do Sul.

O clima da região é subtropical do tipo cfa, segundo a classificação de Köppen, apresentando uma precipitação pluvial anual que varia entre 1.800 mm até 2.100 mm e temperatura média anual de 18° C (ALVARES et al., 2013). O local do experimento apresenta um tipo de solo da Unidade de Mapeamento Passo Fundo, sendo classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2006).

O trabalho baseou-se na avaliação da RP a uma profundidade até 0,40 m, em 9 diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno, onde cada sistema foi organizado em faixas de 7,0 x 49 m, sendo cada faixa subdividida em 14 parcelas de 7,0 x 3,5 m. Utilizou-se os seguintes sistemas de cobertura: Aveia preta (*Avena strigosa* L.); Aveia preta + Nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) + Centeio (*Secale cereale* L.); Nabo forrageiro + Centeio + Ervilha forrageira (*Pisum sativum* L. subespécie arvense); Aveia branca (*Avena sativa* L.) + Ervilhaca (*Vicia sativa* L.) + Centeio; Aveia branca + Ervilhaca + Nabo forrageiro; Nabo forrageiro; Azevém (*Lolium multiflorum* L.); Ervilhaca e; Pousio. Buscou-se, com o sistema 'pousio' assemelhar a uma condição de lavoura, havendo, portanto, o estabelecimento da vegetação espontânea representada pelo nabo forrageiro e azevém. O manejo da área com tais sistemas de plantas de coberturas se repetem a cada inverno desde 2018, sendo modificada apenas a cultura de verão, uma vez havendo a rotação entre as culturas de milho e soja. A cultura do milho da safra 2018/19 foi aquela que antecedeu às plantas de cobertura de inverno na área experimental no inverno de 2019 que, por sua vez, teve a soja como cultura sucessora na safra 2019/20.

A RP foi quantificada com auxílio de um sistema automatizado para a medição de compactação do solo, modelo SoloStar, marca Falker, onde foi utilizada uma haste de comprimento 0,60 m, apresentando um cone tipo 3 em sua extremidade. Foram realizadas 4 leituras de RP por parcela, no que resultou em 56 leituras em cada faixa, totalizando 504 amostras na área.

As avaliações foram realizadas em apenas uma época, posterior ao manejo dos sistemas de plantas de cobertura de inverno, executado no dia 08 de outubro de 2019, precedido dois dias após uma chuva, momento mais adequado para que não houvesse interferência da umidade do solo nos valores da RP. Para a determinação da umidade gravimétrica foram coletadas amostras de solo de cada ponto amostral (uma amostra por ponto), acondicionadas em cápsulas de alumínio com tampa sendo preenchidas até a borda superior, totalizando 126 amostras. Logo após a coleta, foi aferido o peso de cada cápsula e, em seguida, levado para a estufa para a posterior secagem do material, à 105° C, por onde permaneceu por, aproximadamente, 72 horas. Após secagem em estufa, o material tornou a ser pesado novamente e a diferença de peso encontrada foi entendida como a quantidade de água que estava contida na amostra.

Os resultados foram analisados através de estatística descritiva por meio do programa AgroEstat (Sistema para Análises Estatísticas de Ensaio Agrônomicos), obtendo-se a partir deste as medidas de posição (menor valor, média, maior valor), e as medidas de dispersão (desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose). Para a quantificação da dispersão espacial da RP em cada tratamento (sistemas de planta de cobertura), foram classificados os valores de coeficiente de variação (CV) segundo Warrick & Nielsen (1980,) da seguinte maneira: $CV < 12\%$ para baixa variabilidade; $12\% < CV < 60\%$ para média variabilidade e; $CV > 60\%$ para alta variabilidade.

Ainda, para fins de espacialização dos resultados, foram confeccionados mapas temáticos de RP utilizando-se o software Gs+.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados da RP média por profundidade, a partir da estatística descritiva dos dados (Tabela 1), é possível constatar que houve poucas diferenças na resistência a penetração entre os sistemas de plantas de cobertura de inverno. Na profundidade de 0,05 m, o maior valor de RP observado foi para o tratamento Pousio (0,91 MPa), enquanto a menor resistência foi observada no sistema contendo apenas ervilhaca (0,40 MPa). Para a profundidade de 0,10 m o valor mais alto de RP foi encontrado para o sistema Pousio (1,77 MPa), ao passo que os menores valores foram obtidos pelos consórcios envolvendo a ervilhaca, sendo AB+ERV+NF e AB+ERV+CE (com 1,39 MPa e 1,40 MPa, respectivamente).

Observando-se as profundidades de 0,15 e 0,20 m, os valores mais altos de RP foram encontrados nos tratamentos contendo Azevém e Nabo Forrageiro (NF), sendo que, na primeira profundidade, a gramínea atingiu o valor de 1,88 MPa, enquanto a crucífera registrou RP de 1,82 MPa. Já para a profundidade seguinte (0,20 m), a resistência encontrada foi de 1,82 MPa para os dois sistemas de cobertura do solo. Os valores menores de RP para essas duas profundidades foram demonstrados, mais uma vez, pelos consórcios AB+ERV+NF e AB+ERV+CE, com resistência de 1,70 MPa e 1,64 MPa, respectivamente.

Embora havendo redução da RP para todos os sistemas de plantas de cobertura, o Nabo Forrageiro (NF), apresentou melhor desempenho na redução dos valores de RP para as camadas abaixo de 0,25 m, quando comparado com os demais sistemas solteiros e de consórcio.

Esse melhor desempenho do NF nas camadas mais profundas do solo, pode ser atrelado ao seu sistema radicular pivotante, criando macro e microporos, que permitem o armazenamento de água e oxigênio em maiores profundidades, possuindo pouco efeito descompactador nas camadas superficiais em função do crescimento em diâmetro do sistema radicular dessa planta de cobertura.

Segundo Lanza et al. (2007), este resultado também pode ser atribuído a umidade do solo no momento da avaliação da RP, dependendo também, dos resíduos culturais oriundos da palhada produzida pela cultura antecessora ao NF.

Abaixo da profundidade de 0,25 m, os valores mais altos foram observados nos sistemas de Pousio e Ervilhaca, destacando-se esta última, principalmente, por apresentar a RP mais alta nas profundidades de 0,30, 0,35 e 0,40 m. A Ervilhaca apresentou um comportamento onde os

Tabela 1- Análise estatística descritiva da resistência do solo à penetração (MPa) para os diferentes sistemas de plantas de cobertura do solo e em diferentes profundidades.

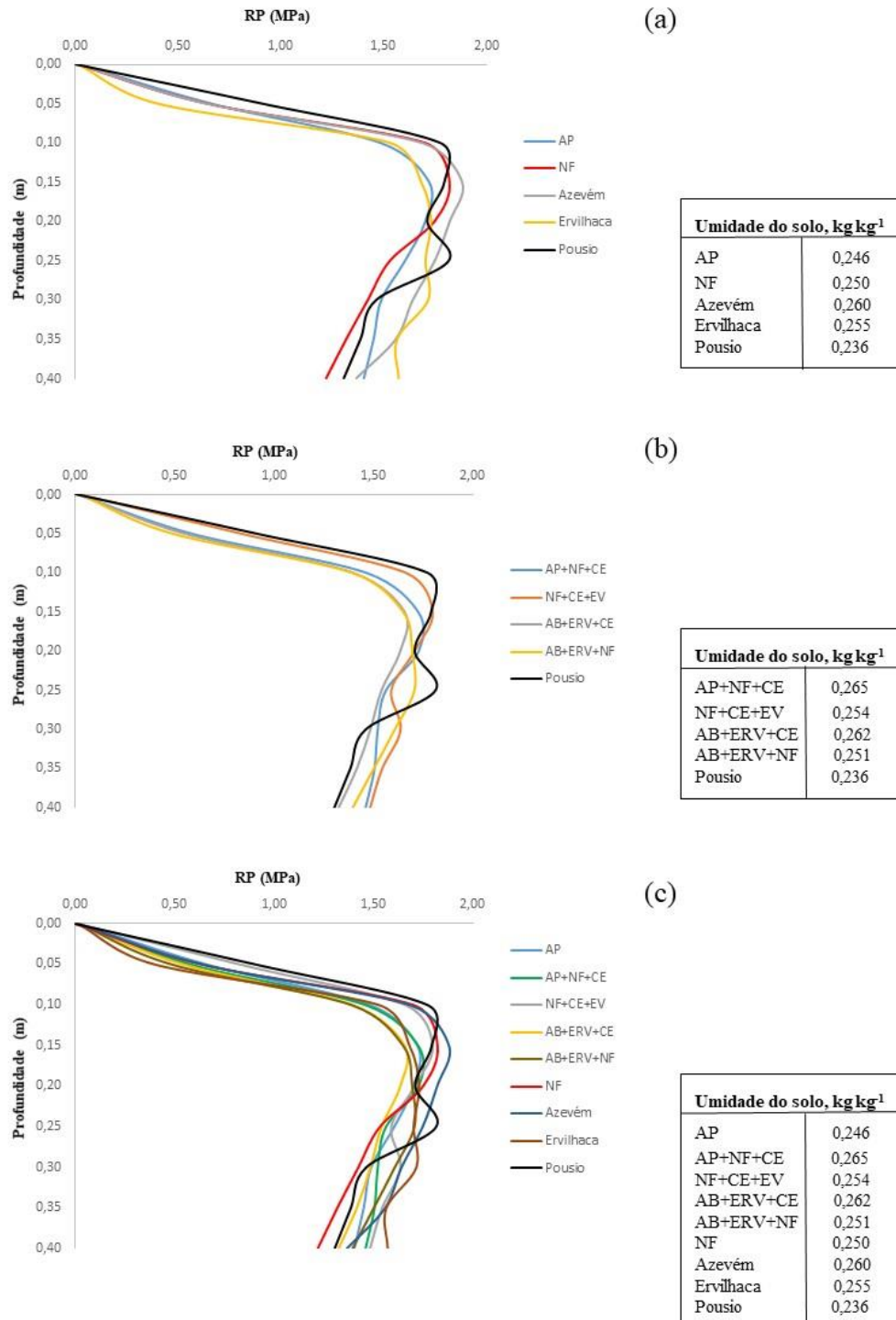
Sistemas de cobertura	Menor valor	Maior Valor	Média	Desv, Pad,	CV(%)	Assimetria	Curtose
<i>Profundidade 0,05 m</i>							
AP	0,33	1,04	0,66	0,20	30,83	0,10	-0,36
AP+NF+CE	0,20	1,31	0,58	0,28	48,47	1,33	2,49
NF+CE+EV	0,31	1,74	0,83	0,39	46,83	0,86	0,85
AB+ERV+CE	0,23	0,99	0,55	0,21	38,55	0,76	0,11
AB+ERV+NF	0,00	1,39	0,50	0,36	73,64	1,34	2,02
NF	0,24	1,24	0,64	0,31	47,64	0,64	-0,34
AZEVÉM	0,13	1,29	0,64	0,32	49,76	0,24	-0,25
ERVILHACA	0,10	0,84	0,40	0,21	51,69	0,46	0,09
POUSIO	0,38	1,57	0,91	0,37	40,22	0,58	-0,69
<i>Profundidade 0,10 m</i>							
AP	1,14	1,83	1,49	0,21	14,42	-0,02	-1,14
AP+NF+CE	1,15	1,88	1,46	0,18	12,45	0,60	0,10
NF+CE+EV	1,25	2,17	1,66	0,29	17,18	0,44	-0,79
AB+ERV+CE	1,11	1,94	1,40	0,24	17,53	0,85	0,02
AB+ERV+NF	0,98	1,98	1,39	0,26	19,00	0,72	0,42
NF	0,87	2,49	1,70	0,38	22,49	-0,14	1,41
AZEVÉM	1,11	2,30	1,69	0,35	20,63	0,02	-0,76
ERVILHACA	0,64	2,39	1,53	0,44	28,76	0,13	0,56
POUSIO	1,52	2,10	1,77	0,17	9,81	0,50	-0,65
<i>Profundidade 0,15 m</i>							
AP	1,43	2,06	1,72	0,22	12,72	0,20	-1,29
AP+NF+CE	1,47	1,91	1,73	0,13	7,56	-0,50	-0,41
NF+CE+EV	1,37	2,20	1,80	0,21	11,89	-0,01	0,48
AB+ERV+CE	1,41	1,87	1,66	0,13	7,92	-0,03	-0,61
AB+ERV+NF	0,00	2,12	1,65	0,53	32,03	-2,58	7,91
NF	1,22	2,21	1,82	0,30	16,55	-0,77	-0,15
AZEVÉM	1,53	2,78	1,88	0,35	18,42	1,67	2,76
ERVILHACA	1,34	2,14	1,68	0,21	12,68	0,54	0,52
POUSIO	1,56	1,97	1,79	0,14	7,81	-0,17	-1,48
<i>Profundidade 0,20 m</i>							
AP	1,44	2,00	1,70	0,17	9,79	0,22	-0,14
AP+NF+CE	1,49	2,15	1,73	0,19	10,80	1,23	1,04
NF+CE+EV	1,39	2,00	1,71	0,19	11,30	0,10	-1,25
AB+ERV+CE	1,32	1,96	1,64	0,20	12,50	0,27	-0,80
AB+ERV+NF	1,41	1,92	1,70	0,13	7,87	-0,41	0,41
NF	1,22	2,21	1,82	0,30	16,55	-0,77	-0,15
AZEVÉM	1,43	2,38	1,82	0,26	14,26	0,61	0,30
ERVILHACA	1,45	2,02	1,73	0,16	9,14	0,05	-0,15
POUSIO	1,39	2,16	1,71	0,19	11,05	0,94	1,54
<i>Profundidade 0,25 m</i>							
AP	1,33	1,90	1,61	0,15	9,40	0,10	0,28

AP+NF+CE	1,33	1,93	1,56	0,20	12,79	0,63	-0,78
NF+CE+EV	1,31	2,15	1,59	0,24	14,76	1,16	1,05
AB+ERV+CE	1,31	1,96	1,54	0,18	11,78	1,01	0,91
AB+ERV+NF	1,34	2,06	1,71	0,24	14,26	-0,04	-1,51
NF	1,13	2,04	1,53	0,28	18,22	0,22	-0,96
AZEVÉM	1,35	2,36	1,75	0,31	17,60	0,77	0,18
ERVILHACA	1,38	2,45	1,70	0,28	16,67	1,65	3,16
POUSIO	1,40	2,64	1,81	0,34	18,87	1,15	1,24
Profundidade 0,30 m							
AP	1,27	1,75	1,49	0,15	9,75	0,15	-0,72
AP+NF+CE	1,25	1,82	1,52	0,18	12,01	0,03	-1,33
NF+CE+EV	1,42	2,37	1,64	0,25	15,17	2,15	5,75
AB+ERV+CE	1,29	1,89	1,49	0,15	10,19	1,36	2,96
AB+ERV+NF	1,25	2,16	1,61	0,23	14,38	0,89	1,46
NF	1,16	2,03	1,43	0,22	15,34	1,66	3,93
AZEVÉM	1,14	2,64	1,64	0,41	25,23	1,27	1,24
ERVILHACA	1,34	3,50	1,71	0,53	30,98	3,30	11,72
POUSIO	0,98	1,83	1,46	0,22	14,77	-0,56	0,56
Profundidade 0,35 m							
AP	1,11	1,77	1,45	0,17	11,58	-0,18	0,23
AP+NF+CE	1,33	1,71	1,51	0,12	7,86	-0,10	-0,87
NF+CE+EV	1,28	2,09	1,55	0,22	14,01	1,19	1,97
AB+ERV+CE	1,15	1,63	1,42	0,15	10,28	-0,25	-0,51
AB+ERV+NF	1,10	1,83	1,50	0,18	12,07	-0,53	0,85
NF	1,08	1,66	1,32	0,15	11,41	0,78	1,16
AZEVÉM	1,08	2,49	1,56	0,39	25,09	1,30	1,03
ERVILHACA	1,25	2,55	1,56	0,34	21,93	2,01	5,01
POUSIO	0,87	1,79	1,39	0,26	18,50	-0,24	-0,26
Profundidade 0,40 m							
AP	1,08	1,84	1,41	0,22	15,47	0,45	-0,47
AP+NF+CE	1,35	1,80	1,46	0,12	8,40	1,75	3,49
NF+CE+EV	1,24	2,17	1,49	0,24	16,10	1,91	4,59
AB+ERV+CE	1,15	1,49	1,33	0,10	7,82	0,05	-1,00
AB+ERV+NF	1,14	1,64	1,40	0,17	12,34	-0,04	-1,24
NF	1,05	1,38	1,22	0,10	8,40	0,14	-0,93
AZEVÉM	1,12	1,85	1,37	0,19	13,95	1,24	2,13
ERVILHACA	1,18	3,69	1,57	0,63	40,34	3,29	11,56
POUSIO	1,02	1,62	1,31	0,19	14,63	0,14	-1,27

AP = Aveia preta; AP+NF+CE = Aveia Preta + Nabo Forrageiro + Centeio; NF+CE+EV = Nabo Forrageiro + Centeio + Ervilha Forrageira; AB+ERV+CE = Aveia Branca + Ervilhaca + Centeio; AB+ERV+NF = Aveia Branca + Ervilhaca + Nabo Forrageiro; NF = Nabo Forrageiro. Fonte: autoria própria.

valores de RP se mostraram estáveis a partir da camada de 0,15 m, com a RP se concentrando próximo a 1,60 MPa. Esse comportamento de não haver oscilações expressivas dos valores de RP próximo ao sistema radicular da Ervilhaca, também foi constatado por Santi et al. (2014). No entanto, de modo geral, todos os sistemas de plantas de cobertura apresentaram uma redução

Figura 1 - Resistência à penetração e umidade gravimétrica do solo para os diferentes sistemas de plantas de cobertura de inverno, em comparação entre sistemas solteiros (a), consorciados (b) e entre ambos (c).



Fonte: autoria própria.

gradual nos valores médios de RP, mesmo que ligeiramente, na medida em que se aumentou a profundidade observada.

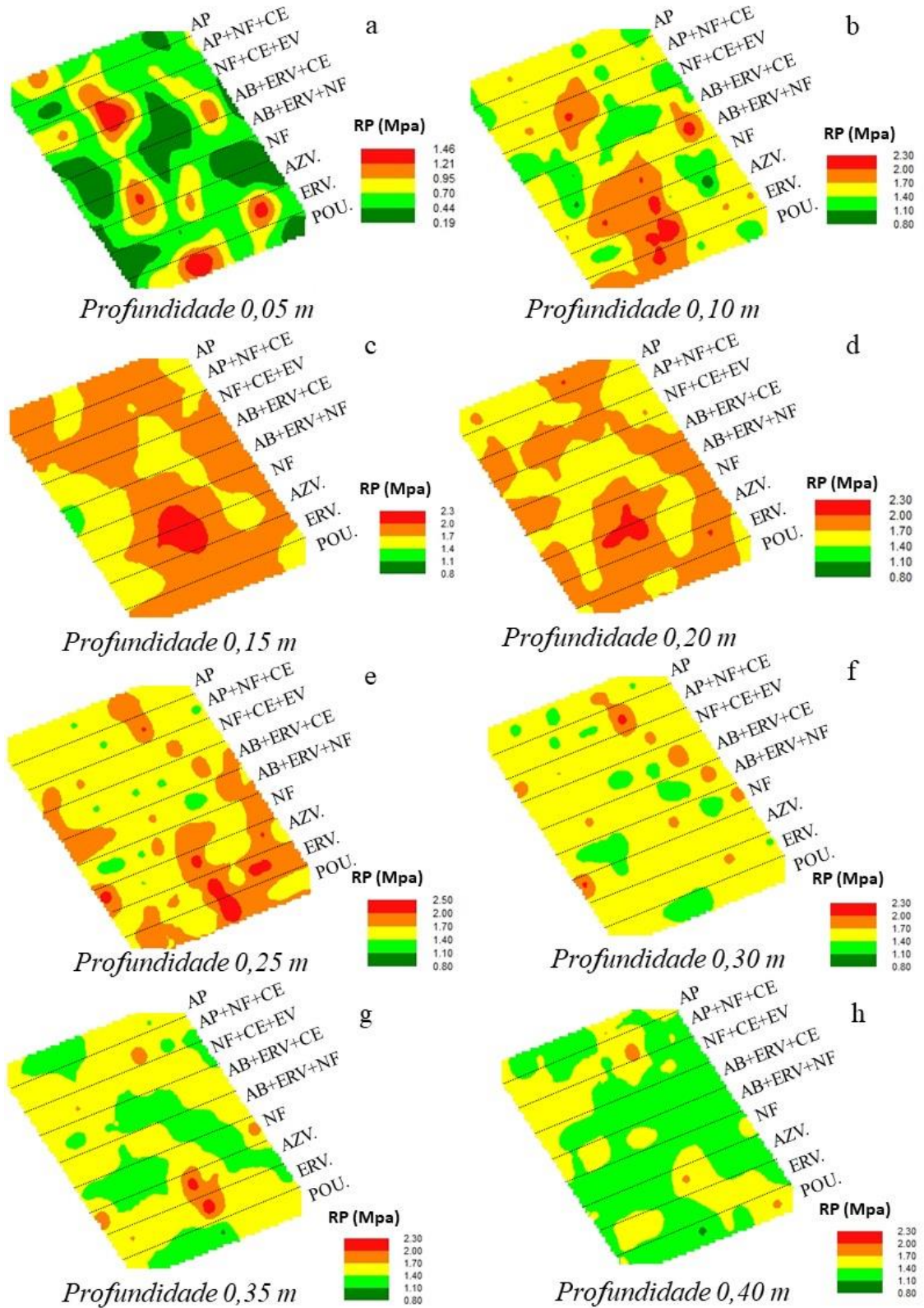
Em relação ao Pousio, este apresentou valores de RP acima dos sistemas de plantas de cobertura apenas nas profundidades 0,05 m, 0,10 m, e 0,25 m, sendo que nas demais profundidades seus valores de RP foram menores que os tratamentos NF+CE+EV, NF e ervilhaca na profundidade de 0,15 m e; AP+NF+CE, NF, azevém, e ervilhaca na profundidade de 0,20 m. Já nas profundidades de 0,30 m, 0,35 m e 0,40 m, somente o NF apresentou valores de RP inferiores ao pousio, ficando os demais sistemas de plantas de cobertura com valores médios da RP acima de 1,46 MPa, 1,39 MPa e 1,31 MPa para 0,30 m, 0,35 m e 0,40 m, respectivamente. Isso deve-se ao fato de que a área estudada não apresentava problemas severos de compactação e, atrelado a isto, houve, também, a ressemeadura natural da vegetação espontânea da área, representada pelo NF e pelo azevém.

Comparando-se apenas os sistemas de cobertura solteiros (Figura 1a) (apenas uma espécie de planta de cobertura), a aveia preta (AP) foi a que, em geral, apresentou os menores valores de RP em todas as profundidades avaliadas, sobressaindo-se como uma alternativa potencial para anteceder as culturas de verão. Vale salientar, que a escolha da AP para cultivo depende dos objetivos do produtor rural, isto é, se o objetivo está em reciclar nitrogênio consorciando-a com o nabo forrageiro e/ou uma espécie leguminosa, ou então, se está apenas em fazer uma cobertura densa no solo, como medida de proteção e supressão de plantas daninhas.

Destaca-se que a maioria dos sistemas de plantas de cobertura apresentaram os maiores valores de RP entre as profundidades de 0,10 m a 0,15 m, evidenciando que na condição avaliada, a maior RP encontrada pelas raízes das culturas para o seu desenvolvimento no perfil do solo, encontra-se nestas camadas. Esta constatação também foi relatada por Santi et al. (2014), que ao trabalharem em um Latossolo Vermelho distrófico típico, verificaram os valores de RP acima dos limites críticos estipulados para Latossolos conduzidos sob (SPD), variando de 2 a 3,5 MPa, na camada de 0,10 m a 0,20 m.

Nesse sentido, conforme Canarache (1990), valores de RP maiores que 2,5 MPa restringem o pleno crescimento do sistema radicular da maioria das culturas de interesse econômico. Torres & Saraiva (1999) trabalhando com a cultura da soja em Latossolo Roxo em estado de friabilidade, constataram que valores de RP entre 3,5 e 6,5 MPa causaram impedimento mecânico no desenvolvimento das raízes da cultura. De acordo com Merotto e &

Figura 2 - Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração nas profundidades 0,05 (a), 0,10 (b), 0,15 (c), 0,20 (d), 0,25 (e), 0,30 (f), 0,35 (g) e 0,40 m (h).



Fonte: autoria própria.

Mundstock (1999), valores de RP acima de 3,5 MPa causam limitações no crescimento das plantas, enquanto que Beutler et al. (2006) afirmam que valores de 2 a 3 MPa são prejudiciais ao estabelecimento da soja.

Assim como observado na RP, não foi constatada grandes oscilações nos valores de umidade (Figura 1c) entre os diferentes sistemas de plantas de cobertura, uma vez que o maior valor foi encontrado no consórcio AP+NF+CE (0,265 kg kg⁻¹), e o menor valor no sistema em pousio (0,236 kg kg⁻¹). Este menor teor de umidade do sistema pousio deve-se à menor quantidade de massa verde e, conseqüentemente, menor cobertura ao solo proporcionada pela vegetação espontânea da área.

No que diz respeito a variabilidade da RP (Figura 2) medida através da classificação de Warrick & Nielsen (1980,), os tratamentos tiveram um comportamento semelhante na dispersão espacial da RP.

Para a profundidade de 0,05 m (Figura 2a), com exceção do consórcio entre AB+ERV+NF, que apresentou uma alta variabilidade (CV > 60%), todos os demais sistemas de plantas de cobertura apresentaram uma variabilidade média (12% < CV < 60%), destacando-se AP com a menor variabilidade quando comparada aos demais. Comportamento semelhante foi observado na profundidade de 0,10 m (Figura 2b), onde, a maioria dos sistemas de plantas de cobertura apresentaram média variabilidade, com exceção do Pousio, que obteve uma baixa variabilidade (CV < 12%). Comparativamente, dentre todos os tratamentos a ervilhaca foi a que apresentou maior variabilidade.

Para a profundidade de 0,15 m (Figura 2c) observou-se uma maior dispersão dos dados de RP, onde os sistemas AB+NF+CE, pousio, AB+ERV+CE e NF+CE+EV foram classificados com baixa variabilidade, sendo o primeiro consórcio aquele que apresentou a menor variabilidade dentre os 9 sistemas de plantas de cobertura. Os demais tratamentos apresentaram média variabilidade e o consórcio AB+ERV+NF demonstrou a maior variabilidade dentre todos.

Já na profundidade de 0,20 m (Figura 2d), somente os tratamentos AB+NF+CE, azevém e NF apresentaram média variabilidade, tendo este último demonstrado maior variabilidade dentre todos os sistemas para esta profundidade. Todos os demais sistemas apresentaram uma classificação de baixa variabilidade, especialmente o consórcio AB+ERV+NF, com a menor variabilidade dentre todos os tratamentos estudados. Houve comportamento semelhante do efeito das coberturas de inverno nas profundidades de 0,25 e 0,30 m (Figuras 2e e 2f) onde, em

ambos os casos, o sistema contendo AP apresentou a menor variabilidade, sendo os demais classificados com média variabilidade. As maiores dispersões da RP foram verificadas nos sistemas Pousio e Ervilhaca, nas profundidades 0,25 e 0,30 m, respectivamente. Contudo, na profundidade de 0,35 m (figura 2 g) os sistemas AP+NF+CE, AB+ERV+CE, NF e AP apresentaram baixa variabilidade, onde o primeiro consórcio obteve a menor variabilidade dentre todos os sistemas. Entretanto, os demais tratamentos demonstraram valores médios de variabilidade, destacando-se o sistema de plantas de cobertura contendo o azevém, que apresentou a maior variabilidade perante os 9 sistemas de plantas de cobertura.

Na profundidade de 0,40 m (Figura 2h), o consórcio AB+ERV+CE apresentou a menor variabilidade para esta profundidade. Bons resultados também foram demonstrados pelos tratamentos AP+NF+CE e NF, que também revelaram baixa variabilidade. No entanto, todos os demais sistemas de plantas de cobertura obtiveram valores médios de variabilidade, especialmente a Ervilhaca, com o maior valor entre todos os tratamentos.

De maneira geral, tanto no sistema solteiro de plantas de cobertura do solo, bem como consorciada, a AP se destacou por apresentar menor variabilidade da RP, demonstrando a importância de sua no manejo do solo durante o inverno. Já a ervilhaca, apresentou um comportamento distinto e, em cultivo solteiro, demonstrou maior variabilidade que a AP e NF, superando, inclusive, o azevém. A utilização de plantas de cobertura em consórcios se mostrou uma excelente alternativa, tanto na mitigação e redução dos efeitos nocivos da compactação, assim como na diminuição da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração.

Resultados semelhantes foram demonstrados por Santi et al. (2014), quando, na ocasião, observaram que a camada superficial do solo apresenta maior volume de raízes pelas plantas, sofrendo, assim, maior influência desta variação, devendo-se sempre atentar para o cultivo anterior, o qual exerce grande influência nesta profundidade. Outro fator a ser considerado é a interferência do teor de umidade no solo no momento da coleta dos dados. Uma vez que será na profundidade mais superficial do solo que ocorrerá a maior variação da umidade, demonstrando os cuidados que devem ser tomados com relação à época de avaliação estabelecida.

Nesse sentido, quando a umidade do solo é muito alta, decorrente de elevadas precipitações anteriores ao momento da coleta da RP, acaba favorecendo a quantificação de menores valores desta variável. Ao passo que, quando a umidade do solo é muito baixa, os valores de RP serão mais altos. Tal fato vai de encontro ao que foi afirmado por Silveira et al.

(2010), onde foi destacado que as pequenas alterações no conteúdo de água determinam grandes variações na grandeza dependente, ou seja, na RP.

Portanto, é de grande relevância considerar o teor de umidade no momento da avaliação, bem como a cultura antecessora ao sistema de plantas de cobertura, uma vez que existe influência do sistema radicular e de sua atuação no perfil do solo com o efeito descompactador, agindo diretamente nos resultados de RP. Com isso, a utilização do penetrômetro digital, e de mapas temáticos para o monitoramento da RP, são ferramentas importantes para a elaboração de estratégias de manejo conservacionistas do solo, desde que aliadas à sistemas de manejo que respeitem as premissas do SPD adotadas na área.

5. CONCLUSÕES

- a) Dentre os 9 sistemas de plantas de cobertura, o Nabo Forrageiro demonstrou grande habilidade em reduzir a resistência do solo a penetração em profundidades abaixo de 0,25 m, enquanto o consórcio AB+ERV+CE foi mais eficiente reduzindo a resistência do solo a penetração acima desta profundidade.
- b) A aveia preta, tanto em cultivo solteiro como consorciada com as demais espécies, apresentou grande eficiência na redução da variabilidade espacial da resistência do solo a penetração.
- c) A utilização de plantas de cobertura em consórcio é uma alternativa viável que resulta na união de diferentes características desejáveis para a descompactação e proteção do solo.
- d) O sistema em pousio apresentou o menor teor de umidade, em função da menor quantidade de massa verde produzida pelas plantas voluntárias do local.
- e) A quantificação da resistência do solo à penetração é uma importante ferramenta para a definição de estratégias de redução da compactação do solo.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Ramon Costa et al. **Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto**. Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2001.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, nº 6, p. 711 – 728, 2013.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. **Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.10, n.3, p.639-645, 2006.

CAMPOS, Milton César Costa et al. **Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM**. Revista Agro@mbiente On-line, v. 6, n. 1, p. 09-16, 2012.

CANARACHE, A. **PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration**. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.16, n.1, p.51-70, 1990.

CORADO, Fabriciano da Cunha et al. Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1353-1361, 2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

FOLONI, José Salvador Simoneti; CALONEGO, Juliano Carlos; LIMA, Sérgio Lázaro de. **Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 477-484, 2004.

JIMENEZ, Rodrigo L. et al. **Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, p. 116-121, 2008.

LANZANOVA, Mastrângello Enívar et al. **Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. **Wheat root growth as affected by soil strength**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa - MG, v.23, p.197-202, 1999.

NICOLOSO, Rodrigo da Silveira et al. **Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja.** Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

REINERT, Dalvan José et al. **Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

SANTI, Antônio Luis et al. **Plantas de cobertura de inverno e a variação espacial e temporal da resistência do solo a penetração.** Revista Plantio Direto-Edição, v. 140, p. 11, 2014.

SILVEIRA, Dreid de Cerqueira et al. **Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia.** Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja.** Londrina: Embrapa Soja, 58 p., 1999.

WARRICK, A. W. **Spatial variability of soil physical properties in the field.** Application of soil physics., p. 319-344, 1980.