

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA
MESTRADO

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO EM ZONAS DE
MANEJO COM DIFERENTES PRODUTIVIDADES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUIZ FERNANDO MACHADO KRAMER

GUARAPUAVA-PR

2012

LUIZ FERNANDO MACHADO KRAMER

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO
DIRETO EM ZONAS DE MANEJO COM DIFERENTES PRODUTIVIDADES**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller

Orientador

GUARAPUAVA-PR
2012

Catálogo na Publicação
Biblioteca da UNICENTRO, Campus CEDETEG

Kramer, Luiz Fernando Machado
K86a Atributos químicos e físicos de um latossolo sob plantio direto em zonas de manejo com diferentes produtividades / Luiz Fernando Machado Kramer. – Guarapuava, 2012
xii, 49 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2012

Orientador: Marcelo Marques Lopes Müller

Banca examinadora: Aline Marques Genú, Antônio Luiz Santi

Bibliografia

1. Agronomia. 2. Produção vegetal. 3. Solo. 4. Fertilidade do solo. 5. Qualidade física do solo. 6. Produção - solo. 7. Zonas uniformes - solo. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

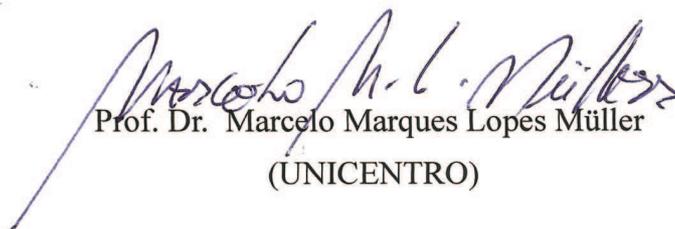
CDD 631.4

LUIS FERNANDO MACHADO KRAMER

**“ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO
DIRETO EM ZONAS DE MANEJO COM DIFERENTES PRODUTIVIDADES”.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

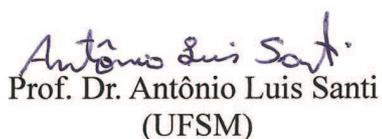
Aprovada em 27 de fevereiro de 2012.



Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller
(UNICENTRO)



Profa. Dra. Aline Marques Genú
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Antônio Luis Santi
(UFMS)

GUARAPUAVA-PR
2012

Aos meus pais, Luiz e Tereza, que são a luz que me orienta e fonte de inspiração.
Às “minhas vidas”, Josiane e Luiz Eduardo, que sempre estiveram ao meu lado, me
amparando e apoiando. Esse trabalho também é de vocês.

DEDICO

"A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar".

Eduardo Hughes Galeano

AGRADECIMENTOS

O filósofo grego Cícero afirmava “ser a gratidão não só a maior de todas as virtudes, mas a origem de todas as outras”.

Tenho uma fé que transcende os limites da compreensão. Sou grato a Deus.

Fui ensinado a prezar sempre pela honestidade e amar o próximo. Sou grato aos meus pais Luiz e Tereza.

Compreendi que amor não se explica, se sente. Sou grato ao meu filho Luiz Eduardo.

Aprendi a diferença entre compromisso e comprometimento. Sou grato a minha esposa Josiane.

Descobri que percorrer trilhas desconhecidas é mais seguro quando o Mestre está ao nosso lado. Sou grato ao Professor Orientador Marcelo Marques Lopes Müller, pelo companheirismo, estímulo e comprometimento.

Percebi claramente o significado de “dom de ensinar”. Sou grato aos Professores Cassio Antônio Tormena, Aline Marques Genú, Luciano Farinha Watzlawick e Jackson Kawakami.

Percebi que as verdadeiras conquistas nunca são alcançadas pelas mãos de uma só pessoa. Sou grato aos estudantes Cristiano Ortolan, Fábio Ortolan, Marcelo Vicensi, Alex Benaski, Willian Satil, Alex Renan Nouvaczik, Tales Roberto Galina, Éliton Ianiski, Ivan Kowaltschuk e Ronaldo Nascimento, além dos Engenheiros Agrônomos Diovane Caon e Patrikk John Martins. Minha gratidão especial ao colega Mestrando Engenheiro Agrônomo Leandro Michalovicz, pela imensurável colaboração.

O que difere as instituições de ensino são as pessoas que sem empenham em fazer dela uma verdadeira Academia. Sou grato a todos os professores e colaboradores do Programa de Pós Graduação em Agronomia e a Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Agradeço ao Eng. Agrônomo Pellisson Kaminski, e em especial ao Grupo Reinhofer, pela cessão da área para realização do estudo, apoio e informações prestadas para a realização do trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS | iii |
| RESUMO | iv |
| ABSTRACT | v |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| | |
| 2. OBJETIVO | 4 |
| | |
| 3. CAPÍTULO I – PRODUTIVIDADE DO TRIGO E FERTILIDADE DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM ZONAS DE UM TALHÃO MANEJADO COM AGRICULTURA DE PRECISÃO | 5 |
| RESUMO..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 6 |
| 3.1. Introdução..... | 7 |
| 3.2. Material e Métodos..... | 8 |
| 3.3. Resultados e Discussão..... | 11 |
| 3.4. Conclusões..... | 25 |
| | |
| 4. CAPÍTULO II – ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM ZONAS DE UM TALHÃO COM DIFERENTES POTENCIAIS PRODUTIVOS | 26 |
| RESUMO..... | 26 |
| ABSTRACT..... | 27 |
| 4.1. Introdução..... | 28 |
| 4.2. Material e Métodos..... | 29 |
| 4.3. Resultados e Discussão..... | 31 |
| 4.4. Conclusões..... | 41 |
| | |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização das zonas com produtividades distintas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguçu-PR)..... | 9 |
| Figura 2. Mapas da distribuição espacial da produtividade do trigo (Kg ha^{-1}) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 12 |
| Figura 3. Mapas da distribuição espacial de C_{org} (g dm^{-3}) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 14 |
| Figura 4. Mapas da distribuição espacial de pH nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 16 |
| Figura 5. Mapas da distribuição espacial de m% nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 17 |
| Figura 6. Mapas da distribuição espacial de V% nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 19 |
| Figura 7. Mapas da distribuição espacial de P nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 20 |
| Figura 8. Mapas da distribuição espacial de Ca^{2+} nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 22 |
| Figura 9. Mapas da distribuição espacial de Mg^{2+} nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 23 |
| Figura 10. Mapas da distribuição espacial de K^+ nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 24 |
| Figura 11. Mapas da distribuição espacial de RP (MPa) na camada 0,00-0,10 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011)..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 12. Mapas da distribuição espacial de RP (MPa) na camada 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 33 |
| Figura 13. Mapas da distribuição espacial de UG (kg kg^{-1}) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 34 |
| Figura 14. Mapas da distribuição espacial de Ds (Mg m^{-3}) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 35 |
| Figura 15. Mapas da distribuição espacial de PT (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 37 |
| Figura 16. Mapas da distribuição espacial de Mac (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 38 |
| Figura 17. Mapas da distribuição espacial de Mic (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 39 |
| Figura 18. Velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo nas diferentes zonas de manejo (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 40 |
| Figura 19. Mapas da distribuição espacial de VIB (mm h^{-1}) nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Estatística descritiva dos dados de produtividade de cevada (2006), trigo (2007) e milho (2009), nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2010)..... | 9 |
| Tabela 2. Limites aproximados das classes para elaboração de mapas de krigagem..... | 10 |
| Tabela 3. Estatística descritiva para a produtividade do trigo nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2010)..... | 11 |
| Tabela 4. Carbono orgânico (C_{org}), pH, acidez trocável (Al^{3+}), saturações por alumínio (m) e bases (V) e fósforo (P) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 13 |
| Tabela 5. Teores e saturações (em relação à CTC total) de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 21 |
| Tabela 6. Valores de resistência a penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) nas diferentes zonas de manejo e profundidades avaliadas (Reserva do Iguaçu, 2011)..... | 31 |

RESUMO

Luiz Fernando Machado Kramer. **Atributos químicos e físicos de um Latossolo sob plantio direto em zonas de manejo com diferentes produtividades.**

Devido às características do sistema plantio direto (SPD), áreas sob este sistema têm mostrado evoluções específicas, com distintos potenciais de produtividade. Com a agricultura de precisão (AP), é possível mapear a produtividade das culturas e outras informações, bem como estabelecer interações localizadas entre atributos do solo e potencial produtivo, o que pode ser utilizado para estabelecer estratégias de manejo eficiente das lavouras. Este trabalho teve como objetivo estudar a produtividade do trigo e atributos do solo sob SPD em zonas de manejo com potenciais produtivos distintos, identificadas com técnicas de AP numa fazenda do Centro-Sul do Paraná. O estudo se desenvolveu em 2010-2011 na Fazenda Campo Bonito, município de Reserva do Iguaçu, avaliando-se duas zonas de manejo com produtividades contrastantes, denominadas Z1 e Z2. Estabeleceram-se malhas regulares de amostragem de 50 x 50 m ($\frac{1}{4}$ hectare), totalizando 16 unidades amostrais, sendo que em cada unidade foram três pontos (subamostras) amostrais para avaliar o rendimento de grãos do trigo e coletar amostras de solo para caracterização da fertilidade química e dos atributos físicos do solo. A produtividade média do trigo em Z1 foi superior (22%) àquela obtida em Z2. Concorreu, para esta diferença, a menor fertilidade química do solo em Z2, que também apresentou condições físicas do solo mais limitantes. A acidez do solo e o teor de alumínio trocável foram maiores e os teores de carbono orgânico e cátions básicos do solo foram menores em Z2, sobretudo na camada subsuperficial (0,10-0,20 m), evidenciando a importância da amostragem estratificada em profundidade nos solos sob SPD. Observou-se, também, maior resistência mecânica (RP) do solo à penetração (0,00-0,10m) e densidade (Ds) do solo (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) em Z2, enquanto Z1 apresentou maior porosidade total (PT), em função da maior porcentagem de macroporos (Mac), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo. Em concordância com essa distribuição de poros, Z1 também apresentou maior velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo. Os mapas de atributos químicos e físicos do solo apresentaram informações concordantes com os resultados de mapeamento da produtividade do trigo.

Palavras-Chaves: fertilidade do solo, qualidade física do solo, produção, zonas uniformes.

ABSTRACT

Luiz Fernando Machado Kramer. Chemical and physical attributes of an Oxisol under no-till in management zones with different grain yields.

Given the specificities of no-till (NT), crops under this system have shown specific characteristics, with different yield potentials. With the instruments of precision agriculture (PA), it is possible to map crops' productivities and other informations, as well as to establish site-specific interactions between soil attributes and yield potential what may be used to establish efficient strategies for crop management. This work aimed to study wheat grain yield and soil attributes under NT and in management zones with distinct yields, identified in a farm managed with PA techniques at South-Central Region of Paraná. The study was performed in a Farm land at Reserva do Iguaçu, evaluating two management zones with contrasting crop yields: Z1 and Z2. Regular sampling grids of 50 x 50 m (¼ hectare) were established, with a total of 16 sampling units. For each unit, three sampling points were use to evaluate wheat grain yield and collect soil samples for the characterization of soil chemical and physical attributes. Average wheat yield at Z1 was superior (22%) to that found for Z2. Concurred for this result the fact that soil chemical fertility was lower at Z2, which also had more limiting conditions in terms of soil physics. Higher soil acidity and content of exchangeable aluminum combined to lower levels of organic carbon and basic cations were observed in Z2, especially at subsuperficial layer (0,10-0,20 m), highlighting the importance of stratified sampling of the soils under NT. Moreover, Z2 also had higher mechanical resistance to penetration (RP) (0,00-0,10 m) and bulk density (Db) (0,00-0,10 and 0,10-0,20 m), while Z1 showed higher total soil porosity (PT), due to higher macroporosity (Mac) percentage, responsible for water infiltration and soil aeration In agreement with these pore distributions, Z1 also presented higher soil basic infiltration velocity (VIB) of water. The maps of soil chemical and physical attributes showed concurrent information with the results of wheat yield mapping.

Keywords: soil fertility, physical quality, grain production, uniform zones.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O sistema plantio direto (SPD) ultrapassou a marca dos 110 milhões de hectares cultivados a nível mundial, sob as mais diversas condições de clima e solo (DERPSCH et al., 2010). Em substituição ao sistema de preparo convencional do solo, o SPD foi introduzido no Brasil no início da década de 1970 para controlar a erosão e melhorar o manejo dos solos, em busca de uma agricultura mais sustentável. Na última estimativa da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (safra 2005/2006), cerca de 25,5 milhões de hectares encontravam-se sob este sistema no país (FEBRAPDP, 2006), 5,7 milhões de hectares somente no Estado do Paraná (CALEGARI; CAVIGLIONE, 2008).

Essa é uma grande conquista do país, pois sob SPD a perda de solo por erosão é reduzida e o estoque de matéria orgânica do solo (MOS) aumenta, mudanças que melhoram a qualidade do solo e a eficiência de uso da água e dos nutrientes pelas plantas, mas dependem do não revolvimento do solo, do nível de acúmulo de palha, de modificações na fertilidade do solo, da variabilidade de espécies na rotação, da dinâmica da água no solo e da dinâmica de pragas, doenças e plantas invasoras (LOPES et al., 2004). Assim, podem ocorrer evoluções distintas nas áreas de SPD, especialmente sob tipos diferentes de solo e clima, progredindo para condições mais favoráveis ou mais restritivas aos cultivos agrícolas.

A ausência de revolvimento do solo, aliada ao tráfego de máquinas, cada vez maiores e mais pesadas, traz reorganizações estruturais do perfil do solo sob SPD e leva à redução da macroporosidade (BRONICK; LAL, 2005), o que se traduz em compactação do solo próximo da superfície (TORMENA et al., 1998) e maior resistência mecânica ao crescimento das raízes (PICCININ et al., 2000), com potenciais efeitos negativos no crescimento das plantas devido à redução da disponibilidade de água e nutrientes (GIAROLA et al., 2009).

Assim, em áreas com vários anos de adoção de SPD, é comum identificar talhões ou partes de talhões (zonas uniformes) com produtividades distintas, mesmo com culturas e condições climáticas semelhantes ao longo do tempo. Como a existência da variabilidade de produtividade dentro de uma gleba é o pressuposto básico para se trabalhar com agricultura de precisão (AP) (RESENDE; SHIRATSUCHI, 2007), a adoção do instrumental de AP, a exemplo do SPD, está em franco desenvolvimento (COELHO, 2005). Ademais, aumentos dos custos de produção e das preocupações com as questões ambientais têm pressionado os produtores a melhorar o manejo das lavouras e otimizar o uso de insumos (ARRIAGA et al.,

2010), sendo fundamental, para isso, conhecer a capacidade produtiva do solo (MULLA; SCHEPERS, 1997).

Manejo por zonas uniformes, que pode ser sinônimo para AP, tem por princípio básico o manejo das variabilidades de solos e culturas no espaço e no tempo (COELHO, 2005), as quais são passíveis de identificação e análise a partir dos mapas de produtividade, considerados ponto de partida para a visualização da variabilidade espacial das lavouras, pois nenhuma informação é mais real que própria resposta da cultura (MOLIN, 2002).

O uso da AP para gerar outros mapas, além dos de produtividade, sobretudo de atributos do solo, pode auxiliar a estabelecer interações entre as condições do solo e a produtividade, possibilitando definir melhores estratégias de manejo do sistema de produção (PONTELLI, 2006). De fato, definir atributos do solo que melhor se relacionam com o potencial produtivo das lavouras é importante, pois possibilita identificar limitações ao rendimento e traçar estratégias para contorná-los. A AP é, acima de tudo, uma ferramenta de gerenciamento na agricultura (SWINTON; LOWENBERG-DEBOER, 1998).

Entretanto, quando se busca melhorar a expressão produtiva das culturas no campo, há controvérsia sobre quais atributos devem ser considerados, sendo os químicos os mais frequentemente estudados (COELHO, 2005), embora muitos trabalhos demonstrem a importância da qualidade física do solo para a produtividade das culturas (COSTA et al., 2003; TORMENA et al., 2002), sobretudo em SPD cuja compactação excessiva do solo é reconhecida (RICHART et al., 2005; TORMENA et al., 1998).

Segundo Santi (2007), que avaliou atributos do solo e produtividades de grãos em áreas comerciais sob SPD e AP, a amostragem intensiva do solo (uma amostra ha⁻¹) permitiu observar que parte da variabilidade espacial e temporal do rendimento das culturas se devia à variabilidade dos atributos químicos do solo, e que a definição de zonas de potencial de rendimento permitiu concluir que a infiltração de água no solo foi um dos principais atributos físicos com influência no rendimento das culturas, sendo determinante na variação temporal dos mesmos.

Outro problema quanto aos atributos do solo para mapeamento é o nível de dificuldade ou esforço envolvido na coleta, sendo esta uma das razões para que os atributos físicos sejam preteridos pelos químicos, considerando suposta maior facilidade de obtenção de amostras e resultados para atributos químicos, embora os custos envolvidos sejam, normalmente, os principais limitantes para qualquer escolha, determinando, inclusive, a densidade de

observações e, portanto, o nível de representatividade dos dados em relação à realidade. Em áreas de AP, é comum a coleta de 1 amostra a cada 2 ha, sendo a precisão dos mapas de disponibilidade de nutrientes aumentada à medida em que se aumenta a intensidade amostral, mas os custos com amostragem e análise de solo aumentam sobremaneira com densidades de amostragem superiores a 2 amostras ha⁻¹ (WOLLENHAUPT et al., 1994).

O que se tem percebido é que, assim como no SPD, após vários anos de adoção, ainda perdurou variações na qualidade do solo. Áreas com históricos de adoção de AP, vem apresentando variabilidade na produtividade, mesmo após intervenções localizadas de manejo de corretivos e fertilizantes. Nestes casos, se faz necessário estudos localizados, orientados pelo histórico de produtividade (zonas com potenciais produtivos distintos) visando reorientar as intervenções de manejo para minimizar essa variabilidade.

Neste contexto, estudos envolvendo amostragem estratificada de atributos químicos do solo e inclusão de variáveis físicas do solo, no reconhecimento das características espaciais de zonas distintas, podem contribuir para a evolução da AP além de manter a qualidade do solo e a sustentabilidade da produção agrícola.

2. OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade química e física do solo sob SPD, em zonas com produtividades distintas, alta e baixa, em uma área manejada com técnicas de AP na região Centro-Sul do Paraná.

3. CAPÍTULO I – PRODUTIVIDADE DO TRIGO E FERTILIDADE DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM ZONAS DE UM TALHÃO MANEJADO COM AGRICULTURA DE PRECISÃO

RESUMO

Em sua maioria sob sistema plantio direto (SPD) há vários anos, as lavouras de grãos do Centro-Sul do Paraná têm evoluído com diferentes potenciais produtivos, internamente nos talhões e entre eles dentro das propriedades. Com ferramentas de agricultura de precisão (AP), é possível identificar e analisar essas áreas, gerando informações específicas a elas e aplicáveis à melhoria do manejo das culturas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a produtividade do trigo e os atributos químicos do solo em zonas de um talhão com potenciais produtivos diferentes. O estudo foi realizado numa propriedade rural em Reserva do Iguaçu, Paraná, que no início do estudo, realizado entre 2010-2011, apresentava 25 anos de uso de SPD e cinco anos de adoção de tecnologias de AP. Foram definidas duas zonas de um talhão com potenciais produtivos distintos, denominadas zonas de manejo Z1 e Z2, nas quais se estabeleceu uma malha regular de 16 unidades amostrais com 50 x 50 m. Em cada unidade foram estabelecidos três pontos amostrais, onde se avaliou o rendimento de grãos do trigo e coletaram-se amostras de solo para caracterização química. O trigo produziu 22% a mais em Z1 em comparação a Z2. Houve diminuição do teor de carbono orgânico (C_{org}) e do pH do solo da camada de 0,00-0,10 m para a camada de 0,10-0,20 m, em ambas as zonas de manejo, sendo maiores o pH (0,10-0,20 m) e o teor de C_{org} (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) em Z1. Em Z2, os valores de alumínio trocável e saturação por alumínio aumentaram da camada superficial para a de 0,10-0,20 m, sendo que nesta camada os valores foram maiores em Z2, revelando a importância da amostragem de solo estratificada até 0,20 m em áreas sob SPD. A saturação por bases na camada subsuperficial do solo foi maior em Z1, onde os teores e saturações de cálcio e magnésio foram maiores. Quanto ao potássio, Z1 apresentou teores e saturações maiores em ambas as camadas de solo. Não houve diferença entre as zonas de manejo para os teores de fósforo. Em concordância com estes resultados, o estudo dos mapas dos atributos químicos do solo mostrou que a distribuição (%) de área nas classes de maior acidez e de menores concentrações de C_{org} e nutrientes foi maior em Z2 na comparação com Z1, relacionando-se, portanto, à menor produtividade do trigo em Z2.

Palavras-chave: *Triticum sp.*, Latossolo Bruno, fertilidade do solo, zonas uniformes.

WHEAT YIELD AND SOIL FERTILITY UNDER NO-TILL IN ZONES OF A PLOT MANAGED WITH PRECISION AGRICULTURE

ABSTRACT

Mostly under no-till (NT) for several years, grain crops of South-Central Region of Paraná State have evolved with distinct yield potentials, internally and among the plots within the farms. With precision agriculture (PA) tools, it is possible to identify and analyze these areas, generating specific information to them applicable to improve crop management. The objective of this work was to evaluate the yield of wheat and the chemical attributes of a soil under NT in areas with different yield potentials. The study was developed in a farm at Reserva do Iguaçu, Paraná State, Brazil, which at the beginning of the study, performed between 2010-2011, had been using NT for 25 years and PA for five years. Two zones of a plot with contrasting yields were defined: management zones Z1 and Z2, on which regular grids of 16 sampling units of 50 x 50 m was established. Three sampling points (subsamples) were established on each unit for evaluating the grain yield of wheat and collecting soil samples for soil chemical characterization. Yield averages were 22% higher in Z1 in relation to Z2. In both management zones, organic carbon (C_{org}) and pH decreased from 0,00-0,10 m layer to 0,10-0,20 m layer, with higher values of pH (0,10-0,20 m) and C_{org} (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) in Z1. The values of exchangeable aluminum and aluminum saturation increased from surface layer to 0,10-0,20 m, where values were significantly higher in Z2 compared to Z1, highlighting the need for stratified soil sampling in depth until 0,20 m on areas under NT. The saturation of bases on soil subsuperficial layer was higher in Z1, where concentrations of calcium and magnesium and their saturations on cation exchange capacity were either higher. About potassium, Z1 showed concentrations and saturations higher than Z1 in both soil layers. No differences between zones were recorded for phosphorus. In agreement these results, the study of maps of soil chemical attributes showed that the distribution (%) of area on classes of higher soil acidity and lower nutrient and Corg levels was higher on Z2 in comparison to Z1, relating to the lower wheat yield on Z2.

Keywords: *Triticum sp.*, Brown Latosol, soil fertility, uniform zones.

3.1. Introdução

Na prática, o sucesso do SPD, em relação aos sistemas com preparo convencional do solo, de início se deve à economia de combustível com operações mecanizadas (NAGAOKA; NOMURA, 2003), bem como de tempo e trabalho, determinando maior retorno econômico da agricultura e interesse dos agricultores em adotá-lo, sobretudo na América do Sul, onde alguns países o utilizam em até 70% da área total cultivada (DERPSCH et al., 2010).

Tecnicamente, o SPD também é vantajoso porque a existência de cobertura morta na superfície do solo resulta em processos que mantêm ou aumentam o teor de matéria orgânica do solo (MOS) e melhoram a sustentabilidade do sistema produtivo (AMADO et al., 2001; COSTA et al., 2004). O SPD altera, ainda, a dinâmica de acidez do solo e de disponibilidade de nutrientes no perfil e modifica a qualidade da MOS (ANGHINONI, 2007), o que decorre do não revolvimento e acúmulo de resíduos na superfície, nova dinâmica de água no solo, adubação sucessiva e variedade de culturas em rotação (LOPES et al., 2004).

Com a evolução desses processos e a manutenção do perfil do solo sem grandes perturbações, a localização de sub-regiões ou zonas homogêneas e com potenciais produtivos distintos nas lavouras torna-se mais fácil, sobretudo quando o produtor adota técnicas de AP. Identificar e analisar essas áreas pode levar à formação, dentro da propriedade, de unidades ou zonas de manejo (MOLIN, 2002), o qual pode ser diferenciado de acordo com a necessidade específica de cada talhão ou parte dele.

O mapa de produtividade é tido como ponto de partida para usuários e pesquisadores visualizarem a variabilidade espacial das lavouras, porque materializa a resposta da cultura aos diversos fatores que compõem o ambiente produtivo (MOLIN, 2002). Associando-se este mapa aos de fertilidade do solo, é possível investigar interações entre os atributos químicos do solo e o potencial produtivo das áreas, bem como sua relação com sub-regiões das lavouras de maneira que se possam definir melhores estratégias de manejo do solo e do sistema de produção (PONTELLI, 2006).

A MOS, além de considerada atributo chave para o monitoramento da qualidade do solo (MIELNICZUK, 1999), tem sido um dos principais atributos do solo cuja variabilidade espacial se correlaciona com a variabilidade espacial da produtividade de grãos em áreas sob SPD (AMADO et al., 2004). Bellé (2009), estudando áreas sob SPD, encontrou correlações positivas entre mapas de capacidade de troca catiônica (CTC), magnésio (Mg^{2+}), cálcio (Ca^{2+})

e MOS do solo e mapas de colheita de soja-soja-soja-milho (2004 a 2008). Estudando relações entre indicadores da fertilidade e da qualidade física do solo com a produtividade das culturas em área manejada com AP e SPD, Santi (2007) concluiu que, dentre os atributos químicos, o que melhor explicou o potencial produtivo de culturas de grãos foi o alto teor de potássio no solo na camada de 0,00-0,05 m, limitando absorções de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

O objetivo deste trabalho foi avaliar o rendimento do trigo e os atributos químicos da fertilidade do solo sob SPD, em duas zonas de manejo com potenciais produtivos diferentes, identificadas numa fazenda do Centro-Sul do Paraná manejada com técnicas de AP.

3.2. Material e Métodos

O estudo foi realizado entre 2010 e 2011 na Fazenda Campo Bonito, Reserva do Iguaçu, Centro-Sul Paranaense, nas coordenadas 52° 0' 19,76" de longitude Oeste e 25° 44' 50,10" de latitude Sul, com altitude média de 880 m. A precipitação anual média na região é de 1.800 a 2.000 mm, bem distribuídos nos diferentes meses do ano, caracterizando clima tipo Cfb (Köppen), com verão ameno e geadas severas no inverno (IAPAR, 2000). De acordo com mapa atualizado de solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2008), a área de estudo encontra-se na unidade de mapeamento LBd5, constituída por Latossolos Brunos distroféricos.

A propriedade foi escolhida por utilizar SPD há 25 anos e, nos cinco anos anteriores ao início do estudo, ter adotado tecnologias de AP e possuir mapas de produtividade de grãos, utilizados para definir zonas de manejo diferenciado na propriedade. Com base nos dados utilizados para gerar estes mapas, especificamente os de colheita de cevada (2006), trigo (2007) e milho (2009) anteriores ao início do estudo, foram identificadas duas zonas com potenciais produtivos distintos num mesmo talhão (Tabela 1), denominando-as Z1 e Z2 (Figura 1), que no entanto eram similares quanto à posição no relevo (terço superior), declividade (máxima de 5%) e histórico de cultivo, sendo o esquema de rotação de culturas do talhão de duas safras de soja e uma de milho no verão a cada três anos, além de lavouras de trigo e cevada intercaladas a lavouras de aveia forrageira com integração lavoura-pecuária (bovinos) no inverno, em ocorrências variáveis. A adubação, no caso das culturas de grãos, é baseada na expectativa de colheita e na estimativa de exportação de nutrientes pelos grãos.

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados de produtividade de cevada (2006), trigo (2007) e milho (2009), nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2010).

| Zona de manejo | Média | Mínimo | Máximo | DP | CV |
|--------------------|----------|---------|----------|---------|-------|
| Cevada 2006 | | | | | |
| Z1 | 3462,49 | 1750,16 | 4995,00 | 649,52 | 19,02 |
| Z2 | 3126,34 | 1750,06 | 4998,50 | 686,79 | 21,87 |
| Trigo 2007 | | | | | |
| Z1 | 3311,54 | 1750,06 | 4998,50 | 761,17 | 22,98 |
| Z2 | 1491,15 | 1000,47 | 3808,46 | 327,37 | 21,94 |
| Milho 2009 | | | | | |
| Z1 | 10217,89 | 4037,82 | 13709,05 | 1810,55 | 17,64 |
| Z2 | 7531,53 | 4857,43 | 13348,84 | 1150,24 | 15,27 |

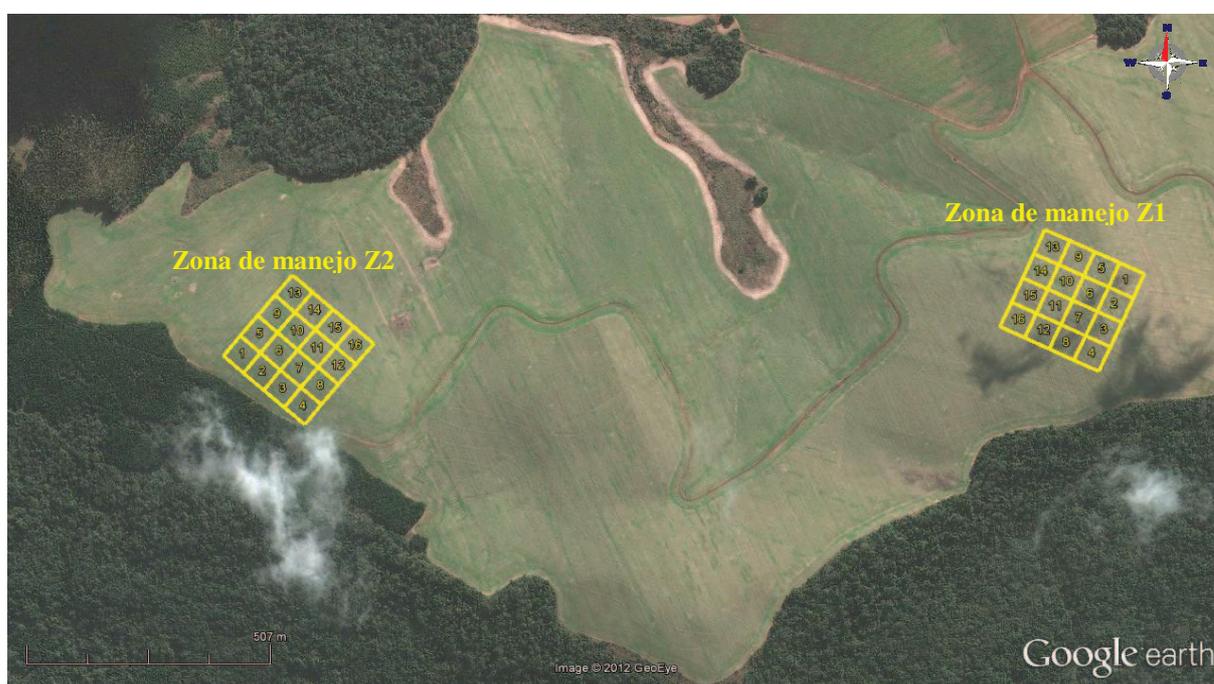


Figura 1. Localização das zonas com produtividades distintas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu-PR).

Fonte: Google Earth, 2012.

Em cada zona, foi estabelecida uma malha regular com 16 unidades amostrais de 50 x 50 m (Figura 1), perfazendo 4 ha. Com três pontos amostrais por unidade (subamostras), foram 48 observações por zona para avaliar o rendimento do trigo (cv. BRS Guamirim), semeado e adubado com 334 kg ha⁻¹ de 09-25-24 em junho de 2010. Em cada ponto amostral, colheram-se as plantas de 1 m² em novembro de 2010, as quais, após debulha e pesagem dos grãos, originaram os dados de produção (kg ha⁻¹), corrigidos para umidade de 130 g kg⁻¹.

Para avaliar os atributos químicos do solo, colheram-se amostras com trado holandês em cada ponto amostral em abril de 2011, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,1-0,20 m, totalizando 96 observações zona⁻¹. As análises foram feitas no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da UNICENTRO, conforme metodologia descrita por Pavan et al. (1992) para determinação de: pH (CaCl₂), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al³⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) trocáveis, fósforo disponível (P-Mehlich) e carbono orgânico (C_{org}).

Para estes resultados, foram criadas classes de mapeamento de forma a possibilitar o estudo da distribuição espacial com pelo menos quatro classes. Sempre que possível, foram utilizados como valores limites de algumas dessas classes os valores utilizados para interpretação da fertilidade do solo para a cultura da soja no Paraná (SFREDO et al., 1999), em virtude de ser esta uma recomendação oficial para o Estado e para a cultura financeiramente mais importante no sistema de rotação da área. No caso dos parâmetros não contemplados por Sfredo et al. (1999), optou-se pelos níveis interpretativos apresentados por Raij et al. (1997) para saturação por bases do solo (V) e pH (CaCl₂), e Comissão (2004) para C_{org} e saturação por alumínio (m), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Limites aproximados das classes para elaboração de mapas de krigagem.

| Parâmetro ⁽¹⁾ | Classes | | | | Fonte |
|--------------------------|---------|-------------|-------------|--------|------------------------|
| P | - | ≤ 3,0 | 3,1-6,0 | > 6,0 | Sfredo et al (1999) |
| K | ≤ 0,10 | 0,11 – 0,20 | 0,21 – 0,30 | > 0,30 | |
| Ca | - | ≤ 2,0 | 2,1 – 4,0 | > 4,0 | |
| Mg | - | ≤ 0,4 | 0,5 – 0,8 | > 0,8 | |
| Al | - | ≤ 0,02 | 0,03 – 1,5 | > 1,5 | |
| C _{org} | | ≤ 14,5 | 14,6 – 29 | > 30 | Comissão (2004) |
| m% | < 1,0 | 1,0-10,0 | 10,1-20,0 | > 20,0 | |
| pH _{CaCl2} | ≤ 4,3 | 4,4 – 5,0 | 5,1 – 5,5 | > 5,5 | Raij et al. (1997) |
| V% | ≤ 25 | 26 - 50 | 51 - 70 | > 70 | |

⁽¹⁾ P: mg dm⁻³; K, Ca, Mg, Al: cmol_c dm⁻³; pH, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K: adimensional.

Todos os resultados foram submetidos ao teste de normalidade e as médias comparadas entre zonas pelo teste *t* para amostras independentes, e também entre profundidades no caso dos atributos químicos do solo, utilizando-se o programa ASSISTAT (2011). Na elaboração dos mapas das variáveis estudadas, nas duas profundidades e zonas, foi utilizado o programa Surfer 9.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2010) com base nos valores estimados por krigagem e dos parâmetros dos semivariogramas ajustados, realizada com o programa GS+ (ROBERTSON, 1998), e quantificando-se os percentuais (%) de área referentes a cada classe das variáveis com o programa IDRISI TAIGA (EASTMAN, 2009).

3.3. Resultados e Discussão

Os resultados da avaliação de produtividade do trigo são apresentados na Tabela 3. Houve diferença entre Z1 e Z2, confirmando as discrepâncias de produtividade verificadas a priori, com base nos dados gerados na propriedade para seus mapas de produtividade. A média de produtividade em Z1 foi 22% superior àquela apresentada por Z2. Os mapas de produtividade de grãos do trigo (Figura 2) apresentaram informações concordantes. Enquanto 96% da área mapeada em Z1 apresentou-se nas classes acima de 2.900 kg ha⁻¹, Z2 apresentou 76 % da área com produtividades nas classes abaixo de 2.900 Kg ha⁻¹.

Tabela 3. Estatística descritiva para a produtividade do trigo nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2010).

| Zona de manejo | Média | Mínima | Máxima | DP | CV |
|-------------------|---------------------------------|----------|----------|--------|---------------|
| | ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | | ----- % ----- |
| Z1 | 3.431,00 A* | 2.590,00 | 4.202,00 | 437,38 | 12,75 |
| Z2 | 2.676,94 B | 1.928,00 | 3.301,00 | 437,89 | 16,36 |

*Médias seguidas de letras distintas indicam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste *t* (Student). DP: desvio padrão da média; CV: coeficiente de variação.

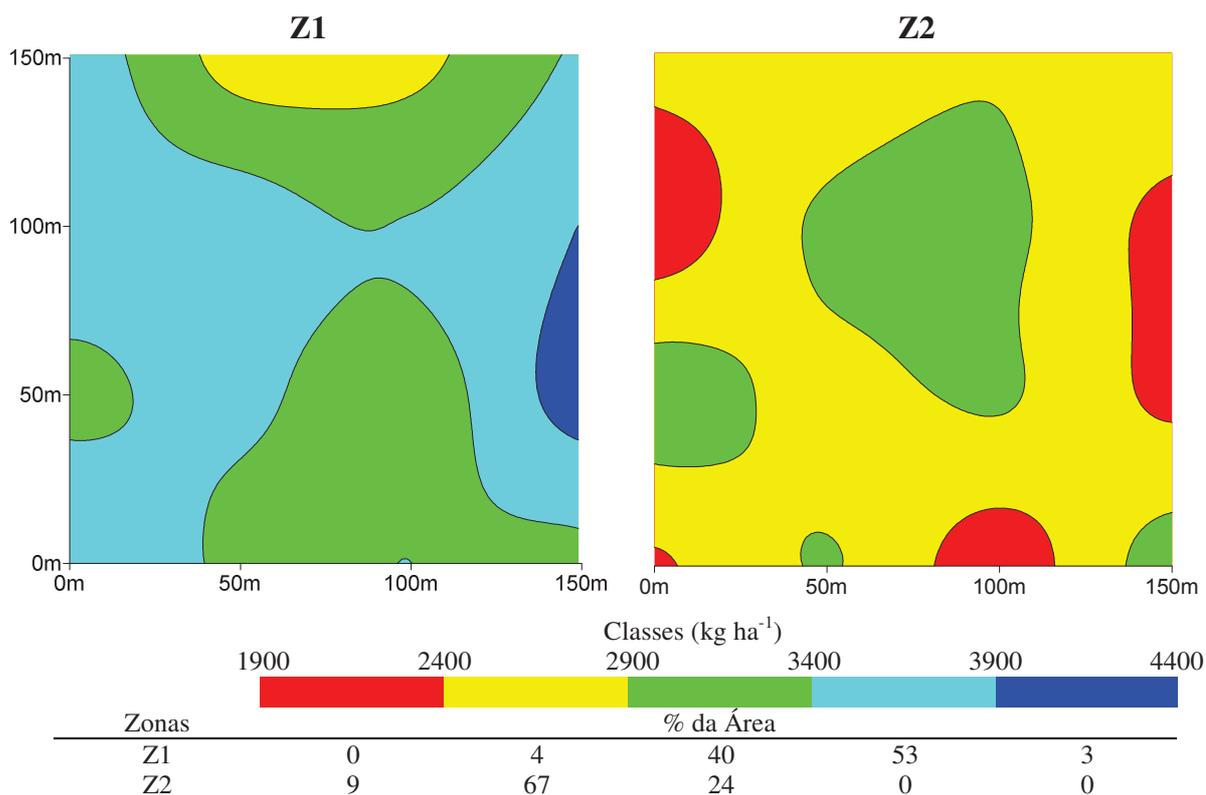


Figura 2. Mapas da distribuição espacial da produtividade do trigo (Kg ha^{-1}) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2011).

Os valores de C_{org} do solo, apresentados na Tabela 4, são considerados muito altos para o Paraná, maior que 14 g dm^{-3} (SFREDO et al., 1999), em ambas camadas de solo, indicando manutenção dos teores de MO do solo em níveis adequados com o manejo adotado (SPD), condizentes também com a condição local de clima frio e úmido (Cfb). Houve diferença significativa entre as zonas estudadas em ambas as profundidades, com teores 6,1 e 12,6% maiores em Z1 em relação a Z2, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Os níveis de C_{org} foram, também, superiores na camada superficial em ambas as áreas, resultado justificado pelo manejo sob SPD, não havendo, portanto, incorporação dos restos culturais, que permanecem como cobertura morta da superfície.

Nos mapas de C_{org} (Figura 3), as classes foram, inevitavelmente, estabelecidas acima das faixas interpretativas propostas por Sfredo et al. (1999), por serem os valores muito altos, tratando-se de solos ricos, portanto, em MOS. Os mapas também evidenciaram queda nos teores de C_{org} em profundidade, sendo possível verificar diferenças entre Z1 e Z2 em ambas as camadas, sendo que na camada 0,00-0,10 m Z1 tem a maior porcentagem de área entre 35-60 g dm^{-3} . Na camada 0,10-0,20 m, 82% da área em Z2 está entre 25-30 g dm^{-3} .

Tabela 4. Carbono orgânico (C_{org}), pH, acidez trocável (Al^{3+}), saturações por alumínio (m) e bases (V) e fósforo (P) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguazu, 2011).

| Fonte Variação | C_{org} | pH | Al^{3+} | m | V | P |
|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------|---------------|
| | $g\ dm^{-3}$ | CaCl ₂ | $cmol_c\ dm^{-3}$ | ----- % ----- | | $mg\ dm^{-3}$ |
| 0,00-0,10 m | | | | | | |
| Z1 | 34,94 A* a | 5,42 A a | 0,09 A a | 0,90 A a | 41,36 A a | 7,22 A a |
| Z2 | 32,80 B a | 5,39 A a | 0,08 A b | 0,86 A b | 39,78 A a | 7,19 A a |
| Média | 33,87 | 5,41 | 0,08 | 0,88 | 40,57 | 7,20 |
| DMS | 1,58 | 0,21 | 0,07 | 0,72 | 5,10 | 1,39 |
| CV | 6,49 | 5,37 | 119,50 | 114,66 | 17,42 | 26,84 |
| 0,10-0,20 m | | | | | | |
| Z1 | 32,66 A b | 5,18 A b | 0,17 B a | 1,74 B a | 32,87 A b | 4,94 A b |
| Z2 | 28,54 B b | 4,63 B b | 0,79 A a | 7,27 A a | 16,95 B b | 5,32 A b |
| Média | 30,60 | 4,90 | 0,48 | 4,50 | 24,91 | 5,13 |
| DMS | 1,40 | 0,15 | 0,21 | 1,72 | 4,66 | 0,94 |
| CV | 6,34 | 4,27 | 59,35 | 52,86 | 25,92 | 25,56 |

*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste t ($p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam zonas de manejo na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma zona de manejo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Em que pese a importância dos teores de C_{org} para o funcionamento do solo e seu resultado para as condições de produção das culturas, sobretudo em manejo de SPD, esta diferença corrobora os dados de produtividade do trigo. Trabalhos de Bayer et al. (1999), Ciotta et al. (2003), Meurer (2007), Silva e Sá Mendonça (2007) demonstram os benefícios do C_{org} (MO) do solo para os sistemas produtivos, em virtude da melhoria da características químicas do solo, em especial pelo aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), do poder tampão e de regular a atividade de Al^{3+} em solos ácidos.

Entretanto, considerando áreas tão próximas e com histórico recente de rotação de culturas similar, sob o mesmo clima, as diferenças de produtividade de grãos podem ser tanto efeito de condições mais limitantes de produção em Z2, mas também causa dos menores teores de C_{org} nesta zona de manejo, uma vez que a menor produção de grãos se relaciona com menor produção de biomassa em Z2, e com as culturas adicionando menos resíduos ao solo, os estoques de carbono se mantêm menores nesta zona de manejo.

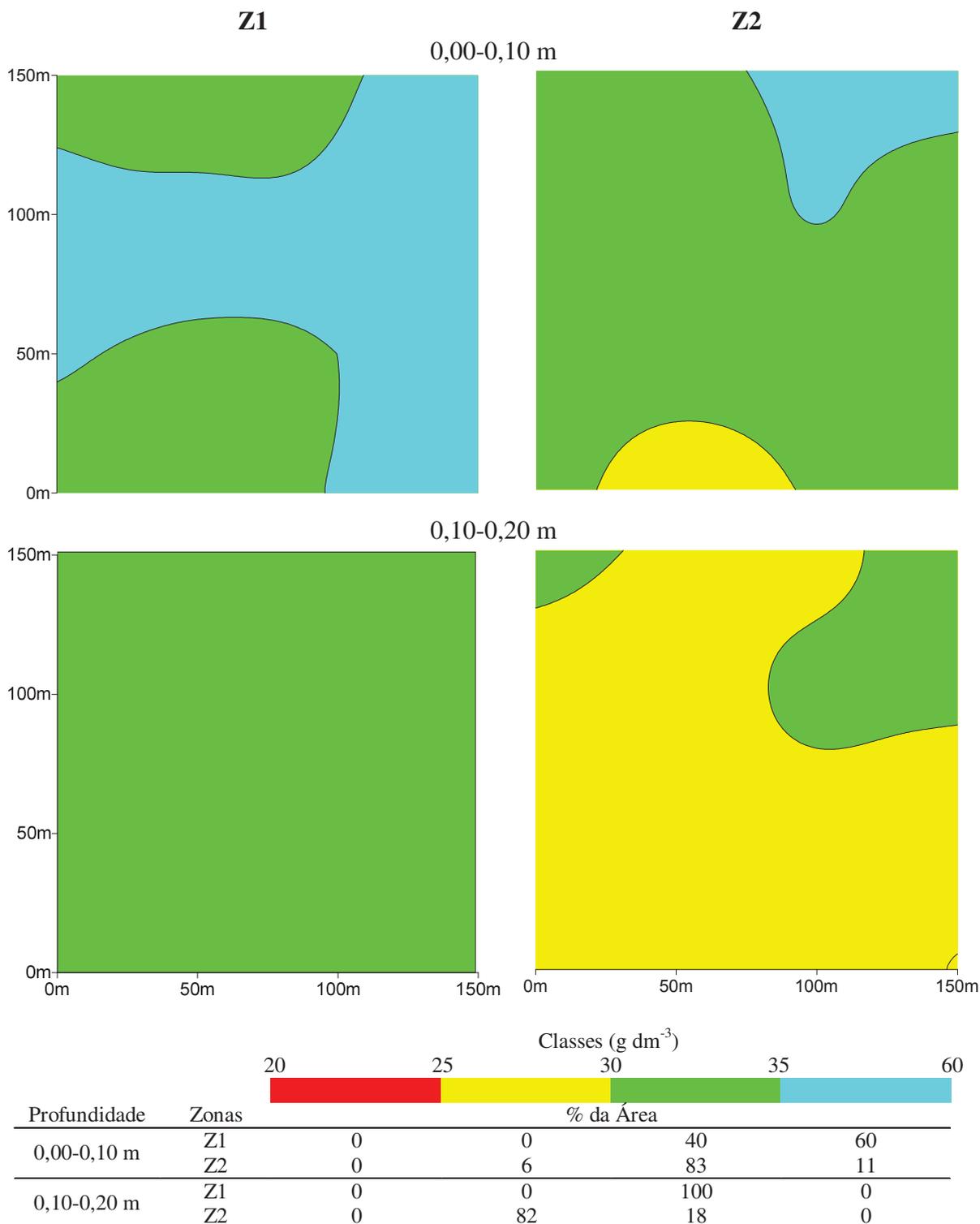


Figura 3. Mapas da distribuição espacial de C_{org} (g dm^{-3}) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Quanto ao pH, houve diferença entre Z1 e Z2 na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 4), onde Z2 mostrou solo mais ácido. Quanto às profundidades, houve queda do pH a partir da

camada superficial, em Z1 e Z2. Esta variação vertical do pH do solo em SPD também foi constatada por Trevisan et al. (2008), que afirmam ser a ausência de revolvimento do solo, sem incorporação do calcário, a causa para maior correção do pH nas camadas superficiais em detrimento das subsuperficiais. Os mapas de pH do solo nas diferentes zonas e profundidades (Figura 4) também mostram que as principais diferenças entre as zonas ocorreram na camada de 0,10-0,20 m, onde Z1 apresentou maior parte da área (94%) nas classes de valores acima de pH 5,0, enquanto Z2 apresentou 100 % da área nas classes com pH inferior a 5,0.

Os resultados evidenciam, ainda, a necessidade de amostragem estratificada do solo em SPD nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, conforme recomendação oficial para a soja no Paraná (EMBRAPA, 2006). Com pequena mobilidade do calcário a partir da superfície, sobretudo em solos argilosos (AMARAL; ANGHINONI, 2001; PÖTTKER; BEN, 1998), a camada de 0,00-0,10 m concentra os efeitos e, com os anos, se a amostragem se limitar a esta camada, não se diagnosticam necessidades de calagem diferentes em solos que, em subsuperfície, onde a eficiência da calagem é limitada, possuem condições distintas de acidez.

Os resultados de Al^{3+} (Tabela 4) foram condizentes com os de pH. A diferença entre zonas também foi na camada subsuperficial, com maior concentração de Al^{3+} em Z2. Os resultados de pH e Al^{3+} estão de acordo com os rendimentos do trigo: a zona com maior acidez do solo apresentou menor produtividade. De fato, a acidez excessiva é um fator limitante básico para a produção (QUAGGIO, 2000), e valores de pH < 5, associados a outros indicadores de acidez do solo, como a presença de Al^{3+} , limitam o rendimento das culturas (NICOLODI et al., 2008). No presente caso, os teores de Al^{3+} foram médios (0,02-1,5 $cmol_c dm^{-3}$) para o cultivo da soja (EMBRAPA, 2006), em ambas as camadas. Por outro lado, o teor de 0,79 $cmol_c dm^{-3}$ de Al^{3+} de 0,10-0,20 m em Z2 ficou acima do nível crítico para o crescimento radicular do trigo, estimado por Caires et al. (2008) em 0,3 $cmol_c dm^{-3}$.

A saturação por alumínio (m) do solo comprovou que a diferença entre as zonas se concentrou na camada de 0,10-0,20 m, onde os valores foram significativamente maiores em Z2 (Tabela 4). Os mapas de m (%) mostraram (Figura 5) correspondência com os de pH, sendo maior a proporção de área nas classes de maior saturação na camada subsuperficial em Z2: 75 % acima de 6%. Outra diferença entre as zonas foi que os valores de m (%) aumentaram em profundidade em Z2, o mesmo não acontecendo em Z1. Embora as médias observadas tenham ficado abaixo do limite de 10 % tolerado pelo trigo (NICOLODI et al., 2008), estes dados concordam com a menor produtividade em Z2, já que o Al^{3+} prejudica o

enraizamento das plantas e, portanto, a absorção de água e nutrientes (SOUZA et al., 2007).

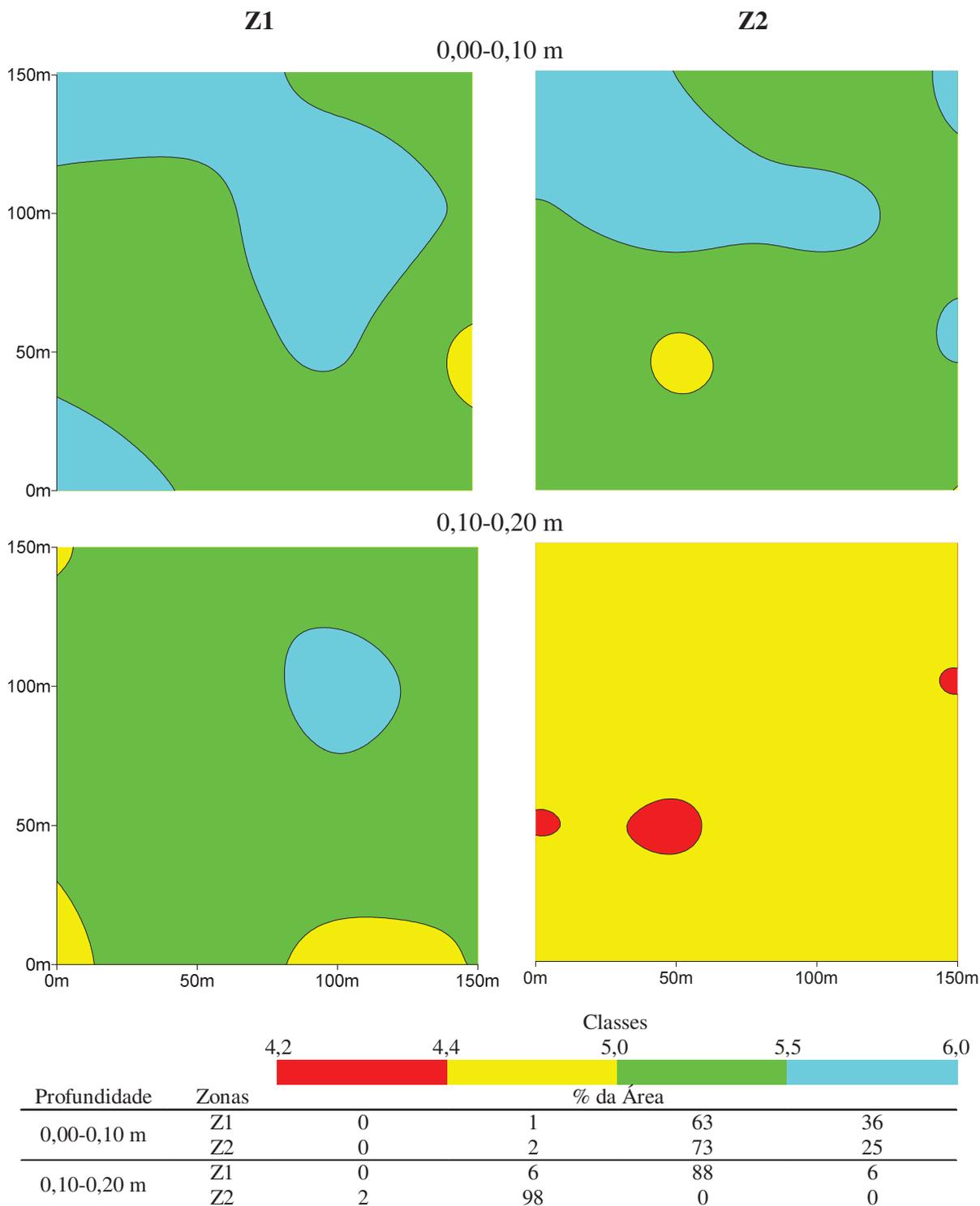


Figura 4. Mapas da distribuição espacial de pH nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Concentrações de Al^{3+} abaixo dos 0,10 m podem funcionar como barreira química,

implicando na proliferação de raízes próximo à superfície do solo. Conforme Caires (2011), a toxidez por Al^{3+} que ocorre com a acidez do subsolo é intensificada no SPD com chuvas abaixo do normal, comprometendo o enraizamento de plantas pouco tolerantes, como o trigo.

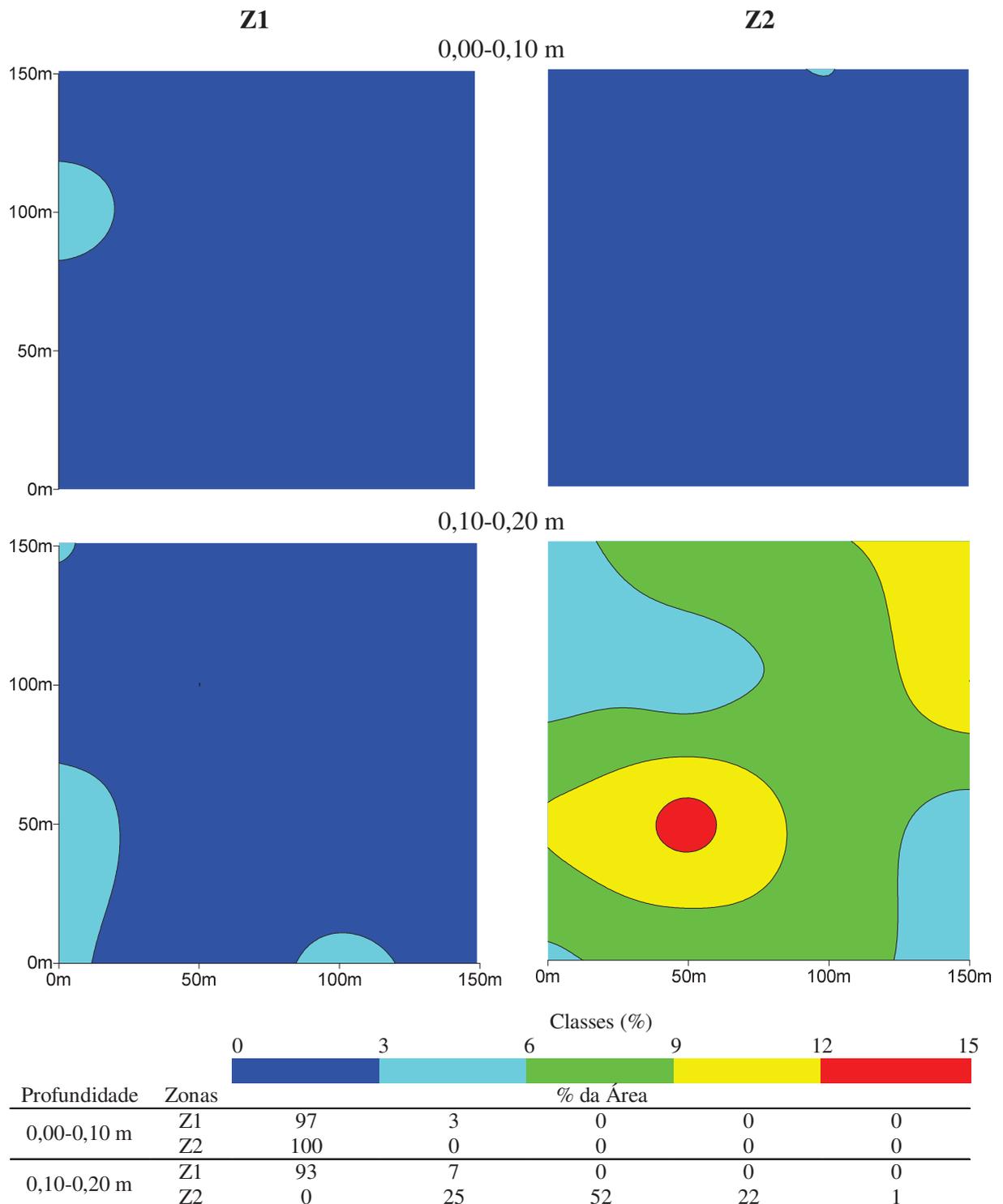


Figura 5. Mapas da distribuição espacial de m% nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011).

A saturação por bases do solo (V%) também demonstrou diferenças entre zonas em subsuperfície, onde Z1 mostrou os maiores valores (Tabela 4), em concordância com o pH, confirmando a relação direta entre os parâmetros (CATANI; GALLO, 1955; MALAVOLTA, 1987). Para o trigo, os valores, sobretudo na camada de 0,10-0,20 m, ficaram abaixo da faixa de 50 a 60% recomendada para a cultura no Paraná (COSTA, 2003), e segundo classificação estabelecida por Raij et al. (1997), os valores são todos considerados baixos, à exceção da média de 0,10-0,20 m em Z2, considerada muito baixa, justificando a menor produtividade do trigo nesta zona. Em ambas as zonas, a produtividade foi relativamente baixa em relação à região, que registra produtividades acima dos 3.000-3500 kg ha⁻¹ (FONTOURA et al., 2010). A Figura 6 ilustra o decréscimo nos valores de V% a partir da superfície, sobretudo em Z2, onde 84% da área apresentou-se na faixa de 10-20% de saturação por bases.

Quanto ao P, os teores não foram diferentes entre as zonas de manejo, em ambas as camadas de solo, observando-se, no entanto, efeito significativo da profundidade sobre os teores, que foram superiores na camada de 0,00-0,10 m, com média de 7,20 mg dm⁻³, em comparação à camada de 0,10-0,20 m, cuja média foi de 5,13 mg dm⁻³ (Tabela 4). O mapeamento dos teores de P no solo (Figura 7) confirmou esta queda dos valores em profundidade, em ambas as zonas estudadas e, diferentemente dos demais nutrientes estudados, os mapas indicaram que, na camada de 0,00-0,10 m, o teor de P foi mais uniforme em Z2, que concentrou 94 % da área na classe de valores entre 6-9 mg dm⁻³. Por outro lado, Z1 apresentou a maior proporção de área na classe de teores mais elevados, com 22% da área entre 9-12 mg dm⁻³.

Trabalhos de Costa (2008) e Rheinheimer e Anghinoni (2001) mostram que o maior teor de P na camada de superfície em SPD ocorre pela não incorporação dos fertilizantes adicionados na superfície, às menores perdas por erosão e, também, pela reciclagem proporcionada pelas plantas, as quais absorvem o P disponível de camadas mais profundas, deixando-o na superfície, quando da decomposição dos seus resíduos.

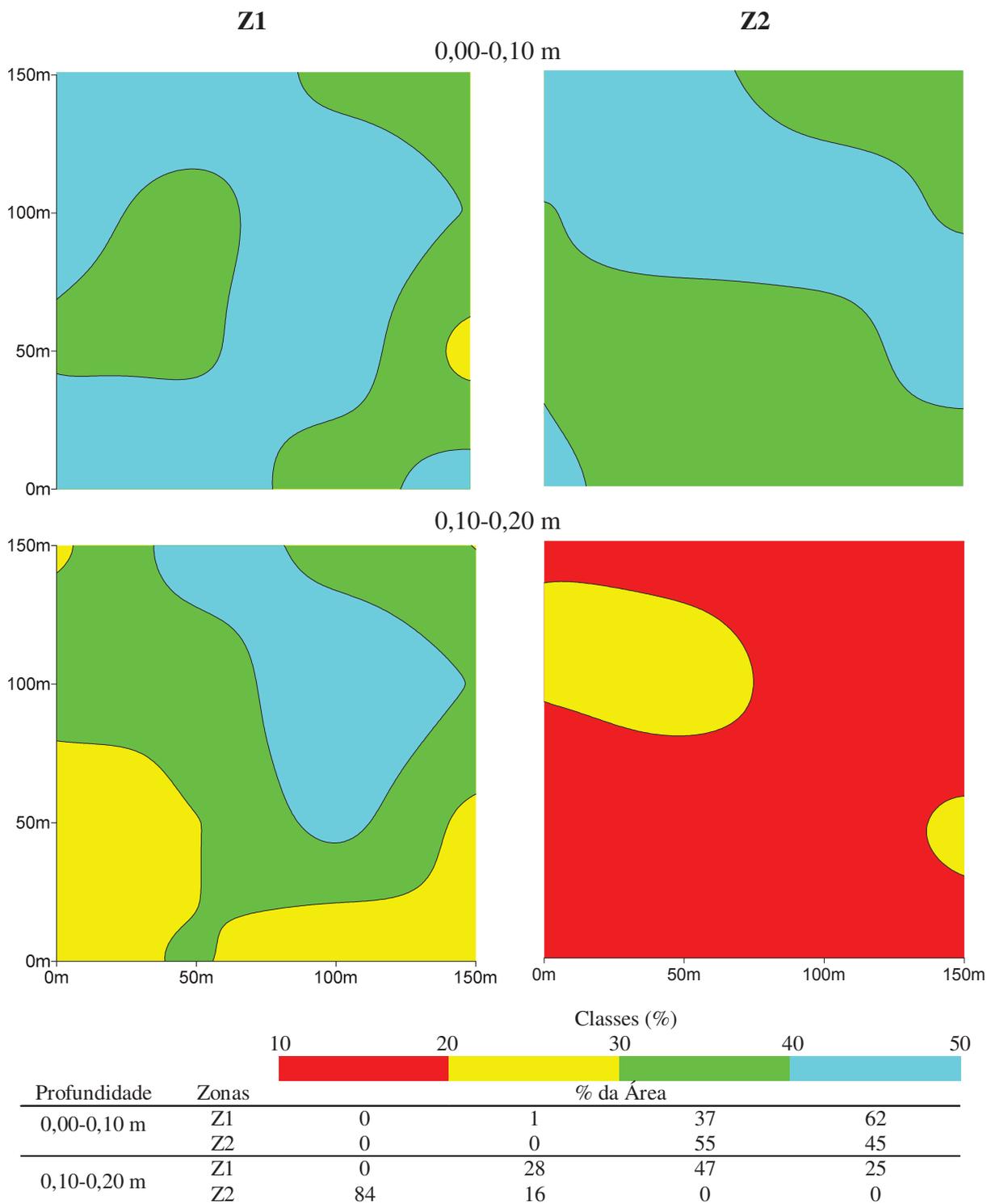


Figura 6. Mapas da distribuição espacial de V% nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguazu, 2011).

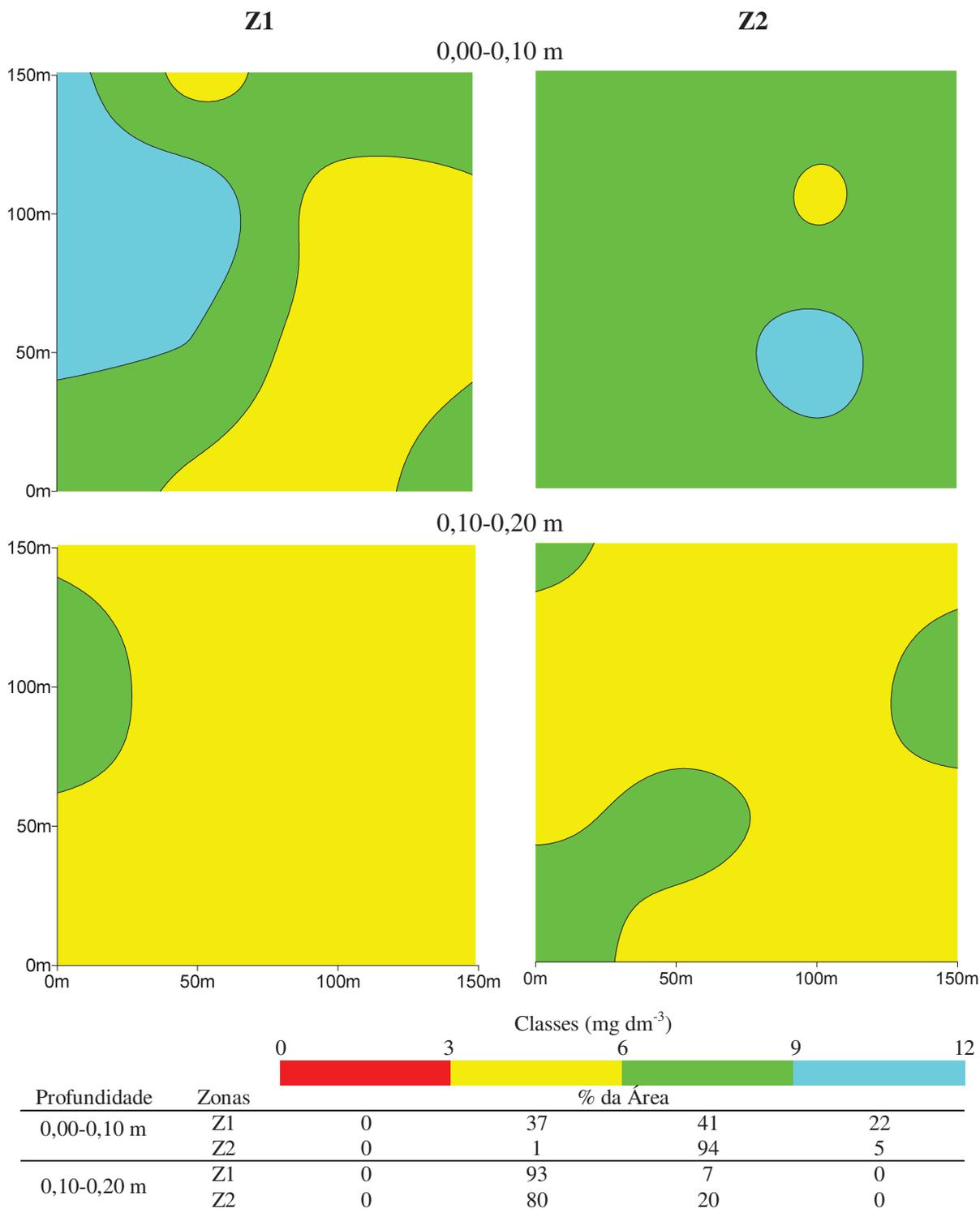


Figura 7. Mapas da distribuição espacial de P nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} não foram diferentes entre as zonas de manejo na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 5). Entretanto, houve redução nos teores de ambos os nutrientes em

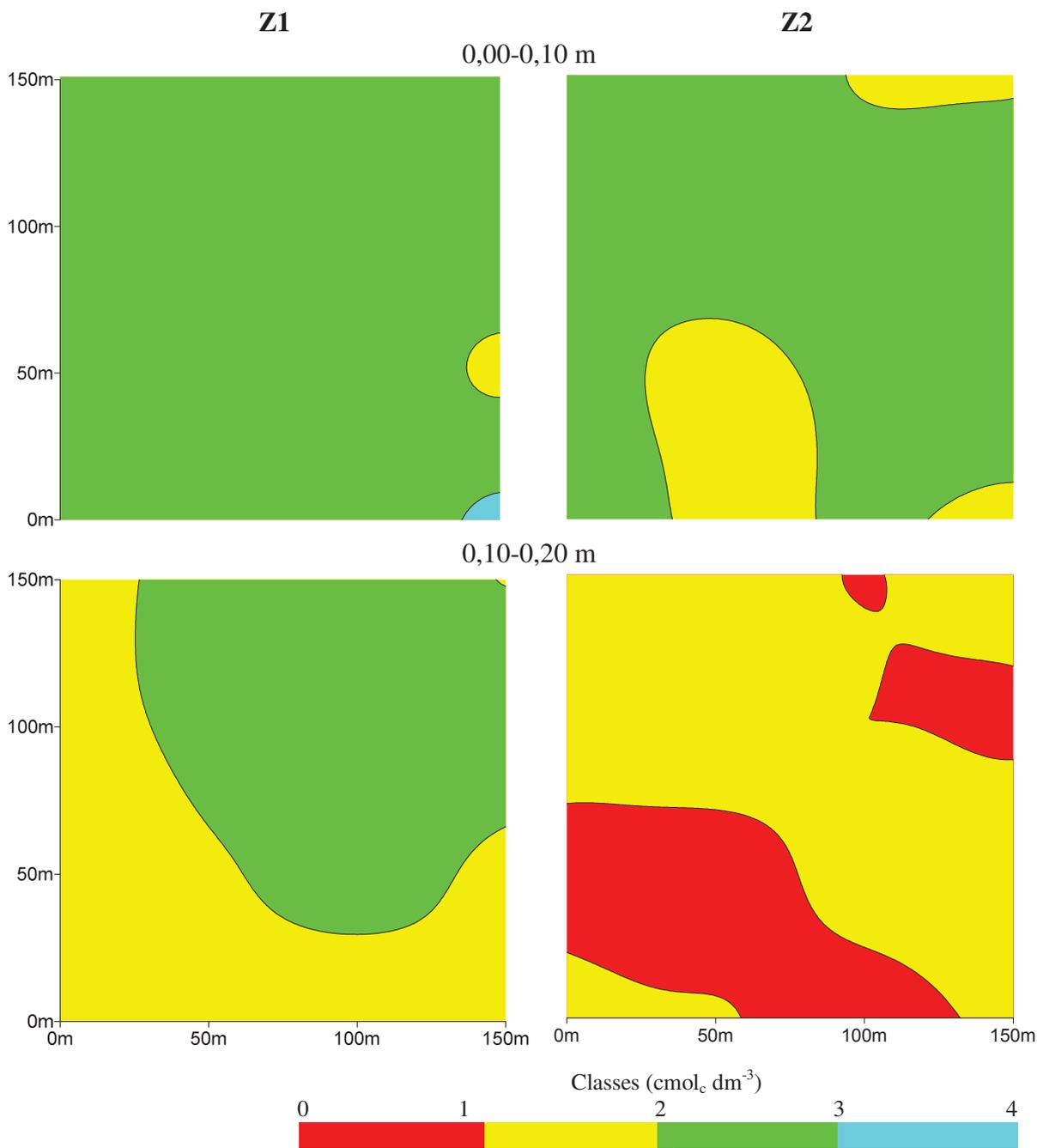
profundidade, com maior intensidade em Z2. Assim, houve diferença entre as zonas em subsuperfície, verificando-se teores significativamente menores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em Z2.

Tabela 5. Teores e saturações (em relação à CTC total) de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) nas zonas selecionadas para o estudo (Reserva do Iguaçu, 2011).

| Fonte Variação | Ca^{2+} | Mg^{2+} | K^+ | Ca | Mg | K |
|-------------------|------------------------------------|------------------|--------------|-----------|-----------|----------|
| | cmol _c dm ⁻³ | | | % | | |
| 0,00-0,10 m | | | | | | |
| Z1 | 2,42 A* a | 0,95 A a | 0,45 A a | 26,09 A a | 10,33 A a | 4,94 A a |
| Z2 | 2,22 A a | 0,95 A a | 0,38 B a | 24,86 A a | 10,64 A a | 4,27 A a |
| Média | 2,32 | 0,95 | 0,42 | 25,48 | 10,49 | 4,61 |
| DMS | 0,25 | 0,14 | 0,06 | 3,31 | 1,96 | 0,80 |
| CV | 15,28 | 20,68 | 21,11 | 18,04 | 25,94 | 23,96 |
| 0,10-0,20 m | | | | | | |
| Z1 | 1,98 A b | 0,78 A b | 0,38 A a | 20,75 A b | 8,15 A b | 3,97 A a |
| Z2 | 1,08 B b | 0,48 B b | 0,22 B b | 10,29 B b | 4,60 B b | 2,06 B b |
| Média | 1,53219 | 0,63 | 0,30 | 15,52 | 6,37 | 3,01 |
| DMS | 0,25 | 0,11 | 0,06 | 3,18 | 1,38 | 0,71 |
| CV | 22,98 | 24,69 | 30,01 | 28,40 | 30,01 | 32,92 |

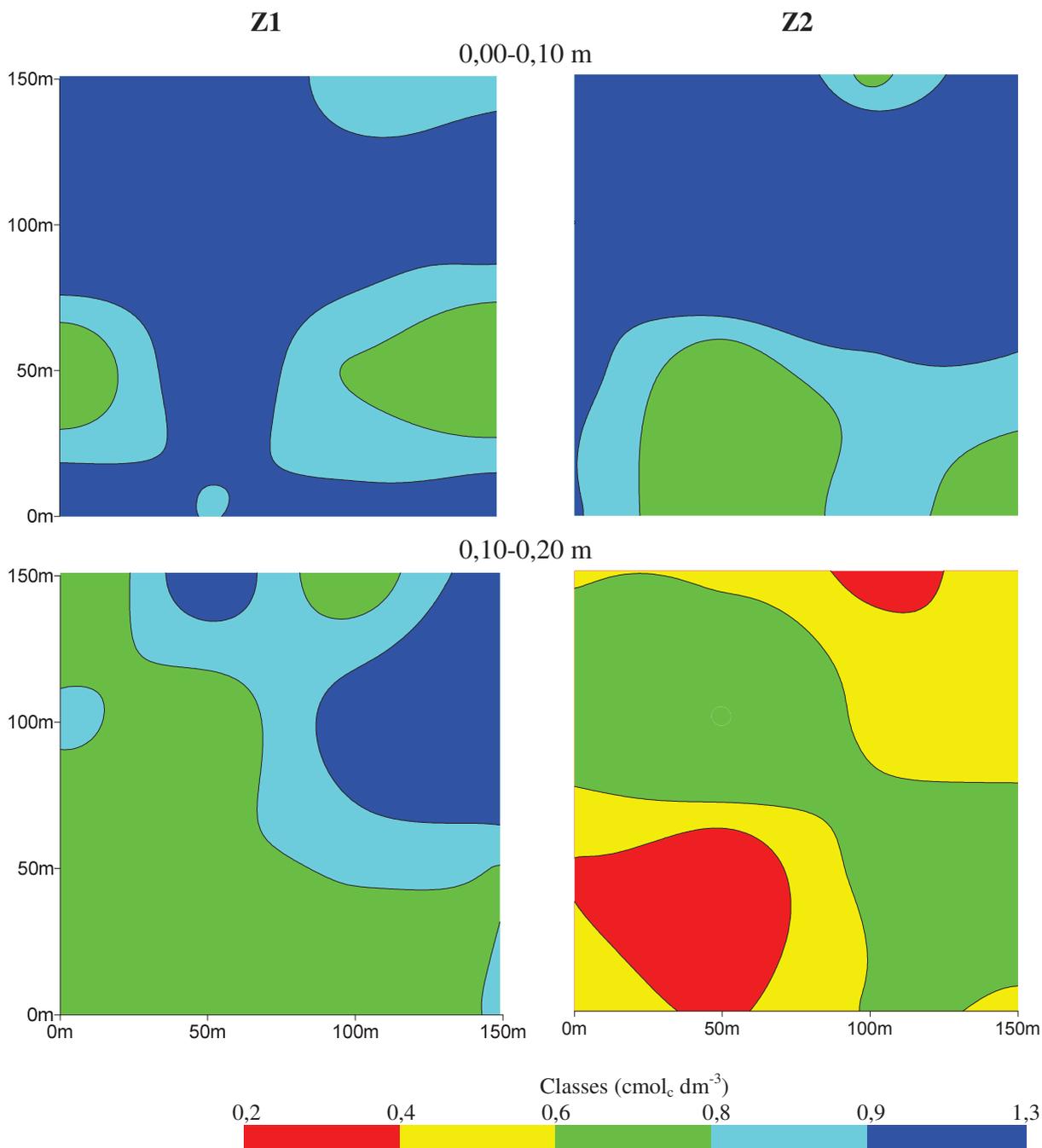
*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste t ($p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam zonas de manejo na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma zona de manejo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

No mapeamento, observou-se que, na camada de 0,10-0,20 m, 55 % da área estava na classe entre 2-3 cmol_c dm⁻³ de Ca^{2+} em Z1. Nesta mesma camada, Z2 apresentou 67 % da área com teores < 2 cmol_c dm⁻³ de Ca^{2+} (Figura 8). No caso do Mg^{2+} , considerando-se a mesma camada subsuperficial, enquanto 44 % da área em Z1 estava nas classes acima 0,8 cmol_c dm⁻³, em Z2 foram registrados 99 % da área nas classes abaixo deste valor (Figura 9) que, conforme se extrai da tabela 1, é considerado o nível crítico de Mg^{2+} no solo, entre as classes de média e alta fertilidade.



| Profundidade | Zonas | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|-------|-----------|----|------|-----|---|
| | | % da Área | | | | |
| 0,00-0,10 m | Z1 | 0 | 1 | 98,5 | 0,5 | |
| | Z2 | 0 | 18 | 82 | 0 | |
| 0,10-0,20 m | Z1 | 0 | 45 | 55 | 0 | |
| | Z2 | 33 | 67 | 0 | 0 | |

Figura 8. Mapas da distribuição espacial de Ca²⁺ nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).



| Profundidade | Zonas | % da Área | | | | |
|--------------|-------|-----------|----|----|----|----|
| 0,00-0,10 m | Z1 | 0 | 0 | 10 | 25 | 65 |
| | Z2 | 0 | 0 | 18 | 22 | 60 |
| 0,10-0,20 m | Z1 | 0 | 0 | 56 | 25 | 19 |
| | Z2 | 17 | 35 | 48 | 0 | 0 |

Figura 9. Mapas da distribuição espacial de Mg²⁺ nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Diferente de Ca²⁺ e Mg²⁺, K⁺ apresentou-se em teores maiores em Z1 em relação a Z2 não só na camada de 0,10-0,20 m, mas também na camada de 0,00-0,10 m, com queda significativa dos teores de K⁺ a partir da superfície em Z2. Tal diferença de comportamento

do K^+ ficou nítida também no mapeamento (Figura 10). Enquanto 72 % da área em Z1 na camada de 0,10-0,20 m ficou nas classes acima de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, 100% da área em Z2 na mesma camada ficou nas classes abaixo deste valor.

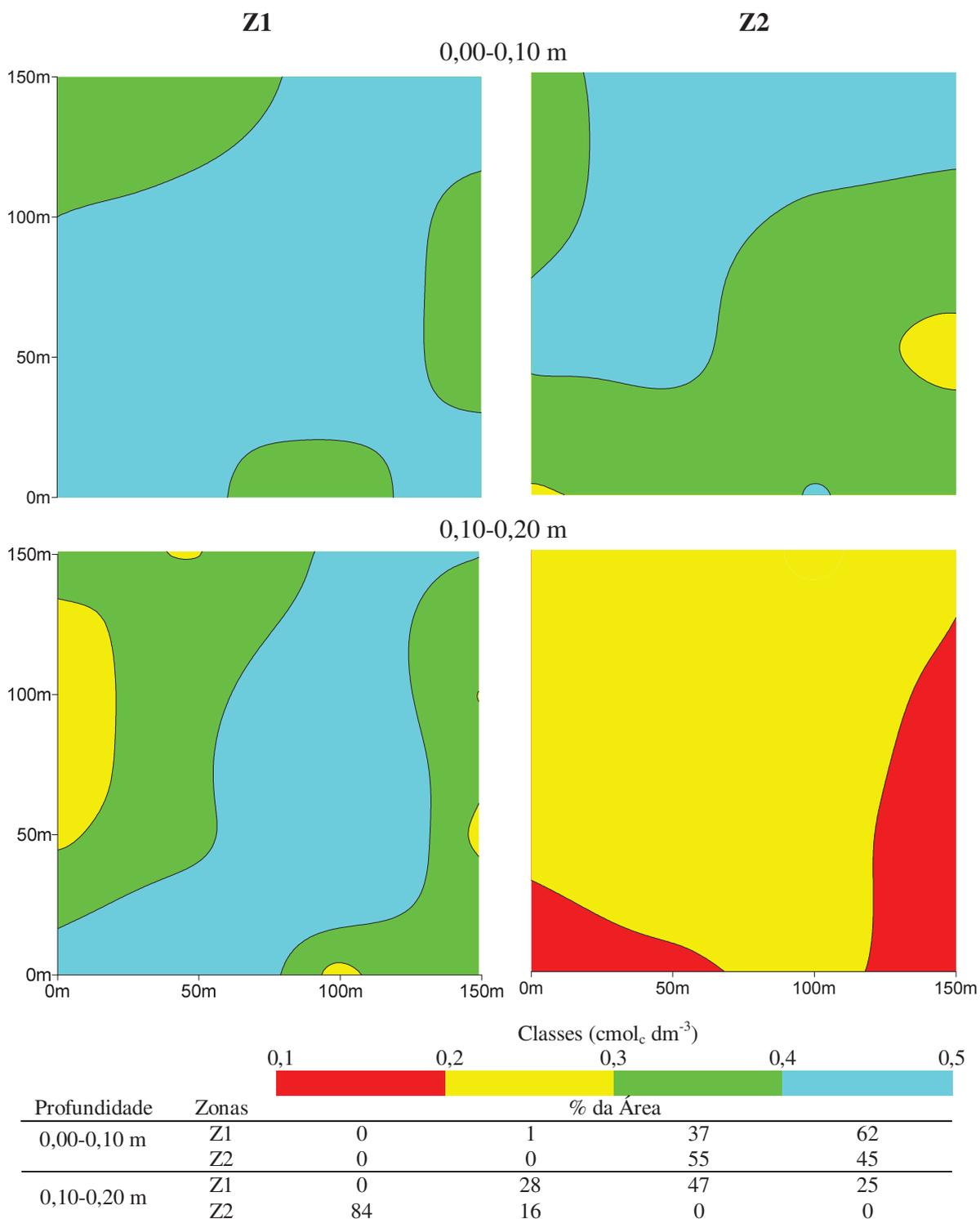


Figura 10. Mapas da distribuição espacial de K^+ nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguauçu, 2011).

Quanto às saturações de cálcio (Ca%), magnésio (Mg%) e potássio (K%), não houve diferença estatística entre as zonas de manejo para a camada 0,00-0,10 m (Tabela 5). Entretanto, na camada 0,10-0,20 m as saturações dos três elementos foi significativamente maior em Z1. Segundo Bear e Toth (1948), citado por Oliveira et al. (2001), o balanço ideal de cátions no complexo de troca seria com 65% de Ca^{2+} , 10% de Mg^{2+} , 5% de K^+ , e embora essa proporção seja variável com a cultura, o tipo de solo e, também, com o nível de saturação por bases, o nutriente com a maior discrepância em relação a estes valores guias foi o Ca^{2+} , cuja saturação mais elevada foi de 26,09% na camada de 0,00-0,10 m em Z1, chegando a apenas 10,29% em Z2 na camada de 0,10-0,20 m.

Segundo Caires et al. (2001), valores de Ca% em subsuperfície podem favorecer o crescimento do sistema radicular em maior profundidade, com reflexos positivos na produtividade das culturas. Assim, os menores valores de Ca% registrados em Z2 também estão em concordância com a menor produtividade do trigo encontrada nesta área.

3.4. Conclusões

Conclui-se que o menor potencial produtivo das lavouras na zona de manejo Z2, confirmado pelo estudo detalhado da produtividade de grãos do trigo, se deve às condições de menor fertilidade química do solo em relação à zona Z1, sendo a maior acidez do solo, o maior teor e saturação por alumínio trocável e a menor disponibilidade de nutrientes, sobretudo na camada de 0,10 – 0,20 m, os fatores relacionados à restrição de produtividade em Z2.

Em áreas sob SPD com fertilidade elevada e equilibrada na camada 0,00-0,10 m, mas com variabilidade de produtividade, é necessário amostrar o solo de forma estratificada em subsuperfície, alcançando a camada de 0,10-0,20 m, de forma a prover informações importantes para melhor manejo da fertilidade em subsuperfície, sobretudo nas zonas da propriedade onde são registrados os menores índices de produtividade.

4. CAPÍTULO II – ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO EM ZONAS DE UM TALHÃO COM DIFERENTES POTENCIAIS PRODUTIVOS

RESUMO

Embora o manejo influencie as características químicas e físicas do solo, estudos de atributos químicos do solo são mais numerosos, negligenciando-se a importância da condição física do solo para o potencial produtivo das culturas. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos do solo sob SPD em duas zonas de manejo com potenciais produtivos distintos. A propriedade escolhida para o trabalho se situa em Reserva do Iguaçu, Paraná, apresentando 25 anos de SPD e cinco anos de AP no início do estudo, realizado entre 2010-2011. A definição das zonas de manejo, Z1 e Z2, se deu com base nos dados de mapas de produtividade da propriedade, de cevada (2006), trigo (2007) e milho (2009), sendo confirmado o maior potencial produtivo em Z1 com a avaliação de produtividade do trigo nas zonas já delimitadas em 2010. Em cada zona, foram estabelecidas malhas com 16 unidades amostrais e três pontos unidade⁻¹, onde foram realizadas determinações de velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo e coleta de amostras indeformadas de solo, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Sem variação significativa da umidade gravimétrica do solo (UG) entre camadas, Z1 e Z2 mostraram aumento da resistência do solo à penetração (RP) a partir da superfície, ultrapassando o limite crítico de 2,0 MPa na camada subsuperficial. Entre as zonas, a RP foi maior em Z2 na camada superficial, e embora a UG do solo tenha sido menor nesta zona de manejo, o que pode superestimar a RP, a densidade do solo (Ds) também foi maior em Z2 em comparação a Z1, em ambas as camadas de solo. A porosidade total do solo (PT) foi maior em Z1 nas duas camadas, e como não houve diferenças significativas de microporosidade do solo (Mic) entre Z1 e Z2, esta maior PT em Z1 se deu em função da maior macroporosidade do solo (Mac) nesta zona, a qual é responsável pela infiltração de água e aeração do solo. Em concordância, Z1 também mostrou VIB maior (30%) em relação a Z2. Os mapas com a distribuição espacial dos atributos físicos do solo mostraram que as porcentagens de área nas classes de maior RP e Ds, bem como de menor PT, Mac e VIB do solo foram maiores em Z2, indicando condição física do solo mais restritiva às plantas nesta zona, relacionada ao menor potencial produtivo das culturas.

Palavras-chave: Latossolo Bruno, qualidade física do solo, zonas uniformes.

PHYSICAL ATTRIBUTES OF A SOIL UNDER NO-TILL IN ZONES OF A PLOT WITH DIFFERENT YIELD POTENTIALS

ABSTRACT

Although soil management have influence on both chemical and physical soil characteristics, studies on the chemical attributes are more numerous, neglecting the importance of soil physical condition for crops yield potential. The present study aimed to evaluate the physical attributes of a soil under NT in two management zones with different yield potentials. The property chosen for the work is situated on Reserva do Iguaçu, Paraná State, presenting 25 years of NT and five years of PA at the beginning of study, performed between 2010-2011. The definition of the management zones, Z1 and Z2, was made based on data from yield maps from the property, of barley (2006), wheat (2007) and maize (2009), with confirmation of higher yield potential on Z1 with the evaluation of wheat yield on the already outlined zones in the field in 2010. On each zone, grids with 16 sampling units were established in three points unit⁻¹, where determinations of soil basic infiltration velocity (BIV) and collecting of soil undisturbed samples (three points unit⁻¹), on 0,00-0,10 m and 0,10-0,20 m layer, were done. Without significant variation of soil gravimetric moisture (GM) between layers, Z1 and Z2 showed increase of soil resistance to penetration (RP) downwards from surface layer, exceeding the critical limit of 2,0 Mpa on subsurface layer. Between zones, higher RP was observed for Z2 on surface layer, and although UG was lower on this management zone, what could overestimate RP, soil bulk density (Db) was also higher for Z2 in relation to Z1, for both soil layers. Soil total porosity (PT) was higher in Z1 for both layers, and without significant differences of soil microporosity (Mic) between zones, this higher PT for Z1 was due to the higher macroporosity (Mac) in this zone, which is responsible for water infiltration and soil aeration. In agreement, Z1 also showed higher VIB (30%) in relation to Z2. The maps with spatial distribution of soil physical attributes showed that the percentages of areas on classes of higher RP and Ds, as well as lower PT, Mac and VIB were higher for Z2, indicating soil physical condition more restrictive to plants in this zone, related to the lower grain yield potential of the crops.

Keywords: Brown Latosol, soil physical quality, uniform zones.

4.1. Introdução

Um dos aspectos da AP é o manejo localizado das lavouras, visando coincidir a aplicação de insumos (local, momento, quantidade) e demais ações de manejo com as necessidades do solo e das plantas, que variam no espaço e no tempo (FLORIN et al., 2011). Segundo Resende e Shiratsuchi (2007), a variação dos índices de produtividade dentro de uma lavoura é a razão básica para se trabalhar com AP.

Para tanto, o ponto de partida é o mapa de produtividade das culturas (MOLIN, 2002). Em seguida, é necessário conhecer os fatores que influenciam a expressão do potencial produtivo das mesmas, como os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Na prática, a maioria dos esforços de mapeamento se concentra nos atributos químicos, pois a coleta de informações sobre a qualidade física do solo é mais trabalhosa, sendo mais racional, neste caso, realizar amostragens dirigidas ou em zonas de manejo com alta e baixa produtividade (SANTI, 2007), as quais devem ser tão pequenas e homogêneas quanto permitirem a tecnologia e os custos (DODERMANN; PING, 2004).

Para Viana (2005), quando os atributos químicos do solo encontram-se em níveis não limitantes para as culturas, novos atributos devem ser estudados. Considerando que o manejo sob SPD pode causar redução da porosidade e aumento da D_s (TORMENA et al., 2002), aumento da resistência mecânica à penetração (RP) e diminuição da permeabilidade (SILVA et al., 2009), a disponibilidade de água e nutrientes para as culturas pode ser reduzida, afetando o crescimento das plantas (GIAROLA et al., 2009). Assim, nas áreas sob SPD, os atributos físicos do solo precisam ser monitorados.

Segundo Guimarães (2011), a perda da qualidade física do solo pode ser evidenciada pelo aumento do impedimento mecânico à penetração das raízes, redução da infiltração de água no solo e aumento da suscetibilidade à erosão. A RP tem sido utilizada como um indicador da compactação do solo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (MERCANTE et al., 2003). Valores críticos de RP variam de 1,5 a 4,0 MPa, dependendo da cultura, sendo que o valor de 2,0 MPa é aceito, de maneira geral, como limite acima do qual há impedimento ao crescimento radicular das culturas agrícolas (IMHOFF et al., 2000).

A infiltração de água no solo se relaciona ao arranjo de suas partículas e, portanto, com a densidade e com a porosidade total (PT) do solo (POTT; DE MARIA, 2003).

Quantificar a velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo, por sua vez, estabelece a taxa de irrigação ou a quantidade de chuva que a área suporta sem que ocorram perdas por escoamento superficial (POTT et al., 2005). Assim, a VIB é um indicador das condições de crescimento das plantas e de perdas de solo, água e nutrientes. Conforme Islan e Weil (2000), a permeabilidade do solo à água é um atributo importante, refletindo sua qualidade e estabilidade estrutural. Estudando áreas comerciais sob SPD e uso de técnicas de AP, Santi (2007) concluiu que a infiltração de água no solo foi um dos principais atributos físicos com influência no rendimento das culturas, sendo determinante na variação temporal dos mesmos.

Inversamente proporcional à D_s , a PT do solo é constituída por microporosidade (Mic), onde a água fica retida para as plantas, e por macroporosidade (Mac), por onde a água drena mais rapidamente e ocorrem as trocas gasosas (KIEHL, 1979). A Mic é muito influenciada pela textura e teor de C_{org} e pouco influenciada pelo tráfego de máquinas e implementos (SILVA; KAY, 1997). A Mac, influenciada pela compactação, destaca-se na avaliação de desempenho dos sistemas de manejo em relação à produtividade das culturas, pois valores menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de poros livre de ar impõem limitação ao pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas (TORMENA et al., 1998).

O objetivo deste estudo foi avaliar atributos físicos do solo em duas zonas de manejo com potenciais produtivos distintos, identificadas por meio de técnicas de AP numa fazenda do Centro-Sul do Paraná.

4.2. Material e Métodos

A localização e demais características da área do estudo, bem como a definição das zonas de manejo estudadas e as descrições da metodologia de amostragem e avaliação de produtividade do trigo em 2010 encontram-se no Capítulo 1, seção 3.2. (p.8).

Para avaliar os atributos físicos do solo, entre junho e setembro de 2011 foram realizadas avaliações de campo e coletas de amostras de solo. Em cada um dos três pontos (subamostras) por unidade amostral, mediu-se a RP com penetrômetro Falker® a cada 0,01 m (TORMENA; ROLOFF, 1996) até 0,20 m de profundidade, obtendo-se médias para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Concomitantemente, foram coletadas amostras de solo por tradagem nestas duas camadas para determinar a umidade gravimétrica do solo (UG) (EMBRAPA, 1997), totalizando 96 observações de RP e UG zona⁻¹ de manejo.

Nos mesmos pontos de amostragem, determinou-se, no campo, a velocidade de infiltração básica (VIB) de água do solo com infiltrômetro de pressão modelo IAC, que funciona por princípio de Mariotte com carga hidráulica controlada, de 0,06 m na profundidade de 0,10 m no presente caso, em orifícios abertos com trado de 0,065 m de diâmetro. Foram realizadas leituras em intervalos de 1 minuto até fluxo constante, ou seja, cinco leituras consecutivas iguais (POTT, 2001). Para calcular a VIB, utilizou-se a equação 1:

$$VIB = q \times 60 \times \left(\frac{Dp^2}{Do^2 + (4 \times Do \times H)} \right) \text{ (eq. 1)}$$

em que: q é o fluxo constante de água do permeâmetro (mm min^{-1}); Dp é o diâmetro do permeâmetro (mm); Do é o diâmetro do orifício (mm) e; H é a carga hidráulica (mm).

Nas mesmas camadas de solo e pontos amostrais utilizados para determinar a RP, foram colhidas amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando cilindros de aço com $0,0001 \text{ m}^3$. No laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da UNICENTRO, foram fixadas telas de nylon na extremidade inferior das amostras, que depois foram saturadas em água por 48 horas, pesadas e submetidas à mesa de tensão a $-0,006 \text{ MPa}$. Cessada a drenagem, calculou-se o teor volumétrico de água no momento para determinar a microporosidade (Mic) do solo (EMBRAPA, 1997). Em seguida, o solo foi seco a $105-110^\circ\text{C}$ (peso constante) e pesado, obtendo-se a massa de solo seco que, dividida pelo volume de cada cilindro de amostragem, serviu ao cálculo da densidade do solo (D_s) (BLAKE; HARTGE, 1986).

A porosidade total (PT) do solo foi obtida pela relação entre D_s e densidade de partículas (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986), enquanto a macroporosidade (Mac) do solo foi obtida pela diferença entre PT e Mic. A densidade de partículas do solo foi determinada com o método do balão volumétrico e álcool etílico (EMBRAPA, 1997), utilizando solo das amostras após os procedimentos na mesa de tensão e secagem.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade e as médias comparadas entre zonas pelo teste t para amostras independentes, e também entre profundidades, utilizando-se o programa ASSISTAT (2011). Também foram elaborados mapas de distribuição espacial dos atributos do solo nas duas profundidades e zonas, utilizando o programa Surfer 9.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2010) com base nos valores estimados por krigagem, a qual foi realizada por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998), quantificando-se os percentuais (%) de área referentes a cada classe das variáveis com o programa IDRISI TAIGA (EASTMAN, 2009).

4.3. Resultados e Discussão

Na Tabela 6 estão os resultados de RP, UG, Ds, PT, Mic e Mac. Na camada de 0,00-0,10 m, a RP foi maior em Z2, e embora a UG do solo tenha sido menor nesta zona, o que pode causar superestimação da RP (BUSSCHER et al., 1997), a Ds também foi maior em Z2, indicando condições físicas de solo mais limitantes em comparação a Z1. Segundo Busscher (1990) e Busscher et al. (1997), o manejo inadequado dos solos provoca aumento da RP e da Ds, sendo que ambas diretamente relacionadas.

Tabela 6. Valores de resistência a penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) nas diferentes zonas de manejo e profundidades avaliadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

| Fonte | RP | UG | Ds | PT | Mic | Mac |
|-------------|-----------|---------------------|--------------------|-----------|-----------|----------|
| Varição | MPa | kg kg ⁻¹ | Mg m ⁻³ | ----- | % ----- | ----- |
| 0,00-0,10 m | | | | | | |
| Z1 | 1,50 B* b | 0,46 A a | 1,05 B a | 61,01 A b | 51,56 A b | 9,45 A a |
| Z2 | 1,65 A b | 0,42 B a | 1,12 A a | 58,49 B b | 52,42 A b | 6,08 B a |
| Média | 1,58 | 0,44 | 1,09 | 59,75 | 51,99 | 7,76 |
| DMS | 0,11 | 0,01 | 0,03 | 1,07 | 0,94 | 1,37 |
| CV | 9,65 | 3,55 | 3,52 | 2,49 | 2,50 | 24,45 |
| 0,10-0,20 m | | | | | | |
| Z1 | 2,33 A a | 0,47 A a | 1,01 B b | 64,45 A a | 55,97 A a | 8,48 A a |
| Z2 | 2,32 A a | 0,43 B a | 1,13 A a | 60,91 B a | 54,60 A a | 6,31 B a |
| Média | 2,33 | 0,45 | 1,07 | 62,68 | 55,28 | 7,39 |
| DMS | 0,11 | 0,01 | 0,03 | 1,45 | 1,72 | 1,15 |
| CV | 6,71 | 4,22 | 4,07 | 3,21 | 4,32 | 21,62 |

*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste t (p<0,05). Letras maiúsculas comparam Zonas de Manejo na mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma Zona de Manejo. DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Na camada de 0,10-0,20 m, não houve diferença de RP entre as zonas de manejo. Mas, em ambas as zonas de manejo, a RP aumentou em profundidade. Como não houve alteração significativa da umidade com o aumento da profundidade em Z1 e Z2, observa-se que a camada subsuperficial foi mais limitante ao enraizamento que a superficial. Em SPD de longo prazo, como neste estudo, há tendência à compactação do solo em subsuperfície (0,07-0,15 m) (SILVA et al., 2000; STONE; SILVEIRA, 2001). Na camada superficial, a mobilização sistemática do solo pelos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras, aliada ao maior conteúdo de matéria orgânica nessa camada, contribuem para valores menores de RP.

Embora alguns autores citem RP limitante ao enraizamento próxima de 3 Mpa para soja e arroz (BEUTLER, 2003; MIELNICZUK et al.,1985; PETTER, 1990), os valores mais citados ficam entre 2,0 e 2,5 MPa (TAYLOR et al., 1966), sendo o valor 2 MPa o mais freqüentemente utilizado (IMHOFF et al., 2000; LAPEN et al., 2004). Assim, ambas as áreas apresentaram RP potencialmente limitante ao enraizamento na camada de 0,10-0,20 m, com médias próximas a 2,3 MPa, principalmente se considerada a condição de alta UG nesta camada, entre 0,43 e 0,47 kg kg⁻¹, no momento das determinações, pois decréscimos de UG com o secamento do solo podem resultar em elevação da RP a valores ainda maiores.

Os mapas de RP também mostraram diferenças entre Z1 e Z2 na camada de 0,00-0,10 m (Figura 11). Z1 apresentou 79 % da área nas classes abaixo de 1,6 MPa, enquanto Z2 teve 71 % da área com valores na classe entre 1,6-1,8 MPa. Na camada de 0,10-0,20 m, os mapas mostraram semelhança entre as zonas, com 90 e 97 % das áreas de Z1 e Z2 (Figura 12), respectivamente, nas classes imediatamente abaixo e imediatamente acima do valor 2,3 MPa, que é bastante próximo das médias de RP nas duas zonas para esta camada de solo.

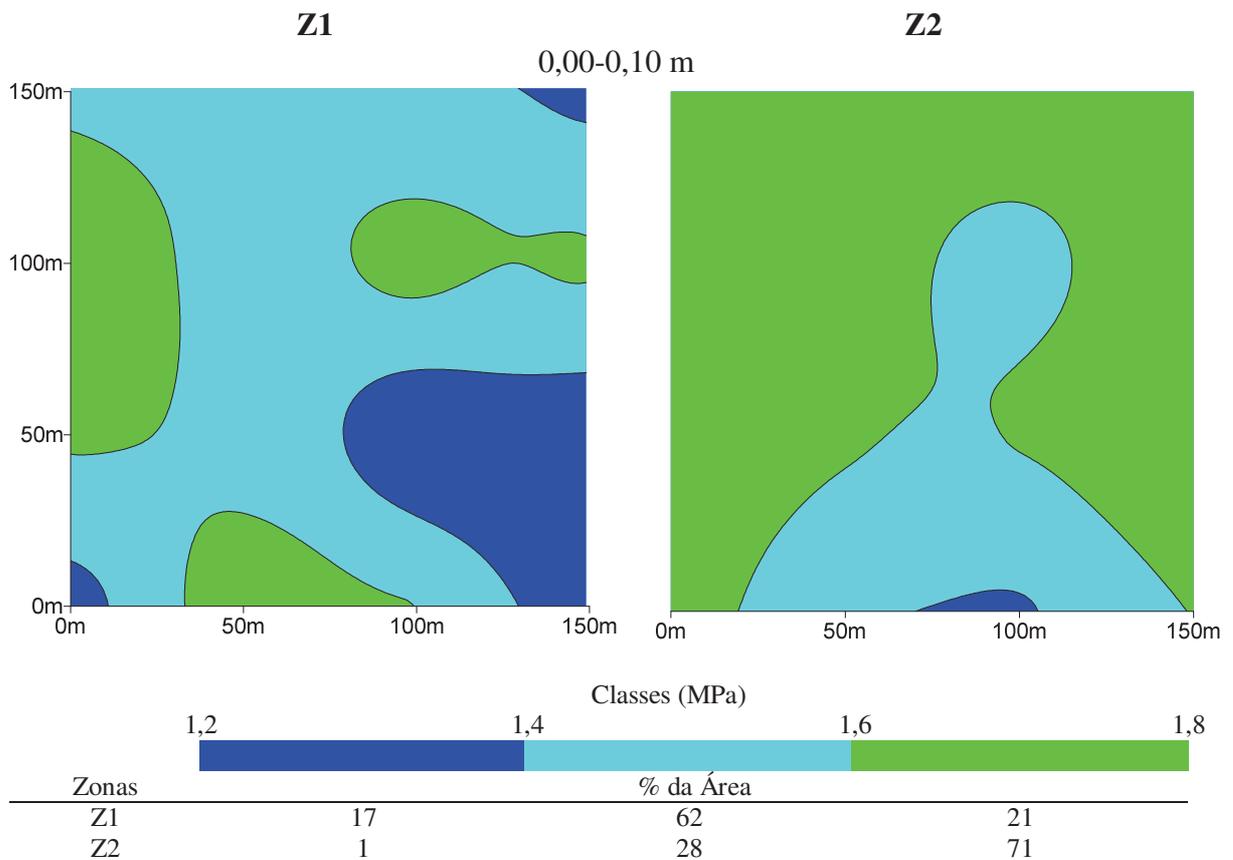


Figura 11. Mapas da distribuição espacial de RP (MPa) na camada 0,00-0,10 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

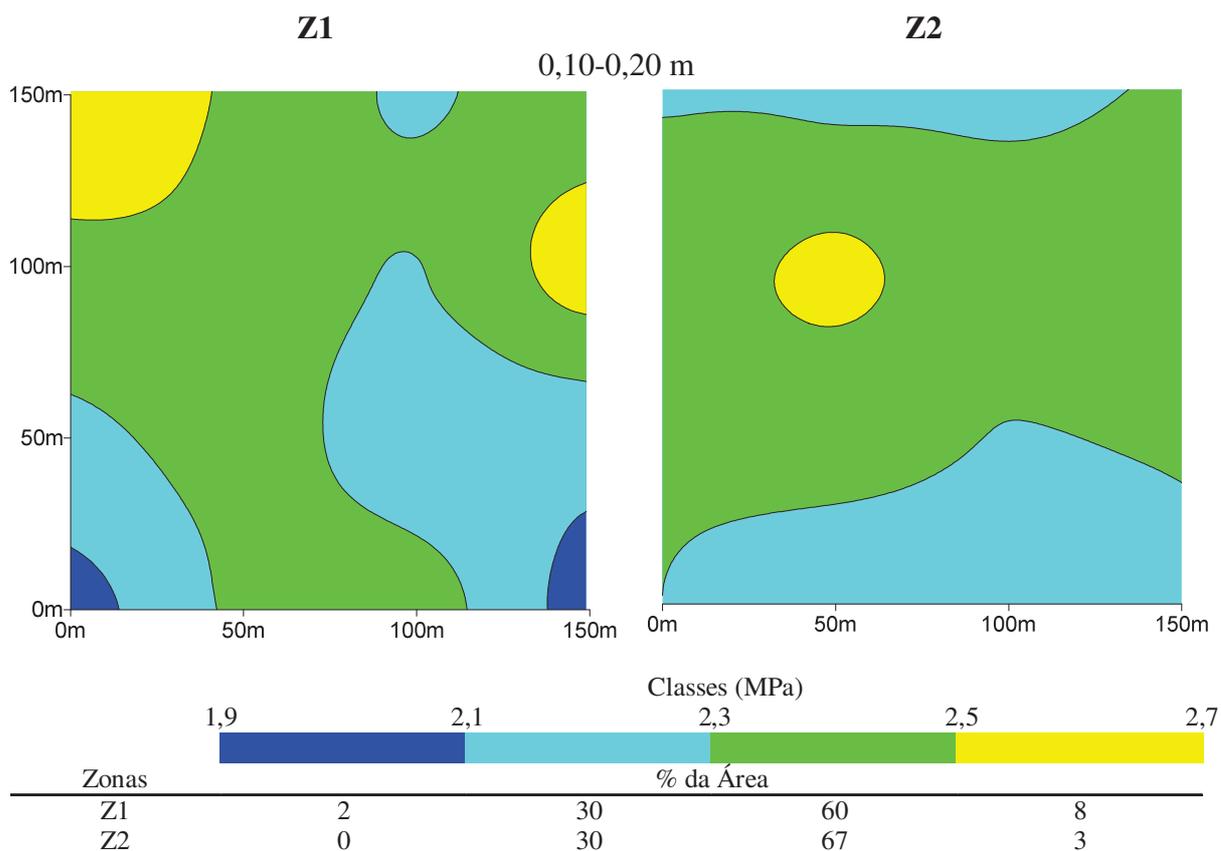


Figura 12. Mapas da distribuição espacial de RP (MPa) na camada 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011).

Quanto à D_s , os valores foram significativamente maiores em Z2, em ambas as camadas de solo. Em relação ao efeito da profundidade do solo, houve queda de D_s a partir da camada superficial em Z1, mas sem alterações significativas em Z2. A magnitude dos valores de D_s , no entanto, ficou abaixo da faixa limitante, proposta por Reichert et al. (2003) para algumas classes texturais de solo, sendo de 1,30-1,40 $Mg\ m^{-3}$ para solos argilosos como o do presente estudo. Nos mapas (Figura 13), além de similaridade de distribuição entre camadas de uma mesma área, sobretudo em Z2, é possível observar maior área nas classes de valores menores de D_s em ambas as camadas de Z1, bem como que em Z1 acentua-se a distribuição na classe de valores mais baixos da camada superficial para a de subsuperfície, em acordo com a queda de D_s observada na Tabela 6.

Considerando o trabalho de Alves et al. (2007), que observaram efeito do aumento do teor de matéria orgânica na melhoria da qualidade física do solo, sobretudo na diminuição da D_s , os teores de C_{org} (Capítulo I, Tabela 4) observados no presente estudo podem estar ligados a diferença de D_s entre as zonas de manejo e as camadas de solo avaliadas, visto que os maiores valores de D_s ocorreram onde os valores de C_{org} foram menores.

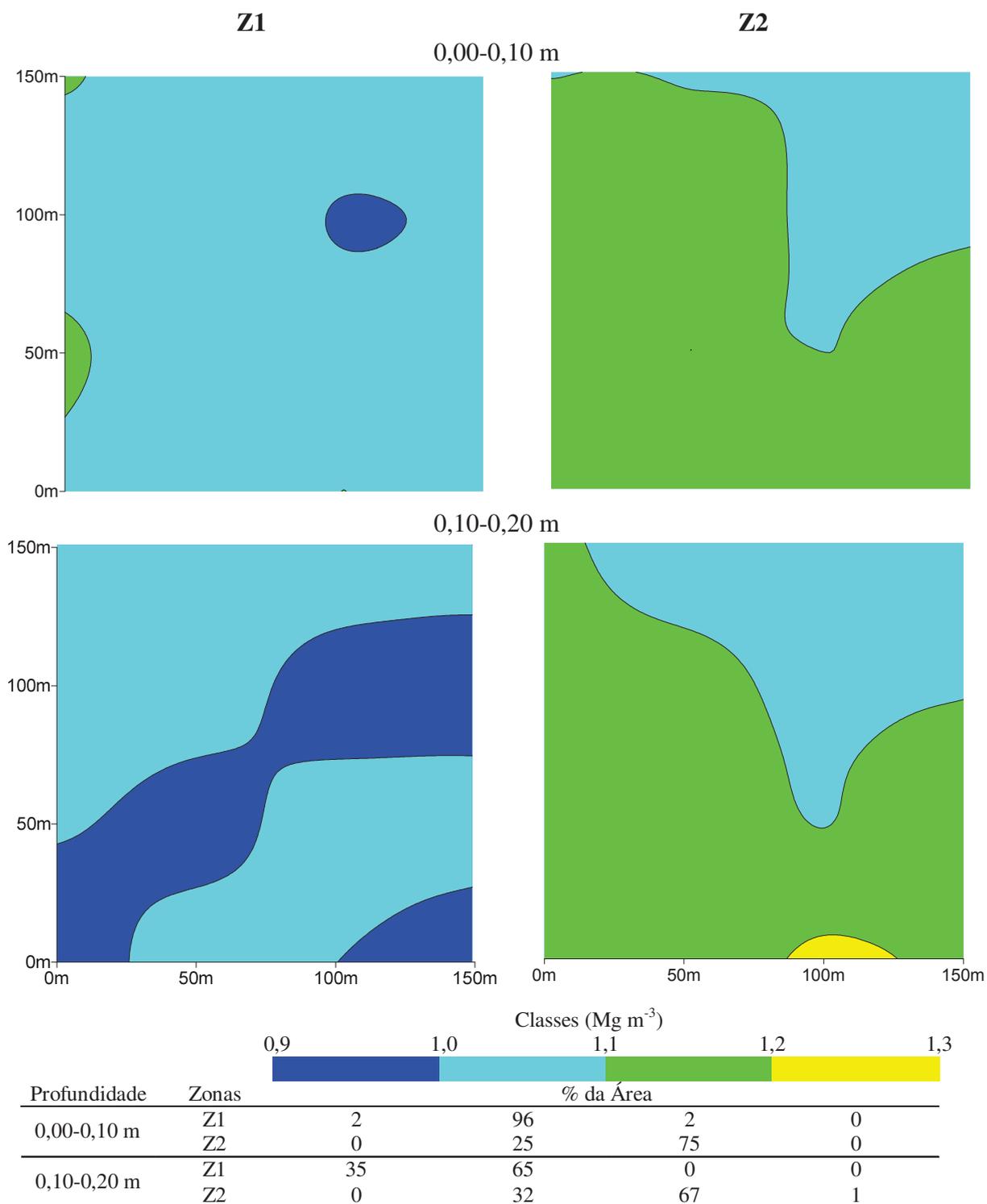


Figura 13. Mapas da distribuição espacial de D_s (Mg m^{-3}) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Diferentemente dos mapas de RP, os mapas de UG (Figura 14) mostraram distribuição muito similar entre as camadas de solo numa mesma zona de manejo, apenas acentuando-se as porcentagens em classes com maiores valores na camada subsuperficial. Entre as zonas

estudadas, houve maior porcentagem de área nas classes de UG mais baixas em Z2 na comparação com Z1.

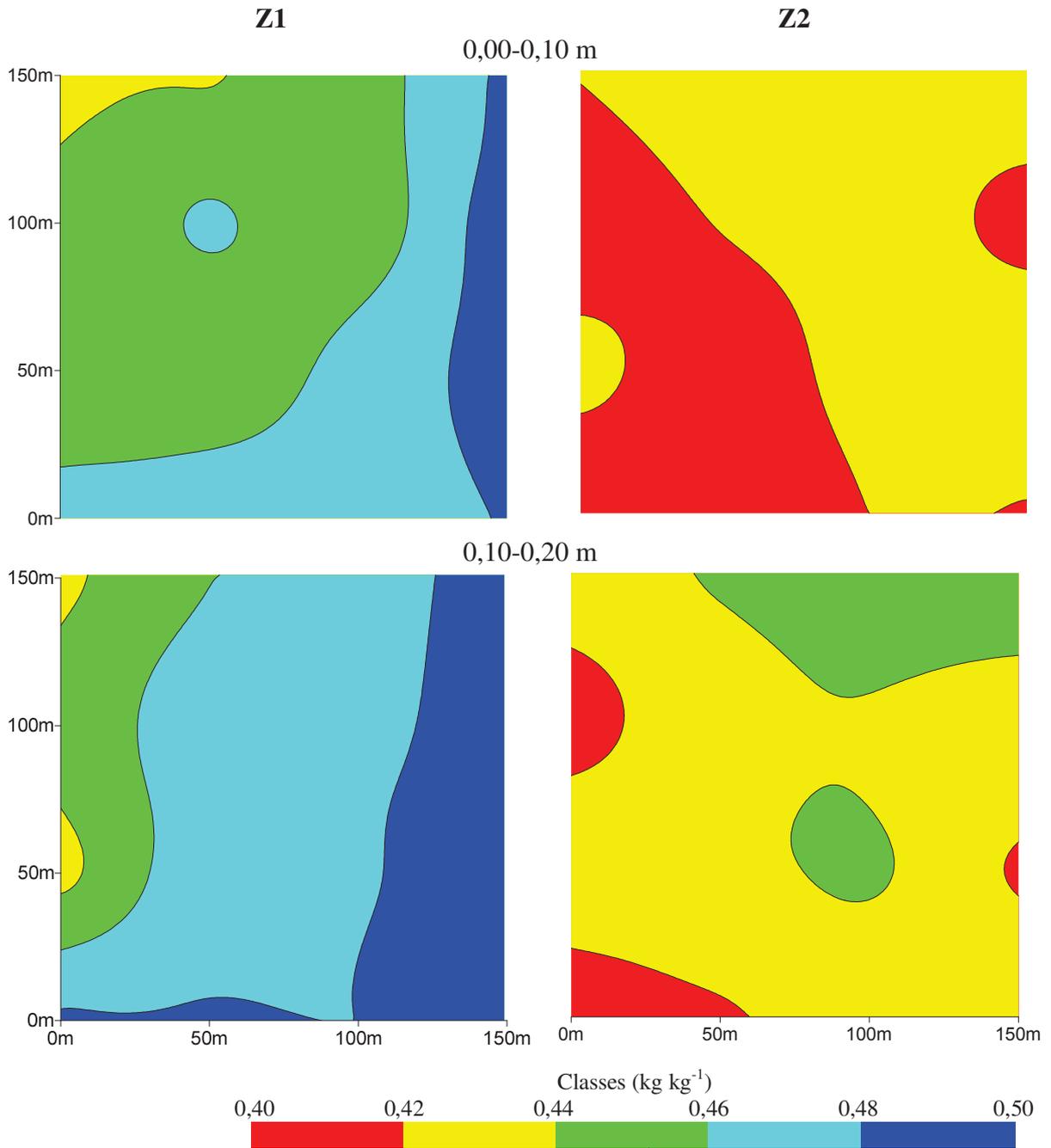


Figura 14. Mapas da distribuição espacial de UG (kg kg⁻¹) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguçu, 2011).

Com solo mais úmido e menos denso nas duas camadas e com menor RP na camada de 0,00-0,10 m em Z1, esta zona de manejo apresentou condições físicas mais favoráveis à absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, de produtividade das culturas em relação a Z2, em concordância com a avaliação de potencial produtivo (Capítulo I, tabelas 1 e 3).

A partir dos resultados de porosidade, verifica-se que a maior Ds em Z2 deveu-se à menor PT em relação a Z1 (Tabela 6), uma vez que aumentos de Ds resultam de alterações no espaço poroso do solo, decorrente da redução da PT, normalmente às expensas da Mac, o que pode reduzir trocas de gases entre o solo e a atmosfera e aumentar a RP (BLAINSKI et al., 2009; LETEY, 1985). No presente estudo, Z2 apresentou, simultaneamente, menor PT e Mac em relação a Z1 (Tabela 6), em ambas as camadas, resultado corroborado pela distribuição espacial desses atributos, uma vez que os mapas demonstram maior porcentagem de área nas classes de menor valor de PT (Figura 15) e de Mac (Figura 16) em Z2, em ambas as camadas.

Considerando que Alves et al. (2007) observaram efeito do acréscimo no teor de MO do solo aumentando a infiltração de água, e que os macroporos estão relacionados à infiltração de água no solo (SILVA et al., 2008), os resultados dos teores de C_{org} (Capítulo I, Tabela 4) do presente estudo também podem ser relacionados aos resultados de PT e Mac, cujas médias foram maiores em Z1, onde os teores de C_{org} também foram maiores.

Por outro lado, não houve diferenças significativas entre Z1 e Z2 quanto às médias de Mic, em ambas as camadas (Tabela 6). Nas duas zonas, entretanto, houve aumento da Mic em profundidade a partir da camada superficial, sem alteração significativa da Mac, demonstrando que o aumento de PT observado em profundidade ocorreu devido ao aumento da Mic. A distribuição espacial dos dados também não evidenciou grande distinção entre as zonas (Figura 17), apenas que as porcentagens de área em classes de menor valor de Mic foram maiores em Z1 na comparação com Z2 na camada superficial, ocorrendo comportamento inverso na camada subsuperficial.

Os dados da Tabela 6 revelaram, ainda, haver uma proporção muito grande de Mic em relação à Mac, com valores de Mic, sempre acima de 50 %, sendo de 5,5 a 9,2 vezes maiores que os de Mac. Conforme Tormena et al. (2002), a Mac é, geralmente, tida como restritiva ao crescimento e produtividade da maioria das culturas quando abaixo de 10-15%, por seu papel na aeração do solo, apesar da dependência de espécie de planta e de atividade biológica do solo. Neste estudo, a maior média de Mac encontrada foi de 9,45%, na camada superficial de Z1, sendo o menor valor o de 6,08%, encontrado em Z2 nesta mesma camada de solo.

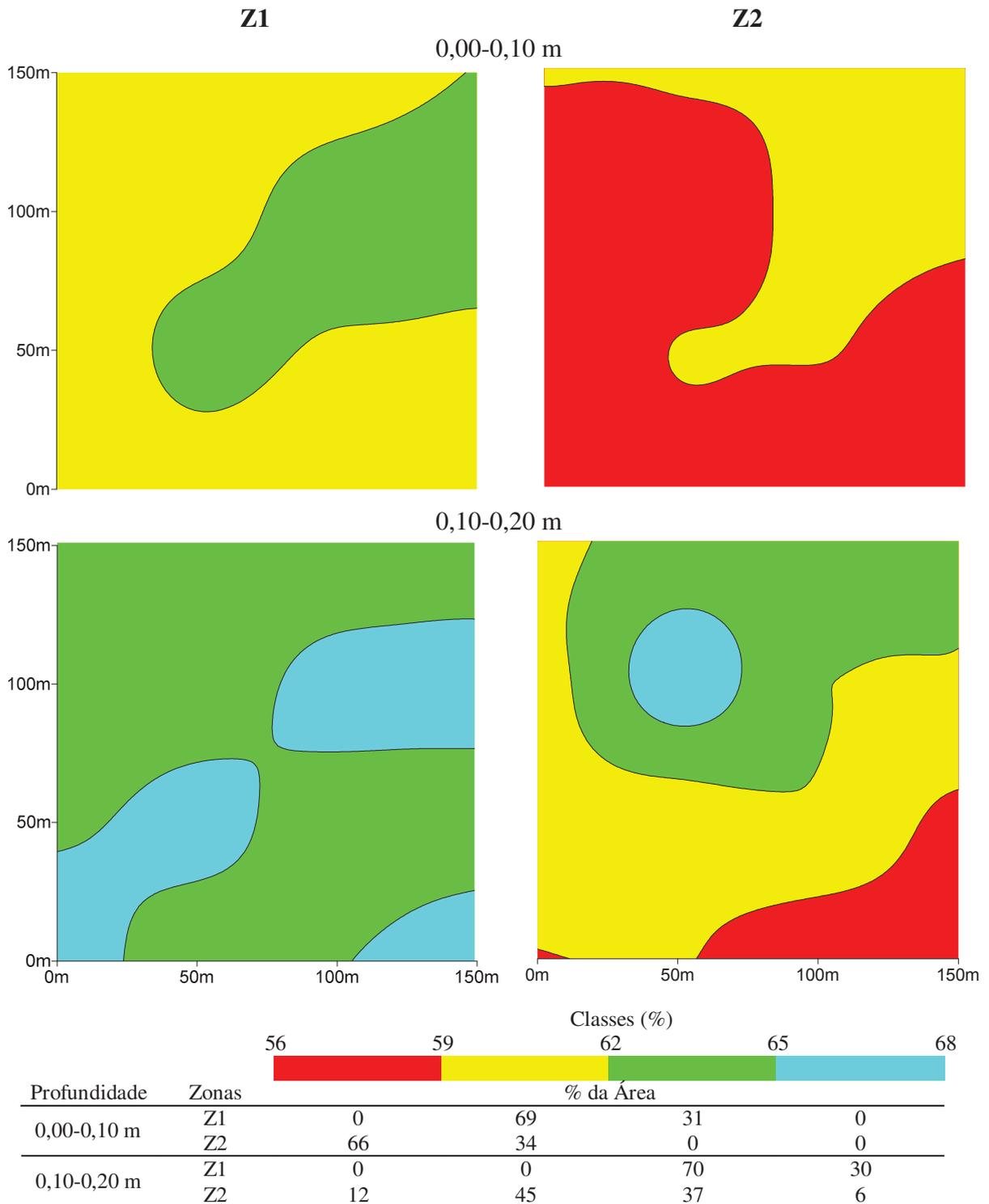
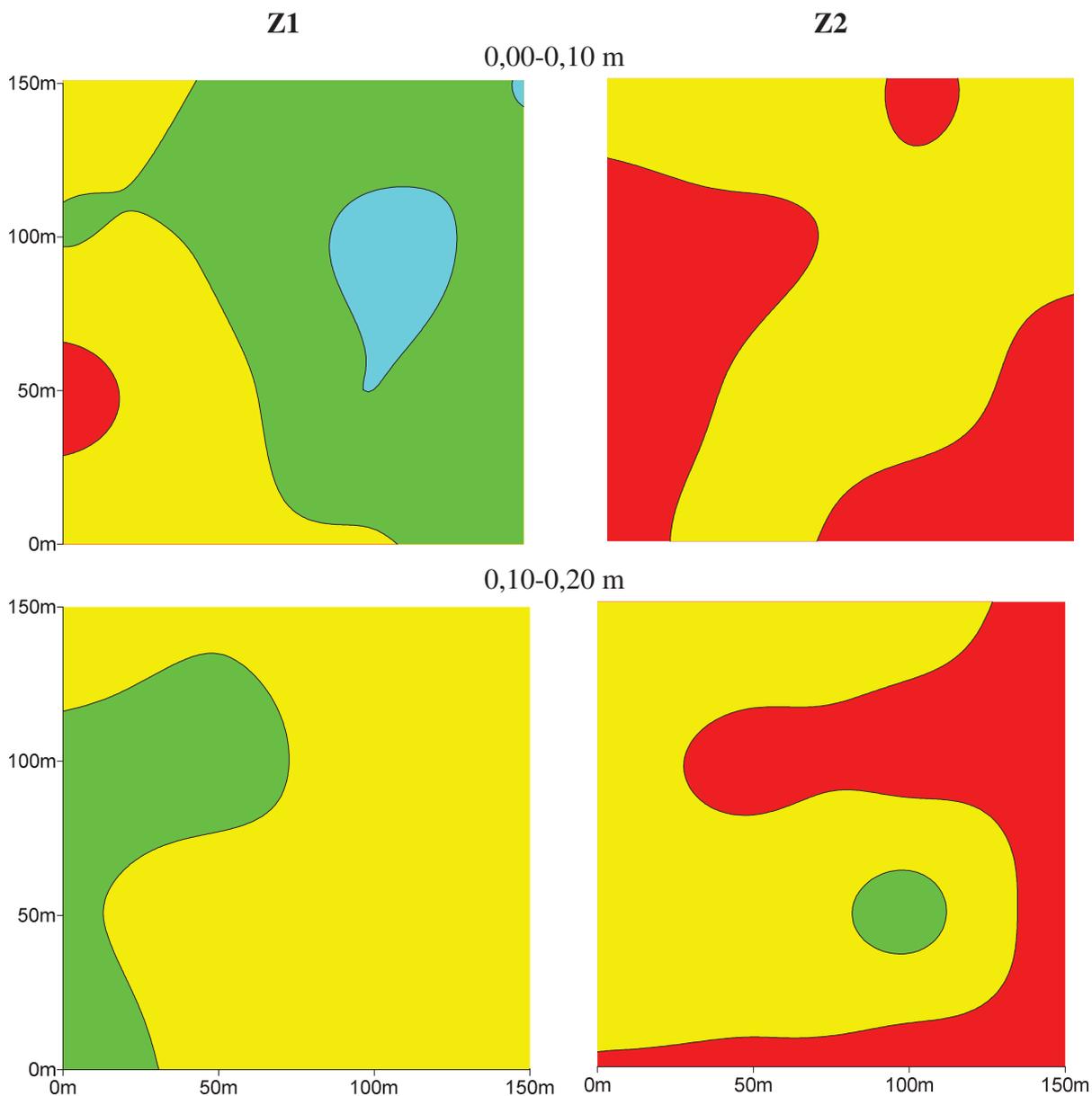
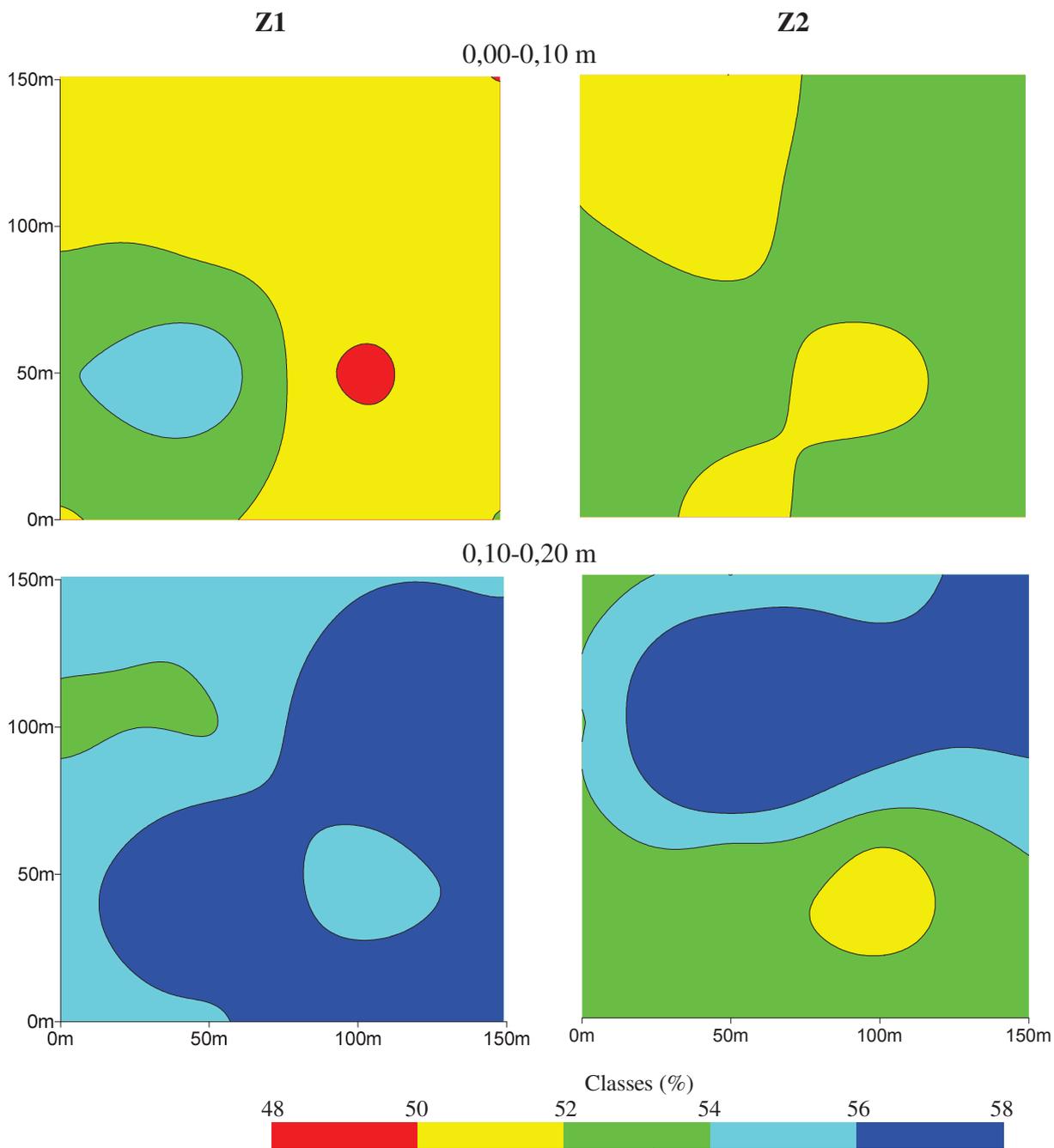


Figura 15. Mapas da distribuição espacial de PT (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguazu, 2011).



| Profundidade | Zonas | % da Área | | | |
|--------------|-------|-----------|----|----|---|
| 0,00-0,10 m | Z1 | 2 | 32 | 58 | 8 |
| | Z2 | 39 | 61 | 0 | 0 |
| 0,10-0,20 m | Z1 | 0 | 77 | 23 | 0 |
| | Z2 | 36 | 61 | 3 | 0 |

Figura 16. Mapas da distribuição espacial de Mac (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).



| Profundidade | Zonas | Classes (%) | | | | | |
|--------------|-------|-------------|----|----|----|----|----|
| | | 48 | 50 | 52 | 54 | 56 | 58 |
| 0,00-0,10 m | Z1 | 1 | 70 | 22 | 7 | 0 | 0 |
| | Z2 | 0 | 30 | 70 | 0 | 0 | 0 |
| 0,10-0,20 m | Z1 | 0 | 0 | 5 | 38 | 57 | 0 |
| | Z2 | 0 | 5 | 39 | 22 | 34 | 0 |

Figura 17. Mapas da distribuição espacial de Mic (%) nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

Conforme Araújo (2004), a porosidade pode ser um bom parâmetro para indicar alterações no solo causadas pelo uso, visto que a porosidade do solo pode refletir sua qualidade, tendo implicação direta na velocidade de infiltração da água, nas trocas gasosas, na

vida microbiana e no crescimento das raízes.

Interpretando conjuntamente os resultados da Tabela 6, observou-se incremento de Ds e de RP com o aumento da profundidade do solo, acompanhado de decréscimo na PT às custas da Mac, sendo a zona de manejo Z2 a que apresentou os maiores indícios de condição física do solo em níveis potencialmente problemáticos para as culturas. Estes resultados estão em acordo com aqueles encontrados por Amado et al. (2009), também em zonas de manejo com produtividades contrastantes.

Os resultados de VIB (Figura 18) apresentaram-se em acordo com os dados da tabela 6. A VIB observada em Z1 foi aproximadamente 30% superior à observada em Z2, podendo ser relacionada à maior Mac de Z1, também cerca de 30% maior (média das duas camadas de solo) em relação a Z2. Conforme Silva et al. (2008), a redução da Mac tem grande efeito sobre a velocidade de infiltração de água e sobre o desenvolvimento radicular das plantas, principalmente em solos argilosos, como é o caso do presente estudo. Enquanto Z1 apresentou apenas 50% da área na classe de menor VIB (30-50 mm h⁻¹), em Z2 este percentual chegou a 95 % (Figura 19).

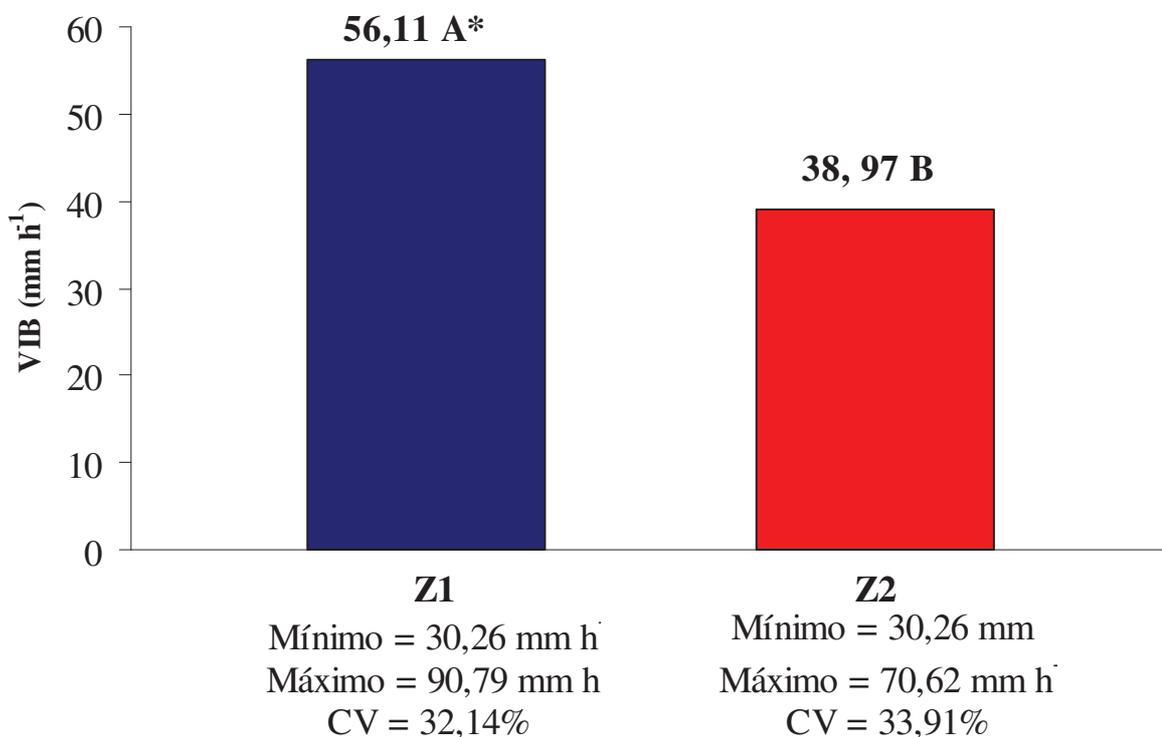


Figura 18. Velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo nas diferentes zonas de manejo (Reserva do Iguazu, 2011). * Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste t ($p < 0,05$).

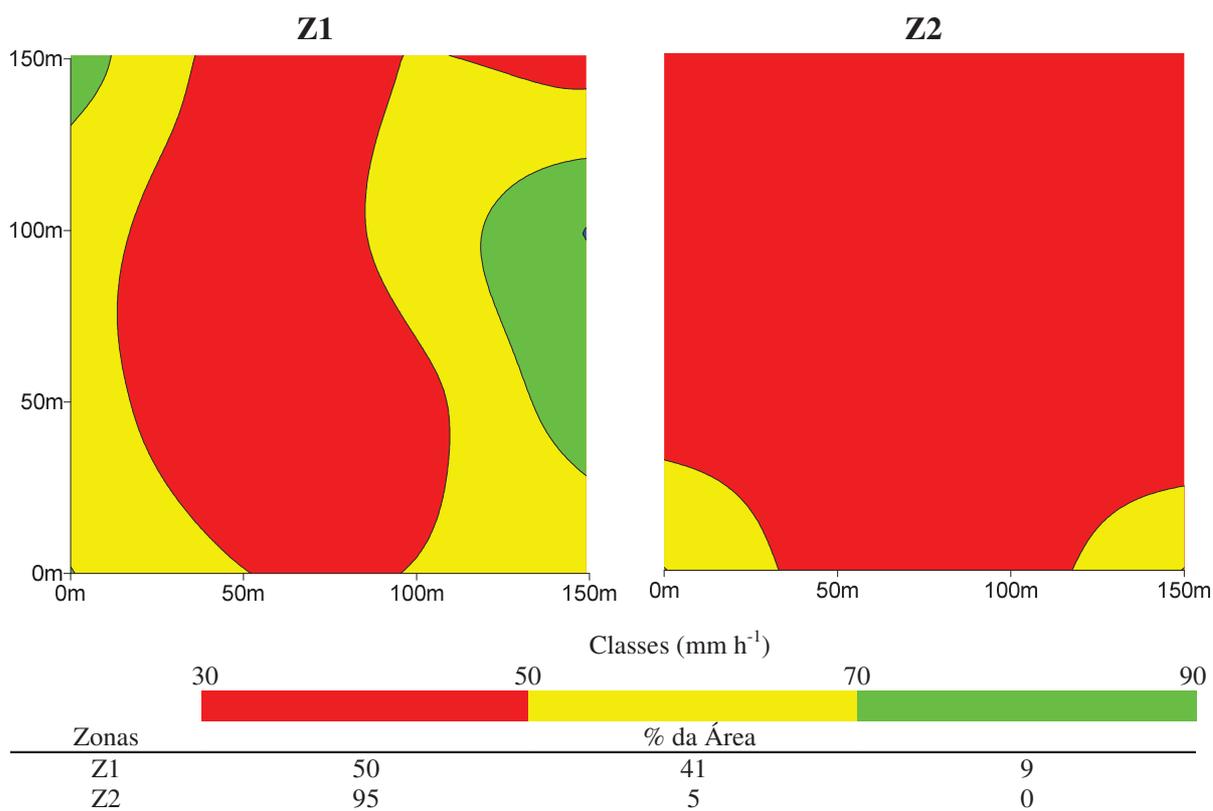


Figura 19. Mapas da distribuição espacial de VIB (mm h^{-1}) nas zonas de manejo estudadas (Reserva do Iguaçu, 2011).

4.4. Conclusões

Conclui-se que Z2 apresentou uma condição física do solo pior em comparação a Z1, com maiores RP e DS, menores PT e Mac e menor VIB, gerando, portanto, maiores limitações de crescimento e desenvolvimento das lavouras, as quais apresentam menor potencial produtivo em resposta.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.617-625, 2007.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.189-197, 2001.

AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L.; SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.831-843, 2009.

AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; PONTELLI, C.B.; VEZANI, F. Agricultura de precisão como ferramenta de aprimoramento do manejo do solo. **Revista Plantio Direto**, edição especial, p.46-49, 2004.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.695-702, 2001.

ANGHINONI, I. Fertilidade do Solo e seu Manejo em Sistema Plantio Direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V., BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.873-928, 2007.

ARAÚJO, R. **Avaliação da qualidade do solo em áreas sob diferentes usos**. Brasília, Universidade de Brasília. 2004, 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

ARRIAGA, F.J.; KORNECKI, T.; BISCARO, A.S.; BALKCOM, K.S.; SHAW, J.N.; SANTEN, E. van; PRICE, A.J. Management and landscape position effects on soil physical properties of a Coastal Plain soil in Central Alabama, USA. In: **19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World**. Brisbane, Austrália p.83-86, 2010.

ASSISTAT. Assistência estatística. Versão 7.6 beta.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, p.9-26, 1999.

BELLÉ, G.L. **Agricultura de precisão: manejo da fertilidade com aplicação a taxa variada de fertilizantes e sua relação com a produtividade de culturas**. 2009, 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

BEUTLER, A.N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro**. 2003, 135f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.273-281, 2009.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KULTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and a mineralogical methods**. Madison: ASA, p. 363-375, 1986.

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

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

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. **Soil & Tillage Research**, v.43, p.205-217, 1997.

CAIRES, E.F. Controle da acidez e melhoria do ambiente radicular no sistema plantio direto. In: FONSECA, A.F. da; CAIRES, E.F.; BARTH, G (Ed). **Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, p.23-68, 2011.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.57-64, 2008.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.1029-1040, 2001.

CALEGARI, A.; CAVIGLIONE, J. H. Identifying the No Till area expansion in Parana State (southern Brazil) using satellite images. **Workshop - Investing in Sustainable Crop Intensification: the case for improving soil health**. Rome: FAO, 2008.

CATANI, R.A.; GALLO, J.R. Avaliação da exigência de calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante a correlação entre pH e saturação de bases. **Revista da Agricultura**, v.30, p.49-60, 1955.

CIOTTA, M.N.; FONTOURA, S.M.V.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, n.6, p.1161-1164, 2003.

COELHO, A.M. **Agricultura de precisão**: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 60p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

COSTA, A. Trigo. In: IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Londrina: Iapar, 2003. 30p. (Circular Técnico, 128).

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 527-535, 2003.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; FONTOURA, S.M.V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.587-589, 2004.

COSTA, S.E.V.G. de A. **Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo de solo e da adubação em longo prazo**. 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H.W. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **Int. J. Agric. & Biol. Eng.**, v. 3, n.1, p.1-25, 2010.

DODERMANN, A.; PING, J.L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, v.96, n.1, p.285-297, 2004.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja**: Paraná – 2007. Londrina: Embrapa Soja, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997.

EASTMAN. J. R. **Idrisi Taiga Tutorial**. Worcester-MA, Graduate School of Geography, Clark University. 333p. 2009.

FEBRAPDP – Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. **BRASIL – Evolução da Área Cultivada em Plantio Direto – 1972/73 à 2005/2006**. 2006. Disponível em: <[ftp://www.febrapdp.org.br/download/ev_plantio_brasil.pdf](http://www.febrapdp.org.br/download/ev_plantio_brasil.pdf)>. Acesso em: 19 jul. 2010.

FLORIN, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; MINASNY, B. Inverse metamodelling to estimate soil available water capacity at high spatial resolution across a farm. **Precision Agriculture**, V.12, p.421–438, 2011.

FONTOURA, S.M.V; VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; MORAE, R.P. de. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1907-1914, 2010.

GIAROLA, N.F.B., BRACHTVOGEL, E.L., FONTANIVA, S., PEREIRA, R.A., FIOREZE, S.L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p.641-646, 2009.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer versão 9.9**. Tutorial. User's Guide. Golden Software, New York, 2010.

GUIMARÃES, R.M.L. **Indicadores quantitativos e semi-quantitativos da qualidade física do solo**. 2011, 102f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

IAPAR . Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas Climáticas do Paraná**. Versão 1.0. 2000. (formato digital) 1 CD.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p.1493-1500, 2000.

ISLAN, K, R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.55, p.69-79, 2000.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 246p.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

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

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUIMARÃES GUILHERME, L.R.; SILVA, C.A. **Sistema Plantio Direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 115p.

MALAVOLTA, E. **Manual de calagem e adubação das principais culturas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1987. 496p.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUSA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1149-1159, 2003.

MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V., BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.65-90, 2007.

MIELNICZUK J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds) **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo – Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. Porto alegre: Gênese,1999. p.01-08.

MIELNIZUCK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, v.38, p.42-43, 1985.

MOLIN, J.P. Definição de Unidades de Manejo a partir de mapas de Produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, p.83-92, 2002.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, p. 1-18, 1997.

NAGAOKA, A.K.; NOMURA, R.H.C. Tratores: semeadura. **Cultivar Máquinas**, n.18, p.6-24, 2003.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.237-247, 2008.

OLIVEIRA, F.A. de; CARMELLO, Q.A. de C.; MASCARENHA, H.A.A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, v.58, p.329-335, 2001.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F. de; ZEMPULSKI, H. da C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR, Circular 76).

PETTER, R.L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em latossolo**. Santa Maria, 1990. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

PICCININ, J.L.; ESPÍNDOLA, C.R.; TORRES, E. Condições morfoestruturais e estabilidade dos agregados do solo sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais**. Ilhéus: Ceplac, Cepec,. v.1, p.246-247, 2000.

PONTELLI, C.B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão**. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PÖTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.675-684, 1998.

POTT, C.A. **Determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo por meio de infiltrômetros de aspersão, de pressão e de tensão, em três solos do Estado de São Paulo**. 2001. 77f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2001.

POTT, C.A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.19-27, 2003.

POTT, C.A.; ROSIM, D.C.; DE MARIA, I.C. Velocidade de Infiltração de Água – VIB: para que serve e como avaliar essa importante propriedade dos solos. Informativo Técnico. **O Agrônomo**, v.57, p.27-28, 2005.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000, 111p.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed.rev.atual. Campinas: Instituto Agrônômico/ Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100).

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

RESENDE, A.V.; SHIRATSUCHI, L.S. (Re) conhecendo a precisão na agricultura: o papel do agricultor. **Revista Plantio Direto**, 2007.

RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n.3, p.321-344, 2005.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: Geostatistics for environmental sciences: version 5.1 for windows. [S.1.]: Gamma Design Software, 152 p., 1998.

SANTI, A.L. **Relações entre Indicadores de Qualidade do Solo e a Produtividade das Culturas em áreas com Agricultura de Precisão**. 2007, 175f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SFREDO, G.J.; BORKERT, C.M.; OLIVEIRA, M.C.N. de; WOBETO, C.; ALMEIDA, J. Determinação da relação ótima entre Ca, Mg e K para a cultura da soja em solos do Paraná. In: EMBRAPA SOJA. **Resultados de pesquisa de soja 1991/1992**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. p.298. (Embrapa Soja. Documentos 138).

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.877-883, 1997.

SILVA, F. de F. da; FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, v.13, p.191-204, 2008.

SILVA, I.R. da; SÁ MENDONÇA, E. de. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V., BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.275-374, 2007.

SILVA, J.M.; PASSOS, A.L.R.; BELTRÃO, F.A.S. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 103-118, set./dez. 2009.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000.

SOUZA, D.M.G. de; MIRANDA, L.N. de; OLIVEIRA, S.A. de; Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V., BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.205-274, 2007.

STONE, L.R.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.395-401, 2001.

SWINTON, S.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. **Journal of Production Agriculture**, v.11, n.4, p.439-446, 1998.

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

TREVISAN, L.R.; LANA, R.M.Q.; ZANÃO JÚNIOR, L.A.; LACERDA, Z.C. & GUIMARÃES, E.C. Variabilidade vertical de pH, bases e enxofre em Latossolo Vermelho cultivado sob sistema plantio direto e cultivo mínimo. **Horizonte Científico**, v.7, p.1-11, 2008.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S. da; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, p.795-801, 2002.

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

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

VIANA, J. H. M., **Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de Latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas**. 2005. 194p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P.; CLAYTON, M.K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, v.7, p.441-448, 1994.