

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO, DE POTÁSSIO E DE RAÍZES E
RENDIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E DA
ADUBAÇÃO EM LONGO PRAZO**

**Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa
(Dissertação de Mestrado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO, DE POTÁSSIO E DE RAÍZES E
RENDIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E DA
ADUBAÇÃO EM LONGO PRAZO**

SÉRGIO ELY VALADÃO GIGANTE DE ANDRADE COSTA
Engenheiro-Agrônomo (UFLA)

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de
Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Julho, 2008

Ao Tio Vadinho (in memorium)
Ao Tio Peralta (in memorium)
Ao Tio Hilton e tia Vera (in memorium)
Ao Tio Edinho e família
Ao Vôvô Frazeca e Rui e Vóvó Sisi e
Nair (in memorium)
A minha família
A todos vocês DEDICO este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ibanor Anghinoni pela orientação na elaboração deste trabalho e acima de tudo pelo exemplo de ser humano demonstrado pelos seus atos e palavras.

Aos professores e funcionários do departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Zé pelo auxílio dado e companheirismo.

A todos os colegas da pós-graduação, em especial, Juliana, Dani, André, Josi, Regina, Liane, Luís, Jeanne, Letícia, Sidinei, Jean, Felipe e Eric.

Aos bolsistas e acima de tudo amigos e companheiros, Thiago, Amanda, Eduardo e Marcelo.

Ao Edicarlos, um grande pesquisador e cozinheiro, muito obrigado!

Aos gaudérios João Paulo, Osmar e Marquel pelas aventuras e gauchadas.

Ao Adão e família, por me acolherem de coração aberto.

A Janaína e família pela força e amizade.

Aos funcionários e professores da UFLA, em especial, Pezão, Humberto, Roberto, Leninha, Maria Alice, Nilton Curi, João José Marques e Antonio Eduardo Furtini Neto.

A moçada de Lavras, Rooveth, Thiaguinho, Shiguero, Caipirão, Everton, Luzia, Ciro e Isabela e família.

A CAPES pelos recursos financeiros.

Ao Sérgio Siqueira pela vontade de viver que me moveu na reta final deste trabalho.

Ao Romão e todos da minha cidade natal Guaratinguetá, que fizeram com que este momento pudesse acontecer.

Ao meu pai Danilo de Andrade Costa, pelo incentivo na eterna busca pelo conhecimento, por me mostrar que a sabedoria inexistente sem a humildade e acima de tudo que a grandiosidade de um homem não está em suas conquistas, mas sim no reconhecimento de seus defeitos e fragilidades.

A minha mãe, Dulce Maria Valadão Cardoso, pelo amor imensurável, pela força e garra eterna me ensinando que a única ferramenta capaz de melhorar uma pessoa, comunidade ou país é o trabalho honesto.

DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO, DE POTÁSSIO E DE RAÍZES E RENDIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO EM LONGO PRAZO^{1/}

Autor: Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa
Orientador: Ibanor Anghinoni

RESUMO

O manejo do solo e da adubação ao longo do tempo de cultivo pode contribuir para o aumento da produtividade e da rentabilidade das culturas. Há, por isso, a necessidade de se dispor e avaliar experimentos de longa duração, para que se possa acompanhar e entender a dinâmica das alterações dos nutrientes e das raízes no perfil do solo ao longo do tempo e seu efeito na absorção de nutrientes e no crescimento e rendimento das culturas. Para isso, foi utilizado um experimento de 18 anos de duração em um Argissolo Vermelho distrófico na Estação Experimental da UFRGS, em Eldorado do Sul RS, com culturas de cobertura (aveia preta e ervilhaca) no inverno e milho no verão, submetido a tratamentos de manejo do solo e da adubação. Os de manejo de solo foram: preparo convencional, sem preparo (plantio direto) e preparo em faixa, e os de adubação foram: lanço, em linha e em faixa, de fósforo (superfosfato triplo) e de potássio (cloreto de potássio). Foram utilizados dados de distribuição de fósforo, de potássio e de raízes no solo e de sua absorção e crescimento de milho das safras 1989/90, 1999/00 e 2006/07. Nesta última safra, foram também avaliados a produção de matéria seca e rendimento de grãos. Independentemente do manejo do solo e da adubação, houve acúmulo superficial e no perfil do solo de fósforo e de potássio ao longo do tempo, sendo mais evidenciado para fósforo, que ocorreu predominantemente na forma inorgânica, com mais intensidade no sistema plantio direto com adubação em linha. O potássio se concentrou mais na camada superficial do solo em plantio direto e também em profundidade no preparo convencional. A distribuição de raízes foi mais relacionada com a distribuição de fósforo, havendo redistribuição de ambos ao longo do tempo no perfil do solo. Apesar do efeito do manejo do solo e da adubação na distribuição dos nutrientes estudados e das raízes no solo e na sua absorção pelas plantas, o rendimento de matéria seca e de grãos de milho não foram afetados.

^{1/} Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. (106 p.) – Julho, 2008. Trabalho realizado com apoio financeiro da CAPES.

LONG-TERM TILLAGE AND FERTILIZER MANAGEMENT EFFECTS ON CORN YIELD AND ON ROOT, PHOSPHORUS AND POTASSIUM DISTRIBUTION IN SOIL^{1/}

Author: Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa
Adviser: Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

Soil and fertilizer management along cultivation time can contribute for crop productivity and profitability. There is, then, the necessity to have and evaluate long-term experiments to accomplish and understand the dynamics of the nutrient and root distribution in soil depth along time and its effects in nutrient uptake and in crop growth and yield. An eighteen year old experiment in a Rhodic Paleudult soil, located at the Agronomic Experimental Farm of the Federal University (UFRGS) in Eldorado do Sul in the Rio Grande do Sul state – Brazil, with cover crops (black oat and vetch) in the winter and corn in the summer, under soil and fertilizer management treatments was used. The soil managements were conventional, no-tillage and strip tillage, and phosphate (triple superphosphate) and potassium (potassium chloride) fertilizer were broadcast, row and strip applied. Data for phosphorus, potassium and root distribution in the soil from 1989/90, 1999/00 and 2006/07 growing seasons were used. In the last one, nutrient uptake, corn growth and biomass and grain yields were also evaluated. There was a surface accumulation of phosphorus and potassium along the time, being most for phosphorus, no matter which soil and fertilizer management were used. Phosphorus accumulated, predominantly, as an inorganic form, with a higher intensity in the no-tillage system with row fertilization. Potassium accumulated most in the top layer under no-tillage and deeply in the conventional one. Root distribution was more related to phosphorus distribution, having redistribution of both along the time and soil profile. In spite of soil and fertilizer placement effects on nutrient and root distribution in the soil and in their uptake by plants, dry matter production and corn yields were not affected.

^{1/} Master of Science Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (106p.) – July, 2008. Research supported by CAPES.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO 1: ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	3
2.1. O fósforo na planta e sua dinâmica no solo.....	3
2.2. Eficiência do uso de fósforo em função do modo de adubação e do preparo do solo.....	4
2.3. O potássio na planta e sua dinâmica no solo	8
2.4. Eficiência do uso de potássio em função do modo de adubação e preparo do solo.....	9
2.5. Distribuição de nutrientes e de raízes no solo no tempo em sistemas de manejo do solo	11
2.5.1 Distribuição de fósforo	11
2.5.2 Distribuição do potássio.....	16
2.5.3 Distribuição de raízes	19
3. CAPÍTULO 2: DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E DE RAÍZES E CRESCIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO	23
3.1. Introdução.....	23
3.2. Material e Métodos	25
3.3. Resultados e Discussão	29
3.4. Conclusões.....	40
4. CAPÍTULO 3: DISTRIBUIÇÃO DE POTÁSSIO E DE RAÍZES E CRESCIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO	41
4.1. Introdução.....	41
4.2. Material e Métodos	43
4.3. Resultados e Discussão	46
4.4. Conclusões.....	56
5. CAPÍTULO 4: DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO DE POTÁSSIO E DE RAÍZES DE MILHO NO SOLO NO TEMPO EM SISTEMAS DE MANEJO	57
5.1. Introdução.....	57
5.2. Material e Métodos	59
5.3. Resultados e Discussão	63
5.3.1. Fósforo e raízes.....	63
5.3.2. Potássio	73
5.4. Conclusões.....	75
6. CONCLUSÕES GERAIS	77
7. RECOMENDAÇÕES	78
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
9. APÊNDICES	97

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Distribuição relativa da densidade de raízes no perfil do solo conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo de um Argissolo Vermelho, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	31
2. Matéria seca da parte aérea de milho (MSPA), comprimento de raízes e acúmulo e eficiência do uso de fósforo (EUP) em plantas de milho no monólito coletado no início do enchimento de grãos, em função de sistemas de manejo de um Argissolo Vermelho, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	36
3. Acúmulo de fósforo no tecido do milho no início do enchimento de grãos em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)...	38
4. Produção de matéria seca de milho no início do enchimento de grãos em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)...	38
5. Rendimento de grãos de milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	38
6. Acúmulo de fósforo nos grãos de milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	39
7 Índice de eficiência ao P pelo milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	40
8. Produção de matéria seca da parte aérea de milho (MSPA), comprimento total de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho, acúmulo de potássio em plantas de milho e eficiência na utilização do potássio (EUK), no monólito coletado no início do enchimento de grãos, em função de sistemas de manejo, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	54
9. Acúmulo de potássio no tecido de milho, 85 dias após a emergência, em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	54
10. Acúmulo de potássio nos grão do milho, em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	55
11. Índice de eficiência ao K pelo milho, 85 dias após a emergência, em função do manejo do solo e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições).....	55

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Distribuição de fósforo (Mehlich 1)(a) e da densidade de raízes (b) no perfil de um Argissolo Vermelho conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo de solo: convencional - faixa (Con/Fx), convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan), plantio direto – linha (Dir/Lin) e Faixa – Faixa (Fx/Fx)., safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	30
2. Distribuição de fósforo (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-lanço, convencional-linha e preparo em faixa-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela)...	33
3. Distribuição de fósforo (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: convencional-lanço, convencional-linha e convencional-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).....	34
4. Distribuição de potássio (Mehlich 1) (a) e da densidade de raízes (b) no perfil de um Argissolo Vermelho conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo do solo: convencional – faixa (Con/Fx), convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan), plantio direto – linha (Dir/Lin) e Faixa – Faixa (Fx/Fx), safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	47
5. Distribuição de carbono orgânico total (COT) no perfil de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo: Dir= sistema plantio direto; Con= sistema convencional de cultivo por 18 anos, safra 2006/07 (Valores de duas repetições)	48
6. Distribuição percentual de classes de tamanho de agregados em um Argissolo Vermelho em sistema plantio direto (Dir) e preparo convencional (Con) nas profundidades de 0-5 (a), 5-10 (b) e 10-20 (c) cm, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).	49
7. Distribuição de potássio (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-lanço, convencional-lanço e preparo em convencional-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).....	51
8. Distribuição de potássio (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-linha, convencional-linha e preparo em faixa-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).	52
9. Distribuição de fósforo (Mehlich 1) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional – lanço (a), convencional – linha (b), plantio direto – lanço (c) e plantio direto – linha (d) no tempo (Valores de duas repetições).....	64
10. Distribuição de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho em	

função do sistema de manejo: convencional – lanço (Con/Lan) (a), convencional – linha (Con/Lin) (b), plantio direto – lanço (Dir/Lan) (c) e plantio direto - linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).....	66
11. Distribuição da densidade de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo : convencional - lanço (Con/Lan) (a), convencional – linha (Con/Lin) (b), plantio direto - lanço (Dir/Lan) (c) e plantio direto – linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).....	67
12. Distribuição das formas de fósforo; inorgânico (Pi), orgânico (Po), fósforo total (Pt) e a razão fósforo orgânico/fósforo total (Po/Pt), no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo, safra 2006/2007 (Valores de duas repetições).....	69
13. Valores de fósforo disponível (Mehlich 1 e Resina Iônica) obtido pela média de subamostras (a e c) e por amostras compostas (b e d) em função do sistema de manejo de um Argissolo Vermelho: convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan) e plantio direto – linha (Dir/Lin), no tempo.....	70
14. Distribuição do carbono orgânico total (COT) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan) e plantio direto – linha (Dir/Lin), no tempo, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).....	71
15. Distribuição de potássio (Mehlich 1) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional - lanço(Con/Lan) (a), convencional - linha (Con/Lin) (b), Plantio Direto – Lanço (Dir/Lan) (c) e Plantio Direto – Linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).....	74

1. INTRODUÇÃO

A adubação é um dos fatores que mais tem contribuído para o aumento da produtividade e da rentabilidade das culturas. Para isso, existe a necessidade de adotar um manejo dos fertilizantes de maneira que atenda as exigências das culturas, que respeite as características do solo, o nível tecnológico do produtor e, ainda, outros fatores que influenciam no desenvolvimento das culturas. No tocante à aplicação de adubos e de corretivos no solo, há carência de uma visão mais ampla sobre o manejo do solo, atentando à necessidade de se conhecer o histórico das áreas agrícolas e o manejo adotado, para que se possa decidir pelo modo, quantidades, fontes e frequência mais adequados de (re)aplicação desses insumos agrícolas.

No Brasil, nos últimos anos, tem havido uma grande expansão na utilização do sistema plantio direto (SPD). Devido às inúmeras vantagens desse sistema, como acúmulo de matéria orgânica, melhor armazenamento de água e redução do impacto de gotas de chuva, ocorrem, como consequência, a diminuição da erosão e maior ciclagem de nutrientes. Lavouras anteriormente conduzidas com preparo convencional do solo, com arações e gradagens, vêm sendo manejadas em SPD. Todavia, quando essa mudança ocorre, não se deve pensar que apenas o manejo do solo muda, pois, especial atenção deve ser dada ao manejo da adubação, uma vez que no SPD se alteram as dinâmicas da matéria orgânica e dos nutrientes no solo que, por fim, resultam em alterações na fertilidade do solo. Esses cuidados são imprescindíveis, pois o sucesso da atividade agrícola, tanto em curto quanto em longo prazo, está diretamente associado a uma boa fertilidade no perfil do solo.

Adequados níveis de fertilidade no perfil do solo são fundamentais para uma distribuição mais homogênea do sistema radicular das culturas em profundidade, o que lhes permite explorar um maior volume de solo em busca de água e de nutrientes, além de lhes proporcionar maior resistência a fatores abióticos, como o estresse hídrico. A distribuição radicular no perfil do solo é afetada por inúmeros fatores dos quais se destacam a umidade do solo e a presença de fatores, físicos e químicos, que restringem o desenvolvimento radicular. Não obstante, os distintos manejos do solo e as formas de aplicação de fertilizantes também contribuem, de forma significativa, na distribuição radicular no perfil do solo.

Diante do exposto, se nota que na transição do sistema convencional de cultivo (SCC) para o SPD ocorrem diversas alterações no solo, as quais devem ser levadas em consideração, juntamente com o histórico de manejo das áreas anteriormente conduzidas sob SCC, na adoção de práticas adequadas de manejo da adubação visando maior produtividade e rentabilidade das culturas sob o SPD. Neste sentido, cabe ressaltar que são escassos trabalhos que avaliam a interação das formas de aplicação de fertilizantes com sistemas de manejo do solo em longo prazo.

Tendo em mente as considerações expostas e levando em conta a complexidade das interações entre tempo x sistema de manejo e modo de adubação, algumas hipóteses podem ser elaboradas: 1) as raízes de milho se concentram nas camadas mais superficiais (0-10 cm); 2) há forte associação entre o teor de fósforo no solo e a concentração de raízes e, conseqüentemente, refletindo na produção de massa seca do milho e no acúmulo de P na parte aérea; 3) o aumento das concentrações de fósforo e de potássio com a redução do volume de solo fertilizado e o grau de revolvimento do solo; 4) há uma contribuição do tempo em solos sob SPD para efeitos mais pronunciados na (re) distribuição de fósforo, de potássio e de raízes no solo.

Neste sentido, foi realizado o presente trabalho, com os objetivos de: a) avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e modos de aplicação de fertilizantes, na distribuição de fósforo, de potássio e de raízes no perfil do solo e no crescimento e rendimento do milho e; b) verificar a influência do tempo na distribuição das raízes e dos nutrientes no perfil do solo nesses sistemas.

2. CAPÍTULO 1: ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL

2.1. O fósforo na planta e sua dinâmica no solo

A importância do fósforo (P) para a nutrição e o crescimento das plantas decorre de sua participação nas membranas celulares, nos ácidos nucleicos, na molécula da adenosina tri-fosfato (ATP) e, assim, em uma série de processos metabólicos, tais como a fotossíntese, a síntese de macromoléculas e a absorção ativa de nutrientes (Marschner, 1995). O P ainda tem destacada importância devido a sua interação com outros nutrientes, afetando a sua disponibilidade no solo e a nutrição vegetal (Blevins, 1999).

Em relação ao milho, o P é um dos macronutrientes exigidos em menores quantidades, superando apenas o enxofre (Resende, 2004), sendo absorvido até próximo da maturação fisiológica dos grãos, sem declínio aparente nos diferentes estádios fisiológicos (Coelho & Alves, 2004). Apesar da relativamente pequena quantidade exigida, cerca de 85% do P absorvido é exportado (Bull, 1993; Coelho & Alves, 2004, Fancelli & Dourado Neto, 2004), o que implica em uma necessidade constante de reposição do nutriente no solo cultivado com milho. Ainda, neste contexto, deve ser salientada a influência de fatores genéticos, que, em condições distintas de disponibilidade de P, promovem diferentes repostas no acúmulo de P na parte aérea, na produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) e na relação MSR/MSPA (Brasil et al., 2005). Cabe ressaltar que, em sistemas conservacionistas, com a ciclagem do P pelas culturas de cobertura (Kamh et al, 1999), não se deve basear, para fins de fertilização, apenas, em balanços de entrada e saída de P no solo, mas, também no período necessário para a conversão do P pouco ou não lábil para o P lábil ou moderadamente lábil (Rheinheimer, 2000).

Os solos tropicais, particularmente os mais intemperizados, apresentam baixos teores de P disponível para as plantas, tornando-se muitas vezes em fator limitante à produção vegetal e necessitam da adição desse nutriente, via fertilizantes, para que possam ser incorporados no processo de produção agrícola. Além disso, a indisponibilização de boa parte do P fornecido na adubação, devido ao fenômeno da adsorção, em consequência de reações com o solo, faz com que a aplicação de maiores quantidades de adubos fosfatados seja necessária (Novais & Smyth, 1999).

Para que o P seja absorvido pelas plantas é necessário que entre em contato e seja absorvido pelas raízes, sendo a difusão o principal mecanismo de seu suprimento até a superfície radicular (Barber, 1962). A difusão de P é influenciada por fatores como teor de água, poder tampão, gradiente de concentração e fator tortuosidade (Corey, 1975). A difusão é causada pelo movimento ao acaso dos íons em direção a raiz, de acordo com o gradiente de concentração gerado na superfície radicular pelo processo de absorção (Barber, 1995). O P se move por difusão a distâncias mínimas e insuficientes com relação à exigência da maior parte das culturas (Grant et al., 2001). O elevado poder tampão do P no solo, resulta em um coeficiente efetivo de difusão do nutriente bem mais baixo quando comparado a outros, como o nitrogênio (nitrato) e o potássio (Barber, 1995).

Devido à sua complexa dinâmica nos solos tropicais, a absorção desse nutriente é influenciada por inúmeros fatores, variando quanto ao manejo e ao modo de adubação, dentre outros.

2.2. Eficiência do uso de fósforo em função do modo de adubação e do preparo do solo

A baixa mobilidade, aliada à reduzida disponibilidade de P, torna o manejo da adubação fosfatada de grande importância na busca por melhores rendimentos das culturas. Diversos estudos têm avaliado os modos de aplicação de adubos fosfatados em diferentes manejos do solo (Klepker, 1991; Model, 1992; Anghinoni, 1992; Wiethölter, 2000; Ceretta et al., 2007). O entendimento da eficiência da adubação fosfatada sendo afetada pelo manejo do solo, passa

pelo conhecimento da distribuição desse nutriente e das raízes no perfil do solo e a sua relação com a ontogenia da planta (Klepker, 1996).

O milho tem se destacado por ser afetado pelo manejo da adubação, pelo fato de ser semeado com maior distância entre linhas em relação às demais culturas de grãos. O seu sistema radicular, profundo e profuso (Amos & Walters, 2006), embora ocupe menos que 1% do volume do solo (Barber, 1995), exerce uma influência importante nas características químicas, físicas e biológicas da interface solo-rizosfera (Rovira, 1979), sendo escassos os estudos que envolvem raízes nesta temática, visto que, o processo de coleta é muito complexo e moroso (Amos & Walters, 2006). Independentemente do método de amostragem, há uma perda de 20 a 40% do peso original das raízes ao longo do processo, dificultando a obtenção de dados precisos (Oliveira et al. 2000). Todavia, perdas de apenas 5 % da biomassa total radicular ocorreram quando da utilização de peneiras de pequena abertura (Livesley et al., 1999).

O P é o nutriente que mais influencia na distribuição radicular no solo (Mollier & Pellerin, 1999), visto que é, predominantemente, transportado às raízes via difusão (Barber, 1962). Tem sido observada, independentemente do manejo ou modo de fertilização, uma grande concentração de raízes do milho na camada de 0-10 cm (Klepker & Anghinoni, 1993; Anghinoni & Meurer 1999; Venzke Filho et al. 2004).

O gradiente causado pela localização de P na linha de semeadura tem sido amplamente reportado (Shear & Moschler, 1969; Ketcheson, 1980; Mackay et al., 1987; Selles et al. 1997), visto que, esse nutriente tende a se acumular onde foi aplicado e só será redistribuído no solo mediante seu revolvimento (Model, 1990; Klepker, 1991). Neste contexto, o decréscimo de P a partir do local de aplicação é em ordem logarítmica das concentrações (Stecker et al., 2001). Embora o suprimento inicial de P seja crucial nas fases iniciais de crescimento das plantas (Anghinoni, 1992), a baixa disponibilidade no restante do solo pode limitar o seu desenvolvimento em períodos de estiagens (Kochhann et al., 1999). As aplicações localizadas, ao mesmo tempo em que aumentam a concentração de P na região adubada, reduzem a proporção de raízes da planta que poderiam absorvê-lo (Resende, 2004), especialmente quando ocorre a redução na disponibilidade de água nessa região (Klepker & Anghinoni, 1993).

De uma maneira geral, é relatado um maior efeito da localização de fosfatos solúveis quando as doses de P a serem aplicadas são baixas (Fox & Kang, 1978; Anghinoni & Barber, 1980). As aplicações de P a lanço podem ser realizadas em casos específicos, quando o solo já apresenta teores de P acima de níveis críticos (Randall & Hoefl, 1988; Bordoli & Mallarino 1998), sem a necessidade de sua incorporação ao solo (Belcher & Ragland; 1972; Moschler et al., 1972; Hargrove, 1985; Howard & Tyler, 1987). Essa incorporação, independentemente do preparo do solo, favorece uma maior exploração do sistema radicular, com a restrição de que aumenta o contato do P com o solo, resultando numa maior insolubilização do nutriente (Klepker & Anghinoni, 1993; Resende, 2004).

Devido ao seu caráter intermediário, as aplicações em faixas do solo têm demonstrado ser um modo eficaz de fertilização, uma vez que aumentam o volume de solo fertilizado e melhoram a distribuição radicular em relação às aplicações em linha, aumentando a disponibilidade de P e possibilitando a obtenção de maiores rendimentos (Brown, 1996; Zerkoune, 1996), independentemente do sistema de manejo do solo (Klepker, 1991).

Segundo Barber (1995), os benefícios do aumento da densidade de raízes, ocasionada por adubação localizada, ocorrem até que a distância que o nutriente pode difundir no solo [$d = (2De)^{1/2}$, em cm; onde $De =$ coeficiente de difusão entre raízes e $t =$ tempo] seja menor do que a distância média entre raízes ($d = 1/\sqrt{\text{volume de raízes}}$, em cm, onde densidade de raízes em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ solo). Isto se deve ao fato de que é, a partir desse ponto, que começa a ocorrer a competição entre raízes por P.

Um aspecto importante, que determina a magnitude do efeito dos modos de adubação e a sua interação com os métodos de preparo do solo, na dinâmica do P e no desenvolvimento radicular, é o espaçamento entre linhas de adubação, pois esse define a relação fertilizante/solo. Em aplicações em linha o grau de mistura do fertilizante no solo tem diferentes magnitudes em função do espaçamento entre linhas. À medida que se reduz o espaçamento, um maior volume do solo é fertilizado e, conseqüentemente, haverá uma tendência de maior desenvolvimento radicular. Para uma mesma dose aplicada, maiores espaçamentos acarretam em menores volumes de solo fertilizados e maiores concentrações de fertilizante, quando aplicado na linha de semeadura.

O teor inicial de P no solo é outro aspecto a ser levado em conta na resposta da cultura aos modos de aplicação e preparo do solo. Em solos com baixos teores de P, geralmente ocorrem respostas da cultura a aplicações localizadas. No caso do milho, a eficiência de aplicações a lanço é similar à adubação localizada quando os teores de P se encontram na classe média ou alta (Randall et al. 1997). De maneira geral, quando o solo apresenta baixos teores de P, há uma maior resposta da cultura às aplicações do adubo fosfatado com maior razão raiz-parte aérea (Anghinoni & Barber, 1980; Khamis et al., 1990).

Por fim, cabe ressaltar que a dose aplicada ao solo também é de grande importância com relação à eficiência das adubações fosfatadas. Neste contexto, de modo geral, à medida que se aumenta o contato fertilizante-solo, deve-se incrementar a dose a ser aplicada (Anghinoni & Barber, 1980; Sousa & Lobato, 2004). No entanto, esta relação estará sempre diretamente atrelada à capacidade de fixação de P do solo em questão (Anghinoni, 2007).

A partir do que foi apresentado, nota-se que é difícil fazer recomendações generalizadas sobre o melhor modo de aplicação de P, uma vez que não há um método que atenda de forma adequada as diversas situações. A eficiência do modo de aplicação vai depender do tipo de solo, do teor de P no solo, da dose aplicada e da distância entre linhas de adubação (Anghinoni, 1992, 2004). A recomendação de um melhor manejo da adubação fosfatada se torna mais difícil quando se considera o cultivo do solo por longo tempo em plantio direto.

No SPD, a localização do fertilizante e o não revolvimento do solo determinam uma concentração de P em pequenos volumes na camada superficial, que pode resultar, inclusive numa redução do crescimento radicular (Hajabbasi & Schumacher, 1994; Mollier & Pellerin, 1999). Mesmo assim, tem ocorrido um melhor aproveitamento do P em lavouras conduzidas em SPD (Coelho & Alves, 2004), ocasionando menor demanda de fertilizantes fosfatados no decorrer do tempo em relação às áreas com SCC (Resende, 2004). A melhoria das propriedades físicas do solo, devido ao acúmulo de matéria orgânica, no SPD, permite um maior desenvolvimento radicular, que pode favorecer um maior rendimento das culturas (Choudhury et al., 1991; Gill et al. 1996). A ocorrência de canais formados por raízes senescentes de culturas

anteriores, pode também viabilizar o crescimento em profundidade das raízes, independentemente do manejo em questão (Eltz et al., 1989).

2.3. O potássio na planta e sua dinâmica no solo

O potássio é um nutriente muito móvel na planta, que está envolvido na maioria dos processos biológicos sem se tornar parte de qualquer composto orgânico (Brady & Weil, 2002). Embora pouco se saiba dos mecanismos que envolvem esse nutriente nos processos bioquímicos vegetais, é sabido que o mesmo exerce funções primordiais para o desenvolvimento da plantas, com destaque na melhor eficiência de uso de água e maior tolerância a doenças (Kilmer et al., 1968).

Ainda que, na maior parte dos solos brasileiros, o K não sofra nenhum processo físico ou químico que reduza sua disponibilidade, o manejo do nutriente tem ganhado uma atenção especial em função do incremento na produtividade, maior exigência na qualidade dos produtos e expansão agrícola em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica (Yamada & Roberts, 2005). Nestas condições de solo, devido à sua elevada mobilidade (Havlin, 2005), o K está mais susceptível à lixiviação. Pelo mesmo motivo, ele é susceptível ao escoamento superficial no sistema plantio direto (SPD), quando na ausência de plantas de cobertura (Mielniczuk, 2005). O mecanismo de difusão, pelo qual a maior parte do K é transportado até as raízes, evidencia ainda mais a necessidade de um manejo adequado, uma vez que a ausência de chuvas pode limitar a quantidade de K que chega às raízes (Marschner, 1995).

Uma vez absorvido, o K usualmente permanece dentro do tecido vegetal na forma de íon dissolvido, sendo que, após a senescência, retorna rapidamente à solução do solo, onde se torna disponível (Epstein & Bloom, 2006).

Embora, no milho, o K seja o nutriente absorvido em maior quantidade, a sua exportação nos grãos é muito baixa (Fancelli & Dourado Neto, 2004). Segundo esses autores, um rendimento de grãos de $9,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, exporta apenas 43 kg ha^{-1} dos 196 kg ha^{-1} absorvidos pelas plantas. Todavia, para que se mantenha um nível adequado de K disponível no solo, a partir da década de 90, as Comissões Estaduais de Fertilidade do Solo, principalmente das regiões

Sul e Sudeste, têm levado em conta a quantidade de K exportada no cálculo das doses recomendadas para a cultura do milho (Coelho, 2005).

A absorção de K pelo milho apresenta um comportamento distinto da absorção de N e de P, uma vez que a maior parte do K absorvido é restrita ao período vegetativo (Olness & Benoit, 1992), chegando a 78% do K absorvido até a fase inicial do pendramento (Raij, 1991). Neste sentido, é importante salientar a dinâmica do acúmulo de K na parte área e nos grãos do milho, pois, segundo Heckman et al. (2001), o teor de K nas folhas e no grão apresenta uma correlação positiva com a produtividade (Hanway et al., 1962). Da mesma forma, parâmetros cinéticos e morfológicos de absorção desse nutriente não parecem ser um fator determinante nas diferenças de rendimento de grãos entre genótipos de milho (Horn et al., 2006).

As plantas absorvem o potássio da solução do solo, sendo esta tamponada pelas formas trocáveis (K-trocável), adsorvidas com baixa energia nos colóides do solo que, por sua vez, são repostas pelas formas não trocáveis (K-não trocável), fortemente adsorvidas (Kist, 2005) do K das entrecamadas de alguns minerais de argila ou, mesmo, pelo K estrutural presente em minerais primários, como as micas e os feldspatos (Havlin, 2005). Esta dinâmica, nos solos tropicais e subtropicais, é afetada tanto pela exportação do nutriente, em sistemas com elevadas produtividades, como também pelas perdas por lixiviação, em solos mais arenosos e/ou com baixos teores de matéria orgânica (Mielniczuk, 2005). Mesmo que isso ocorra, a adição de elevadas doses do nutriente no solo pouco contribuem para formação de reservas não trocáveis (Kist, 2005).

2.4. Eficiência do uso de potássio em função do modo de adubação e preparo do solo

O sistema de preparo e o modo de aplicação do K no solo influenciam o desenvolvimento da planta e a sua dinâmica no solo (Kilmer et al., 1968). Embora o K seja suprido às raízes por difusão (Barber, 1995), existem poucos estudos que relatam a sua importância no crescimento radicular (Nelson, 1968; Rosolem et al. 2001).

O elevado índice salino do fertilizante potássico mais freqüentemente utilizado (cloreto de potássio), influencia a dose a ser aplicada e o modo de aplicação, uma vez que, para doses elevadas, é recomendável a aplicação desse fertilizante a lanço (Souza et al., 1979; Broche & Fernandes, 1999; Silva et al., 2001; Salton et al., 2002; Kluthcouski & Stone, 2003).

Respostas distintas das culturas podem ocorrer quando se considera os modos de aplicação de potássio em sistemas de manejo do solo. No SPD, onde não há revolvimento do solo e há constante adição de resíduos, ocorre um acúmulo de K disponível nas camadas superficiais do solo (Klepker, 1991; Rosolem et al. 2003; Lupwayi et al., 2005). Em sistemas com revolvimento do solo, independentemente do modo de adubação, tem sido observada uma tendência de acúmulo desse nutriente próximo ao colmo das plantas, devido a um fenômeno conhecido como “lavagem de K” (Klepker & Anghinoni, 1995).

A aplicação de K a lanço no SPD gera um questionamento quanto à eficiência da sua absorção pelas plantas, uma vez que, principalmente em solos argilosos, o processo de difusão é mais lento e o nutriente não consegue aprofundar no perfil do solo (Wiethölter, 2000; Cantarella & Duarte, 2004). No entanto, Silva et al., (2001) observaram um incremento na saturação de K na CTC, na camada de 20 a 40 cm, em um solo argiloso com teores médios de carbono orgânico total.

A aplicação na superfície promove maior absorção desse nutriente nos estágios iniciais de desenvolvimento do milho (Larson & Hanway, 1977), quando a absorção do nutriente é máxima (Coelho, 2005). Adubações mais profundas possivelmente estimulam o crescimento radicular, tornando a planta mais resistente a períodos de escassez hídrica (Mallarino, 1997; Kluthcouski & Stone, 2003), embora não tenham havido diferenças entre a aplicação de K na faixa e a lanço (Wilhelm & White, 2004).

Cabe ainda salientar que o teor inicial de K no solo tem grande influência sobre as respostas das culturas à adubação potássica. Em estudo com épocas e modos de aplicação de K, na sucessão trigo/milho, foi encontrada baixa probabilidade de resposta da produtividade de grãos à adubação potássica em solos com teores altos desse nutriente (Pavinatto & Ceretta, 2004).

Em suma, a capacidade de ciclagem de K, principalmente em sistemas conservacionistas, deve modular o manejo da fertilização potássica (Kayser & Isselstein, 2005), para que as decisões tomadas tenham um respaldo positivo, tanto a respeito do aspecto econômico quanto da sustentabilidade ambiental.

2.5. Distribuição de nutrientes e de raízes no solo no tempo em sistemas de manejo do solo

Os sistemas de cultivo, com diferentes graus de revolvimento do solo, apresentam propriedades físicas (Cruz et al., 2003), biológicas (Moreira & Siqueira, 2006) e químicas (Lopes, 2004) distintas. Neste contexto, tem sido observado um avanço significativo do SPD no Brasil, o qual tem sido adotado em uma área ao redor de 25,5 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2008).

Estudos de longo prazo em solos submetidos ao SPD (Muzilli, 1983; Eltz et al., 1989) têm mostrado haver uma concentração de nutrientes, principalmente os de menor mobilidade (Barber, 1995), como o P e o K, nas camadas superficiais em relação aos solos submetidos a sistemas de manejo não conservacionistas. Ademais, esses nutrientes apresentam maior variabilidade em relação aos demais (Cavalcante et al., 2007) e com dinâmicas bem distintas nos solos (Novais et al., 2007). Desta maneira, se faz necessária uma abordagem separada do P e do K para um melhor entendimento da (re) distribuição desses nutrientes em sistemas de manejo do solo e da adubação ao longo do tempo.

2.5.1 Distribuição do P

Em solos tropicais, o P pode ser considerado o nutriente com menor mobilidade (Novais et al., 2007). Alterações na dinâmica do P no solo em SPD ao longo do tempo são oriundas de diversos fatores. Dentre estes, as aplicações anuais de fertilizantes fosfatados, a liberação de P durante a decomposição dos resíduos vegetais e a menor fixação de P (Sidiras & Pavan, 1985), podem ser destacados. Desta forma, o P, nestas condições, tende a se acumular próximo à superfície do solo ao longo do tempo (Selles et al., 1998; Santos & Tomm,

2003). Todavia, sua redistribuição, em longo prazo, ocorre tanto no sentido vertical quanto no sentido horizontal (Duiker et al., 2006).

O P, devido à sua baixa concentração na solução do solo (Rajj, 1991), tem sua mobilidade e sua (re) distribuição no solo restritas ao longo dos anos (North Carolina, 1995). Porém, em áreas com chuvas constantes esse comportamento pode ser alterado (Busman et al., 2002).

O acúmulo de P nas camadas superficiais em solos sob SPD é um fato já consolidado, porém a camada na qual este nutriente se concentra parece variar. O acúmulo de P na camada de 0-10 cm, em solos sob SPD foi verificado após 5, 6 e 22 anos por Selles et al., (1997), Bravo et al., (2007) e Feiziene et al., (2006), respectivamente. Devido à maior presença de Al trocável na camada 5-10 cm em solos sob SPD, em longo prazo, a disponibilidade de P pode ser reduzida (Merten & Mielniczuk, 1991), dependendo do teor de matéria orgânica nesta mesma camada (Nolla & Anghinoni, 2006).

No entanto, a interação do tempo com o sistema de manejo adotado pode, por outro lado, contribuir para uma retenção do P na camada de 0-5 cm em solos sob SPD, em longo prazo (Merten & Mielniczuk, 1991; Cowie et al., 1996; Bayer & Mielniczuk, 1997; Falleiro et al., 2003; Byers, 2006), de tal forma que não são observados incrementos nos teores de P abaixo dessa camada (Hussain et al., 1999; Essington & Howard, 2000). Tais relatos corroboram com outros relatos da literatura que mostraram teores de P disponível, para camada de 0-2,5 cm, de três (Duiker et al., 2006) a dez vezes (Bayer & Bertol, 1999) maiores no SPD em relação ao SCC, em áreas submetidas sob tais manejos por vários anos.

Esse acúmulo superficial também apresenta desvantagens, ressaltando as possíveis perdas de P por erosão (Andraski et al., 2003) e, principalmente, a indisponibilidade desse nutriente em anos de estiagem (Novais & Smyth, 1999). Também, esse gradiente pode induzir a uma maior concentração de raízes na superfície, tornando a planta mais susceptível a períodos de estresse hídrico (Klepker, 1991).

O revolvimento do solo contribui para a homogeneização nos teores de P (Essington & Howard, 2000; Laurginson et al., 2004), no entanto, tanto a fração orgânica quanto a inorgânica nas camadas superficiais ocorrem em maior magnitude no SPD em longo prazo (Selles et al., 1997; 1999). Segundo estes

autores, o acúmulo de P oriundo dos fertilizantes aplicados se reflete diretamente nos teores de P extraídos com resina trocadora de ânions (P-resina) e que os menores teores de P total (Pt), nas camadas superficiais, no solo submetido a freqüente revolvimento, ocorrem em função das perdas por processos erosivos.

O grau de revolvimento afeta diretamente a distribuição do P no solo (DuPreez et al., 2001), de modo que somente na camada arável (até 20 cm) os teores de P, independentemente do manejo de solo adotado, são superiores aos teores no solo sob campo nativo (Almeida et al., 2005). Porém, o efeito da mobilização do solo na uniformização do P no perfil do solo pode ser rápido, sendo necessário apenas um revolvimento para que a redistribuição do P na camada arável do solo ocorra (Eltz et al., 1989).

A importância de um sistema de rotação de culturas na redistribuição do P também deve ser considerada, principalmente devido a sua importância no SPD (Lopes, 2004). A redistribuição do P pode ser mais intensa pelo uso de espécies com sistemas radiculares mais densos e agressivos (Maria & Castro, 1993), uma vez que sua posterior decomposição fornecerá P em maiores profundidades (Gregory, 2006). Deste modo, a presença do milho, com sistema radicular fasciculado, em um sistema de rotação pode resultar em uma reciclagem mais intensa do P (Eckert & Johnson, 1985; Duiker et al., 2006).

A quantidade (Muzilli, 1983) e o tipo de argilominerais (Cowie et al., 1996), também afetam a mobilidade do P no solo e sua estratificação no SPD em longo prazo. Deste modo, um cuidado deve ser tomado na interpretação dos efeitos de sistemas de manejo na dinâmica do P no tempo, pois o tipo de solo influenciará grandemente na magnitude dos efeitos de preparo e da forma na qual o P é fornecido para as plantas. Neste contexto, algumas ressalvas já foram feitas quanto à mobilidade desse nutriente no SPD em longo prazo e algumas possíveis causas.

A maior atividade e biomassa de minhocas (Tebrugge & During, 1999) tem sido, muitas vezes, a melhor explicação para a descida do P no SPD (Sá, 1994). A permanência dos canais contínuos, responsáveis pela geração de um novo fluxo preferencial (Dwyer et al., 1996), deixado pelas minhocas e raízes é um grande diferencial dos SPD em relação aos cultivos com revolvimento,

sendo que esses canais permanecem por mais tempo em solos argilosos (Addiscott & Thomas, 2000).

De modo geral, não se pode fixar o tempo necessário para que haja a redistribuição do P, mas, o que se verifica é uma tendência no incremento na magnitude deste comportamento com o decorrer do tempo. Neste contexto, o período de seis anos sob SPD foi insuficiente para que Pauletti et al. (2000) observassem a descida do P no solo. Mudanças no teor de P, em sistemas de manejo podem demorar a ocorrer, sendo necessários períodos de até sete anos para se observarem alterações a 10 cm (Maria & Carmo, 1993).

O modo de adubação também pode influenciar na estratificação de P no tempo, pois, sendo superficial, independentemente de ser na linha ou a lanço, acarretará num gradiente de P no perfil (Howard et al., 1998). Ainda, a contribuição da profundidade da adubação fosfatada, por meio do seu efeito residual, para o aumento do P em profundidade deve ser destacada (Eghball et al., 1995). Aplicações profundas de fertilizantes fosfatados, independentemente do grau de revolvimento do solo, podem homogenizar os teores de P até 20 cm (Mallarino & Borges, 2006). Porém, estes autores observaram a presença de P em profundidades maiores que a da colocação do adubo, em uma das áreas avaliadas. Uma possível explicação para tal fato é o efeito da incorporação do P aplicado no SPD por intermédio do leve preparo do solo, que ocorre em cada semeadura, e da liberação de nutrientes contidos nas raízes (Ciotta et al., 2002; Lopes, 2004). Assim sendo, o modo de adubação, influi diretamente na distribuição do P, no SPD, em longo prazo (Vadas et al., 2008). Neste contexto, o efeito da decomposição dos resíduos orgânicos depositados na superfície (ciclagem) e a decomposição de raízes no solo (reciclagem) na descida de P devem ser destacados (Anghinoni, 2007).

A compartimentalização do P é importante para o entendimento de uma possível maior mobilidade deste nutriente no SPD. De modo geral, tem sido observado um maior teor de P_t devido à adição de resíduos nas camadas superficiais, às reações de adsorção e à sua reciclagem pela mineralização do material orgânico oriundo dos resíduos (Sá, 1999).

Todavia, é discutível se realmente pode haver um aumento no teor de P_t no SPD em relação aos demais manejos, pois se espera que para a mesma adubação e na ausência de perdas e saídas de P do solo, seriam esperados

valores de P_t semelhantes, alterando apenas a forma na qual o P se encontra no solo. Desta forma, o estudo das frações de P toma magnitude e relevância na avaliação da sua mobilidade em solos submetidos ao SPD em longo prazo. Porém, os resultados sobre esse tema encontrados na literatura são divergentes.

Nesta temática, Sá (1994) enfatiza que há um incremento do P em profundidade no SPD ao longo dos anos, devido à descida do P na forma orgânica. Contudo, Anghinoni (2007) faz a ressalva de que ambas as frações de P, inorgânica (P_i) e orgânica (P_o), decrescem em profundidade, e que o aumento relativo da fração orgânica (P_o/P_t), quando verificado, resulta de um decréscimo da fração inorgânica em maior proporção em relação à fração orgânica. Dados apresentados por Rheinheimer (2000) suportam tal afirmação, pois, num estudo detalhado sobre a dinâmica do P em sistemas de manejo de solos, este autor concluiu que a adição superficial de fertilizantes fosfatados no SPD gerou um gradiente de concentração de P_t em profundidade, e, que este P se encontrava, predominantemente, na forma inorgânica (P_i).

O entendimento da relação carbono orgânico (CO) com o P_o (CO/P_o) é importante quando se busca entender melhor o incremento de P no perfil do solo em SPD (Rheinheimer et al., 1998), pois, a estratificação de P tem tido comportamento similar às concentrações de CO (Scheiner & Lavado, 1998). Em SPD, o acúmulo de matéria orgânica está diretamente associado à estratificação do P_o , de forma que, em camadas mais profundas, onde há uma redução dos teores de MO, também é verificado uma redução no P orgânico (Hussain et al., 1999).

A complexidade do fornecimento de P, oriundo de formas orgânicas, às plantas carece de reflexão, visto que aumentos nos teores de P disponível nas camadas superficiais sob SPD, em longo prazo, podem ser obtidos mesmo na ausência de fertilizações fosfatadas (Ismail et al., 1994). Deste modo, a importância do P_o no SPD se consolida na medida em que esta fração funciona como reservatório principal para o reabastecimento dos íons fosfato para a solução do solo (Buchanan & King, 1993; Guerra, 1993; Sá, 1999).

A forma na qual o P é fornecido pode grandemente alterar a sua distribuição no solo, pois o fornecimento do P em formas orgânicas parece favorecer aumento nos teores de P em maiores profundidades em relação às

aplicações via fertilizantes minerais (Ellmer et al., 2000). O movimento do P, devido a aplicações sucessivas de esterco suíno, foi detalhadamente discutido por Houtin et al. (1997), que constataram haver um movimento do Po solúvel e dos produtos oriundos da mineralização da MO, devido à percolação da água durante 14 anos. Tal efeito, segundo esses autores, é devido ao grau de mobilidade do P e sua distribuição no solo, pela infiltração da água, é influenciada pela hidrólise dos compostos orgânicos de P e adsorção das moléculas orgânicas e inorgânicas pelos colóides, entre outros fatores.

O gradiente de P, devido ao seu suprimento e a ciclagem de suas formas orgânicas (Andraski et al., 2003), tende a se acentuar com o tempo em solos sob SPD (Díaz-Zorita & Grove, 2002). Neste sentido, os incrementos nos teores de Po são maiores quando o solo que recebe a adubação orgânica é rico em P (Tate & Salcedo, 1988). Segundo estes autores, o P está inserido em dois ciclos, um inorgânico, controlado pelos processos pedológicos, e outro biológico, dirigido pelas plantas e microorganismos. Todavia, a ciclagem e a reciclagem e, conseqüentemente, redistribuição de P no perfil do solo, não ocorrem com a mesma intensidade em sistemas nos quais o solo é revolvido (Ellmer et al., 2000).

A dinâmica da descida do P no SPD ao longo do tempo parece estar longe de ser elucidada. Parte desse fato pode ser explicada pela exclusão dos compartimentos de P menos lábeis em estudos do movimento do P no solo, uma vez que os métodos tradicionais de extração de P, muitas vezes não são capazes de detectar o acúmulo do Po e do Pi em sistemas com elevado aporte de resíduos ao solo (Beck & Sanchez, 2004).

2.5.2 Distribuição do potássio

A mobilidade do K no perfil do solo ao longo dos anos é influenciada por inúmeros fatores (Kayser & Isselstein, 2005), sendo difícil a distinção quanto à magnitude da importância de cada um deles. A estratificação dos teores de K no SPD, no tempo, ocorre tanto no sentido horizontal (Schlindwein & Anghinoni, 2000a) como, principalmente, no vertical (Holanda et al., 1998; Schlindwein & Anghinoni, 2000b; Santos & Tomm, 2003, Falleiro et al., 2003). Compreender os efeitos dos sistemas de preparo do solo e de manejo da adubação na

distribuição do K no solo é importante, uma vez que influencia tanto nas recomendações de adubação quanto na forma de amostragem do solo (Wiethölther et al., 1998).

O tempo de adoção de sistemas de cultivo algumas vezes mostra situações distintas e contraditórias. O acúmulo de K na superfície do solo sob SPD em relação a sistemas com revolvimento do solo (Muzzilli, 1983; Murdock et al. 2008) pode não contribuir para o incremento na produtividade (Rasmussen, 1999). No entanto, em anos agrícolas sem déficit hídrico, pode haver um aumento do rendimento do milho com aumento do grau de estratificação (Vyn & Ball, 2008).

Ao longo dos anos, o acúmulo do K nas camadas superficiais nem sempre é maior no SPD em relação a outros sistemas de cultivo, havendo relatos de maiores acúmulos na camada de 0-5 cm no cultivo mínimo em relação ao SPD (Hussain et al., 1999). Isto foi atribuído à maior enxurrada no SPD e à elevada mobilidade deste nutriente. Todavia, a estratificação do K pode ocorrer independentemente do tipo de cultivo (Schlendwein & Gianello, 2004; Mallarino & Borges, 2006). A continuidade de poros no SPD, devido, principalmente, à maior presença de bioporos (Cowie et al., 1996; Tebrügge & Düring, 1999), pode favorecer a infiltração e a percolação do K que, por sua vez, é influenciada por sua concentração na solução, o modo e a dose de fertilizante e o volume de água aplicado ao solo (Ernani et al., 2007).

A capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos influencia a retenção de K no solo, possibilitando maior ou menor mobilidade do nutriente no perfil e pode ser a principal característica que afeta a disponibilidade do K para as plantas (Silva & Meurer, 1988). Em solos menos tamponados, principalmente com a adoção do SPD, na presença de chuvas, pode haver perdas significativas de K por lixiviação (Mielniczuk, 2005). A possibilidade do secamento superficial do solo por evaporação (Silva & Bohnen, 2000) ou intensa absorção radicular de água (Klepker, 1996), pode reduzir a disponibilidade do nutriente, apesar dos elevados teores nas camadas superficiais. Aplicações superficiais sucessivas e a não mobilização do solo tem proporcionado a manutenção de maiores teores de K no SPD em relação ao preparo convencional (Silva, 1996).

A textura também influencia a redistribuição de K em sistemas de manejo no tempo, pois o K possui maior mobilidade em solos mais arenosos

(Johnston, 2008), de forma que, nesses solos, a utilização de espécies com sistema radicular mais profundo pode ser uma ferramenta de grande utilidade na recuperação do K carregado a essas camadas (Veenstra et al., 2006).

A influência das espécies na capacidade de ciclagem do K é fundamental no entendimento de sua distribuição no solo em distintos sistemas de manejo, pois, o acúmulo, e posterior liberação diferenciada de K pela plantas, resultam em diferentes aportes de K ao solo (Rosolem et al. 2003). Ainda, segundo esses autores, a quantidade do nutriente liberada depende do teor de K na palha (poder tampão) e do fator de tortuosidade (dependente da morfologia da espécie). Desta forma, fica evidente que o manejo da palha é crucial quando se avalia a distribuição de K no perfil de um solo (Du Preez et al., 2001), embora também possam ocorrer perdas de K por lixiviação, independentemente da presença de resíduos (Bertol et al., 2004).

O modo e a dose de fertilizante potássico aplicado também influenciam na (re) distribuição do K no perfil do solo, de modo que pode haver uma maior estratificação desse nutriente com aumento das doses aplicadas a lanço (Lauringson et al., 2004).

A capacidade de amenizar a estratificação, resultante do uso contínuo do SPD, foi estudada por Yin & Vin (2002), os quais afirmam que somente um ano de cultivo convencional pode reduzir significativamente, mas não eliminar esta condição estabelecida pelo SPD. Mesmo, o uso intermitente de um cultivo convencional parece não ser suficiente para eliminar a estratificação do K em solos sob SPD já consolidado (Pierce et al., 1994).

Todavia, Lopes (2004) ressalta que ao longo do tempo de uso do SPD, pode-se esperar que o K aplicado em superfície ou na linha de semeadura venha a ser incorporado até cerca de 8 a 10 cm, por meio do revolvimento do solo que ocorre em cada semeadura e pela lixiviação desse nutriente. Embora o K tenha apresentado baixíssima mobilidade em relação ao local aplicado, a mobilização do solo por ocasião da adubação pode explicar o acúmulo de K em camadas mais profundas (7,5- 15 cm) (Rehm & Lamb, 2004).

Por outro lado, no SPD, compostos hidrossolúveis podem alterar a mobilidade e, conseqüentemente, a dinâmica desse nutriente em longo prazo (Pavan, 1997). Assim, a adoção do SPD, no tempo, tem um efeito custo-benefício mais favorável em relação aos sistemas não conservacionistas

(Koutic et al., 2005). Todavia, ainda existem alguns entraves quanto à maximização do uso desse sistema, pois, sua redistribuição pode ser limitada na ausência de sua incorporação no solo (Macray et al., 1987) que, por sua vez, pode promover a deposição de K até 30 cm no solo (Wright, 2007).

Perante o exposto, verifica-se que muitos são os fatores que afetam a dinâmica do K no solo ao longo do tempo. Todavia, sob sistemas com revolvimento de solo, este nutriente parece apresentar um comportamento mais previsível em relação a sua distribuição no solo conduzido no plantio direto, pois, no tempo, os efeitos das novas inter-relações estabelecidas no solo, inerentes ao SPD, na dinâmica desse nutriente, carecem de mais estudos.

2.5.3 Distribuição de raízes

Vários estudos realizados no Brasil, em nível de campo, têm verificado que o sistema de manejo do solo afeta a distribuição do sistema radicular (Pedó, 1985; Klepker, 1991; Klepker & Anghinoni 1995; Klepker, 1996; Mello Ivo & Mielniczuk, 1999; Miranda et al., 2003; Motta et al., 2006). A inclusão do fator tempo na dinâmica do sistema solo (Nicolodi, 2007), trouxe um novo enfoque para a avaliação da fertilidade dos solos, pois, nesta visão sistêmica, as propriedades do solo passam a ser interdependentes e inter-equilibradas. Desta forma, pode-se esperar que hajam alterações no desenvolvimento e na distribuição radicular no solo, visto que as raízes são extremamente sensíveis a alterações na pedosfera.

Este conhecimento é fundamental, pois o aprofundamento radicular pode ter efeitos cruciais no rendimento do milho, pelas necessidades hídricas críticas em determinadas fases fenológicas (Wiesler & Horst, 1994; Fancelli & Dourado Neto, 2004).

É de conhecimento amplo que a temperatura (Kovar et al., 1992), a densidade do solo na camada superficial (Freddi et al., 2007) e nas camadas mais profundas (Rosolem et al., 1994), a competição entre plantas (Dexter, 1987), os resíduos na superfície (Acharya & Sharma, 1994), a disponibilidade de nutrientes e a umidade (Pinton et al., 2007) afetam diretamente o desenvolvimento do sistema radicular do milho. No entanto, poucos são os

estudos que inter-relacionam atributos do solo com o desenvolvimento radicular do milho ao longo do tempo.

Existem inúmeras controvérsias quanto ao efeito do manejo do solo na distribuição do sistema radicular de culturas anuais. Na cultura do milho, com morfologia do sistema radicular do tipo fasciculado, há um favorecimento para maior concentração de raízes na camada de 0-10 cm (Silva et al., 2000). Por outro lado, em períodos de estresse hídrico, a presença de raízes em camadas mais profundas pode ser uma importante ferramenta para manter adequado suprimento de água para a cultura. O manejo do solo influencia diretamente o crescimento do sistema radicular mais profundo (Barber, 1971; Unger & Kaspar, 1994; Klepker, 1996; Qin, 2005; Pietola, 2005). Neste contexto, experimentos avaliando os impactos de manejos distintos e seus efeitos em propriedades do solo, com conseqüente rearranjo da distribuição radicular no tempo, têm trazido um novo enfoque para o estudo do sistema radicular das culturas.

O efeito do tempo tem sido importante quando se compara a distribuição radicular do milho em diferentes sistemas de manejo (Ball-Coelho et al., 1997). Segundo estes autores, o tempo parece favorecer uma maior distribuição radicular nos sentidos horizontal e vertical em solos sob plantio direto e preparo convencional, respectivamente. Alterações na distribuição radicular em função do manejo em longo prazo ocorrem em diferentes profundidades (Ishaq et al., 2003).

O revolvimento do solo pode influenciar, de forma positiva, a taxa de crescimento inicial radicular e, conseqüentemente, o desempenho da cultura (Petersen, 2008). Este autor ressalta que preparos de solo que mobilizam frações intermediárias de solo (faixas), em longo prazo, podem proporcionar um melhor movimento e armazenamento de água no perfil do solo, criando condições adequadas para o desenvolvimento inicial da cultura, como também permitindo maior aprofundamento do sistema radicular.

A aparente predominância de raízes nas camadas superficiais no SPD, mesmo em longo prazo, é aceitável, pois, Taylor (1983) e Nicoullaud (1994) constataram um efeito da sazonalidade pluviométrica na distribuição radicular, reduzindo ou até mesmo inibindo os efeitos do manejo adotado. Sendo assim, o SPD pode restringir a exploração do solo pelo sistema radicular em relação a sistemas com graus de revolvimento mais intenso (Hughes et al.,

1992). Além disto, esses autores chamaram a atenção sobre o efeito da combinação do uso de implementos e a textura do solo, onde o solo mais argiloso restringiu, em maior magnitude, o aprofundamento radicular ao longo dos anos. Parece haver uma maior redistribuição radicular com o tempo em solos arenosos sob SPD, embora a interação tipo de solo versus distribuição de chuvas seja um fator também importante (Lampurlanés et al., 2000).

Neste sentido, em solos com maior capacidade de retenção de água em anos de déficit hídrico, o SPD, devido aos bioporos e a preservação da estrutura natural, facilita a penetração radicular, mesmo com a presença de camadas superficiais mais densas e com maior resistência à penetração.

Embora o milho seja uma espécie bastante susceptível a estresses de caráter físico (Goss et al., 1989), tal plasticidade radicular (Engel et al., 1994; Bengough et al., 2006), é compensada pela própria distribuição mais contínua de poros em solos sob SPD. Desta forma, existe uma lacuna no processo de obtenção de níveis críticos para qualidade do solo, já que a formação de bioporos no SPD pode modificar o movimento da água no solo, afetando a função e o crescimento radicular (Cannell & Hawes, 2003).

A condição hídrica do solo altera a anatomia radicular (Vasellati et al., 2001), contribuindo para uma distribuição radicular diferenciada. Neste contexto, independentemente da espécie, parece haver um maior aprofundamento radicular em anos com maior déficit hídrico (Merril et al., 2002). Porém, a rotação de culturas no SPD, em longo prazo aparenta trazer vários benefícios com relação à exploração de solo pelas raízes (Franchini et al., 2000), devido à complementaridade entre as espécies (Gregory, 2006).

O tempo exerce um papel importante na distribuição radicular, embora tal efeito não esteja completamente compreendido. Não obstante a isso, a densidade de raízes de milho é influenciada pela interdependência do tipo de solo e clima, associados à profundidade e ao efeito do tempo, que podem alterar atributos físicos e químicos, principalmente em sistemas conservacionistas, que provocam maior aprofundamento das raízes (Qin et al., 2005). Neste contexto, os impactos do clima e das condições do solo no desenvolvimento radicular parecem ganhar magnitude com o tempo (Herrera et al., 2006).

É sabido que a dinâmica de nutrientes diretamente associados com a distribuição radicular, como o P, é alterada continuamente ao longo dos anos de

cultivo sob SPD (Anghinoni, 2007) e que novas propriedades emergem das inter-relações estabelecidas no solo sob SPD (Nicolodi, 2007). Neste *quasinovo* equilíbrio em SPD consolidado, a influência da fauna, principalmente da mesofauna, tem de ser destacada (Adiscott, 1995).

Neste contexto, pode-se ressaltar que neste novo prisma sistêmico, a associação entre diferentes atributos ganha magnitude, ao passo que avaliações isoladas se tornam menos importantes. A continuidade de poros, as melhorias no estado de agregação do solo e o acúmulo de MO ocorrem continuamente no solo sob SPD, tornando o tempo de adoção do sistema um fator cada vez mais importante na tomada de decisão referente ao manejo da fertilidade no solo.

Atualmente, ainda há muito que se pesquisar sobre o efeito, em longo prazo, de diferentes manejos no desenvolvimento radicular das culturas anuais. As controvérsias sobre quais são os principais atributos do solo e como estes afetam o crescimento radicular dessas culturas, são convidativas e desafiadoras, pois, nesta abordagem do sistema solo-planta, o tempo é um fator indispensável para o entendimento desse sistema complexo, planta-solo-atmosfera.

3. CAPÍTULO 2. DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E DE RAÍZES E CRESCIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

3.1. Introdução

O manejo adequado do solo é um fator decisivo quando se almeja a obtenção de sistemas ambientalmente sustentáveis e economicamente lucrativos. O grau de revolvimento do solo está diretamente relacionado ao manejo do solo adotado podendo, na ausência de preparo, resultar no acúmulo superficial de matéria orgânica e de nutrientes no solo (Eltz et al., 1989), principalmente em regiões de clima tropical e subtropical. Neste contexto, a adoção do sistema plantio direto cresceu grandemente a partir do início da década de 90 no Brasil (FEBRAPDP, 2008). A utilização do SPD estabelece novas inter-relações no solo, como por exemplo, as que envolvem o grau de preparo do solo e o modo de aplicação de nutrientes, as quais tem se mostrado importantes (Sousa & Lobato, 2004), em virtude de poderem afetar o volume de solo fertilizado e, dessa forma, a disponibilidade de nutrientes às plantas (Anghinoni & Barber, 1980).

O fósforo (P), devido à sua baixa difusão no solo (Barber, 1995) e à sua reduzida disponibilidade em solos oxídicos (Novais & Smyth, 1999), é o macronutriente que tem a sua disponibilidade mais afetada pelo manejo do solo e da adubação (Model & Anghinoni, 1992). Neste sentido, destacam-se cinco fatores determinantes com relação ao manejo da adubação fosfatada: o teor inicial de P no solo, a dose do fertilizante, o volume do solo fertilizado, a textura do solo, mineralogia e o tipo de fertilizante (Anghinoni, 2004).

A disponibilidade inicial elevada de P, em função de aplicações localizadas de fósforo solúvel e mediante o não revolvimento do solo, favorece seu suprimento nas fases iniciais de desenvolvimento das culturas (Anghinoni, 1992). Espera-se, por outro lado, que aplicações que misturam o adubo com um volume de solo intermediário entre as aplicações em linha e a lanço, esta com incorporação do adubo no solo, possam ocasionar rendimentos de milho mais elevados (Barber, 1984; Brown, 1996). Todavia, o modo de adubação pode se tornar menos importante quando o solo já apresenta teores de P em níveis adequados para o crescimento e a produção das culturas (Bordoli & Mallarino, 1998). Deste modo, a avaliação do sistema radicular é crítica, pois sua distribuição expressa o efeito do manejo nas condições físicas e químicas do solo. A distribuição de raízes próximas à zona enriquecida de nutrientes favorece o estabelecimento das plantas, e, em fases posteriores do seu desenvolvimento, a sua distribuição ao longo do perfil do solo, passa a ser fundamental para absorção dos nutrientes do solo, principalmente em períodos de estresse hídrico (Gregory, 2006).

O acúmulo do P, devido às aplicações localizadas no SPD, resulta em concentrações de raízes nas camadas superficiais e próximo às linhas de semeadura (Mackay et al., 1987; Klepker & Anghinoni, 1993). Todavia, concentrações muito elevadas desse nutriente no solo podem ter efeitos deletérios para as plantas (Barber, 1995). Desta forma, é necessário um cuidado especial quando se trabalha com sistemas de manejo do solo e da adubação que possam resultar em acúmulo elevado de P e raízes em volumes restritos de solo (Klepker & Anghinoni, 1993).

Aplicações localizadas de fertilizantes podem, além de elevar o grau de salinidade, resultando em maiores concentrações radiculares nessas microrregiões, reduzindo a disponibilidade de água, trazer como consequência uma menor difusão de nutrientes, como o fósforo, até as raízes (Barber, 1995). Neste contexto, o maior crescimento de raízes nas pequenas frações de solo fertilizado não resulta necessariamente em maior crescimento total de raízes e que maiores valores de eficiência na utilização de P (EUP) podem ser obtidos em aplicações a lanço e em faixa em preparo convencional do solo ou de faixa fertilizada (Klepker & Anghinoni, 1993).

Entretanto, o manejo do solo ao longo dos anos pode afetar a intensidade de processos e de mecanismos do solo relacionados à agregação e à presença de bioporos (Nicollodi et al., 2008), o que pode afetar diferentemente a distribuição de P e de raízes no perfil do solo. Assim, pode-se esperar em áreas sob SPD com adubações sucessivas e localizadas que ocorram condições favoráveis para a descida de P no perfil do solo (Sá, 1999; Anghinoni, 2007). Aliado a essa possível descida de P no perfil, o acúmulo de carbono e a maior atividade microbiana nesse sistema podem favorecer uma distribuição diferenciada de raízes no solo em longo prazo (Qin, 2005).

O presente trabalho teve, então, como objetivo avaliar o efeito de modos de preparo do solo e de aplicação de fertilizantes por 18 anos, na distribuição de fósforo e de raízes e a sua relação com o crescimento do milho.

3.2. Material e Métodos

O experimento foi instalado em 1988, na Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS), região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2006), com textura franco-argilo-arenosa. A precipitação média anual é de 1440 mm e o clima da região, segundo a classificação de Koeppen, é o subtropical de verão úmido quente (Cfa) A área apresenta um relevo ondulado a suave ondulado com declividade média de $0,03 \text{ m m}^{-1}$.

O local do ensaio esteve na condição de campo nativo até 1974. Nos dois anos seguintes (75/76) foi cultivado convencionalmente. Até a instalação do ensaio, a condição de pousio foi interrompida somente em 1985 por um cultivo de aveia em preparo convencional do solo.

Em maio de 1988, foi aplicado calcário em toda a área experimental, sendo este incorporado por meio de uma aração e duas gradagens. Posteriormente foi cultivada a aveia preta (*Avena strigosa*, S.) sendo, após a colheita, aplicados os modos de preparo do solo, em outubro antecedendo a implantação do milho (*Zea Mays*, L).

Os principais atributos químicos do solo antes da aplicação dos tratamentos, na camada de 0-15 cm, eram: pH em água 5,2, P e K (Mehlich 1) 2,5 e 132 mg dm⁻³, respectivamente e 30 g kg⁻¹ de matéria orgânica, respectivamente.

Os preparos de solo consistiram de: preparo convencional (Con - uma aração até 15-17 cm de profundidade e duas gradagens); preparo em faixas (Fx - 20 cm de largura e 15 cm de profundidade, centrada na linha de semeadura do milho com linhas espaçadas de 1,0 m, usando um sulcador tipo “asa de andorinha”) e sem preparo (Dir - sulco para semeadura do milho com 5 cm de largura na linha do milho e 5-8 cm de profundidade = plantio direto), e os modos de aplicação de fósforo (P) foram: lanço (Lan), faixa (Fx) e linha (Lin), efetuados manualmente e após os preparos do solo.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em um bifatorial 3x3, separados por uma faixa de 5 m, em parcelas subdivididas, com os métodos de preparo do solo ocupando as parcelas principais (24x12 m) e os modos de adubação as subparcelas (12x8 m), com três repetições. A seqüência de culturas utilizada a partir de outubro de 1988 foi de milho, na primavera/verão e aveia + ervilhaca (*Vicia sativa*) no outono/inverno, com reaplicações de calcário a cada quatro anos, a partir da primeira aplicação (1988), visando elevar o pH SMP para 6,0 Comissão de química e fertilidade do solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC) (2004). Maiores detalhes sobre a condução do experimento ao longo do tempo podem ser obtidos em Marcolan (2002).

Para o presente trabalho, o milho (híbrido Pioneer 30R50) foi semeado em 20 de outubro de 2006, logo após a aplicação dos tratamentos de preparos de solo e modos de adubação, com uma densidade de semeadura de 5 a 7 plantas m⁻¹ e espaçamento entre linhas de um metro. Os principais atributos químicos do solo, na camada de 0-15 cm, antes da aplicação dos tratamentos eram: pH em água 5,6, matéria orgânica 30 g kg⁻¹, P e K (Mehlich 1) 8,0 e 130 mg dm⁻³, respectivamente, e 0,2, 4,0 e 1,8 cmol_c dm⁻³ de Al⁺³, Ca⁺² e Mg⁺² trocáveis (KCl 1mol L⁻¹), respectivamente. Com base nestes resultados, foi utilizada uma adubação de base de 60, 150, 100 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, utilizando as fontes uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente, visando uma produtividade de grãos acima de 8 Mg ha⁻¹, de acordo com recomendações da

CQFS RS/SC (2004). Posteriormente, aos 15 dias após a emergência (DAE), foi feito um desbaste para obtenção de uma população de 5 plantas m^{-1} (50.000 plantas ha^{-1}), sendo que nessa ocasião e aos 35 DAE foram aplicados 60 kg de N em cada cobertura, na forma de uréia, totalizando na aplicação de 180 kg de N ao longo do ciclo da cultura. O cultivo do milho ocorreu em condições de irrigação por aspersão, a qual era feita sempre que as plantas apresentavam sinais de déficit hídrico. No total, foram feitas seis irrigações, aplicando-se lâminas em torno de 25 mm, resultando uma aplicação total em torno de 150 mm de água ciclo⁻¹. Esta, somada aos 721 mm de chuva ao longo do cultivo do milho, resultaram no fornecimento de 871 mm de água para a cultura.

Para a avaliação da distribuição de fósforo e de raízes no solo, por ocasião do início de enchimento de grãos, foram amostrados (08/01/07) monólitos de solo nas seguintes combinações de sistemas de manejo do solo e modos de adubação: Con com incorporação de calcário e de adubo em Fx, Lin e Lan (3); Dir sem incorporação do calcário e adubação em Lin e Lan (2) e sistema em Fx, com incorporação de calcário e do adubo em Fx (1), em duas das três repetições, resultando na utilização de 12 das 18 parcelas amostradas. Os monólitos de solo foram coletados em pranchas de madeira com pregos metálicos, de acordo com a metodologia proposta por Schuurman & Goedewagen (1965), modificada por Pedó (1985). Cada monólito (50x40x15 cm) foi subdividido em: quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm) com quatro distâncias para cada lado do colmo da planta de milho (0-5, 5-10, 10-15 e 15-25 cm) ($4 \times 8 = 32$) e duas profundidades (20-30 e 30-40 cm) com cinco estratificações horizontais (5-5, 5-15, 15-25, 25-15 e 15-5 cm) ($2 \times 5 = 10$), respectivamente, totalizando em ($32 + 10 = 42$) 42 quadrículas de solo. Em cada quadrícula de solo foi efetuada a separação do solo e das raízes em camadas sobrepostas.

Concomitantemente à retirada dos monólitos, foi coletada a planta correspondente a cada monólito e quatro plantas das 27 parcelas correspondentes aos três manejos de solo, três modos de adubação e três repetições, nas quais foram determinados a massa seca da parte aérea (MSPA) e o teor de P (Tedesco et al., 1995), os quais permitiram calcular o acúmulo de P (CP) na parte aérea e a eficiência de utilização de fósforo ($EUP = MSPA^2 CP^{-1}$) de acordo com Siddiqi &

Glass (1981). O P extraível (Mehlich-1) foi determinado nas amostras de solo de cada quadrícula das placas.

O comprimento radicular foi obtido pela utilização de imagens digitais das raízes, obtidas com um scanner (Epson, modelo CX4100) e posterior utilização do *software* computacional SIARCS 3.0 (Guimarães et al., 1997). Com os dados de comprimento radicular, foi calculada a densidade radicular, pela razão comprimento de raízes/volume de solo (cm cm^{-3}). A distribuição de fósforo e de raízes no perfil do solo foi obtida utilizando-se gráficos gerados a partir do programa Sigma Plot 10.0[®] (Systat Software, Inc.), os quais possibilitaram a elaboração dos mapas de distribuição espacial.

A colheita do milho foi realizada na maturação fisiológica (20/03/07). O rendimento de grãos foi obtido pela coleta das plantas da área útil da subparcela (3x4 m). Os grãos foram secos em estufa a 65°C e o seu rendimento foi ajustado para a umidade de 0,13 kg kg^{-1} . Os teores de P no grão foram determinados por digestão úmida (Tedesco et al., 1995), calculando-se, posteriormente, o acúmulo do nutriente nos grãos e o índice de eficiência do P (IEP= $\text{kg grãos kg de P aplicado}^{-1}$), de acordo com Moll et al. (1982).

A análise de variância dos resultados para produção de massa seca da parte aérea, rendimento do milho, acúmulo de P na parte aérea e nos grãos, foi feita considerando o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + M_j + \text{Erro a}(ik) + A_k + M_i A_{jk} + \text{Erro b}(ijk),$$

onde: μ = média geral do experimento; B= bloco (i= 1,2,3); M= manejo do solo(j= 1,2,3); A= modo de adubação (k=1,2,3) e Erro= o erro experimental.

Para as avaliações de P e raízes nas camadas dos monólitos coletados, foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + \text{erro a}(ik) + P_j + SP_{ij} + \text{erro b}(i,j,k),$$

onde: μ = média geral do experimento; S= sistemas de manejo do solo (i=1,2,3,4,5,6); P= profundidade (j=1,2,3,4,5,6) e Erro = erro experimental.

Para as avaliações na parte aérea e comprimento total de raízes dos monólitos foi utilizado o modelo:

$$Y = \mu + S_i + \text{erro}(ij),$$

onde: μ = média geral do experimento; S = sistemas de manejo do solo ($i=1,2,3,4,5,6$); e Erro = erro experimental.

No caso de significância da análise de variância, foi utilizado o teste de Tukey ($P<0,05$) para a distinção entre médias.

3.3. Resultados e Discussão

De modo geral, os teores médios de P disponível foram enquadrados na faixa Alto conforme a CQFS RS/SC (2004) até a profundidade de 20 cm, independentemente do manejo do solo adotado (Figura 1a). Tais valores podem ser reflexo do teor inicial de P e do acúmulo proporcionado pela adubação fosfatada anterior por 18 anos consecutivos de cultivo. Os teores de P disponível (Figura 1a) e a densidade de raízes no solo (Figura 1b), como esperado, se concentraram na camada superior e diminuíram em profundidade. O efeito do manejo do solo e da adubação na distribuição de P no perfil do solo foi verificado até 15 cm, ao passo que esse efeito na densidade de raízes só foi observado na camada de 0-5 cm, como também verificado por Rasmussen (1999), para esse nutriente, e DeMaria et al. (1999), para as raízes. A maior densidade radicular nas plantas de milho na camada superficial do solo pode ser devido ao seu sistema radicular fasciculado (Venzke Filho et al., 2004). Embora a estabilidade dos agregados desempenhe importante papel na ontogenia radicular em solos submetidos ao SPD (Günther & Vlek, 2002), parece que o acúmulo de P e a maior disponibilidade hídrica nas camadas superficiais são os fatores preponderantes para o comportamento observado no presente estudo.

O sistema Fx/Fx tendeu a apresentar teores de P mais elevados ao longo do perfil do solo (Figura 1a), seguido dos sistemas Con/Fx e Dir/Lin. Afora os sistemas Con/Lan e Con/Lin, nos demais, os teores desse nutriente foram mais elevados ($P<0,05$) até 5 cm de profundidade, porém, valores mais elevados ($P<0,05$) em profundidade ocorreram até 10 cm nos sistemas Con/Fx e Dir/Lin, e até 15 cm no Fx/Fx. Quanto às raízes, foram observadas menores densidades nos sistemas Con/Lin e Con/Lan, também salientando o efeito, embora não significativo ($P>0,05$), do Dir/Lin até a profundidade de 40 cm.

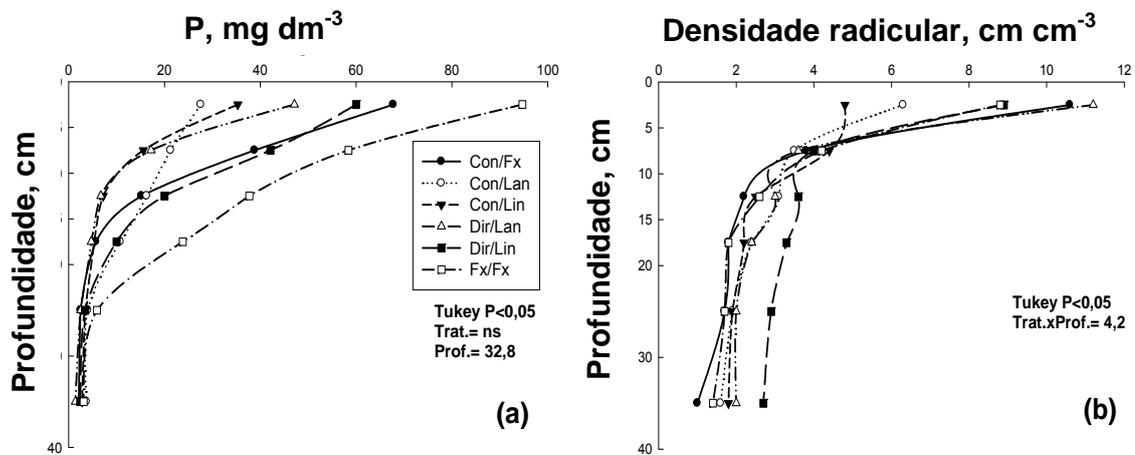


FIGURA 1. Distribuição de fósforo (Mehlich 1)(a) e da densidade de raízes (b) no perfil de um Argissolo Vermelho conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo de solo: convencional - faixa (Con-Fx), convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan), plantio direto – linha (Dir/Lin) e Faixa – Faixa (Fx/Fx)., safra 2006/07 (Valores de duas repetições).

As adubações sucessivas acarretam em acúmulo de fósforo, principalmente em solos de baixa capacidade de fixação de P, independentemente do manejo adotado (DeMaria et al., 1999). Aplicações em faixa, que resultam em volumes fertilizados intermediários, entre lanço e linha, independentemente do grau de revolvimento ao qual o solo é submetido, podem resultar em teores mais elevados de P na superfície (Zerboune, 1996).

A elevada concentração de P disponível na camada de 5-10 cm, devido à aplicação localizada sem revolvimento do solo (Dir) é decorrente da aplicação do adubo no leito do sulco de 5 a 8 cm a partir da superfície do solo. Por outro lado, os teores de P disponível mais baixos e uniformes no perfil quando o P foi incorporado, mostram o efeito do revolvimento na maior adsorção desse nutriente pelo solo (Anghinoni, 1992). Os teores de P disponível abaixo do nível crítico, de 12 mg dm⁻³ de solo (CQFS RS/SC, 2004), observados nas camadas de 20-30 cm e de 30-40 cm, independentemente do preparo, resultam da baixa mobilidade desse nutriente mesmo em solo com baixa capacidade de fixação de P, como o deste trabalho (Rheinheimer et al., 2003). Espera-se menor disponibilidade de P nas camadas mais profundas em Argissolos, devido a ocorrência de gradiente textural,

o que promove um aumento das reações de retenção desse nutriente na fração argila (Hussain et al., 1999).

O acúmulo de P na superfície do solo em plantio direto resulta também da ciclagem de P pelas culturas (Santos & Tomm, 2003), tanto pela deposição dos resíduos da parte aérea na superfície, como pela decomposição de raízes concentradas na camada superficial de 0-5 cm (Figura 1b), especialmente no tratamento Dir/Lan e Con/Fx (Figura 1b e Tabela 1).

TABELA 1. Distribuição relativa da densidade de raízes no perfil do solo conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo de um Argissolo Vermelho, safra 2006/07 (Valores de duas repetições)

Camada	Sistemas de manejo do solo ¹					
	Con/Lin	Con/Lan	Con/Fx	Dir/Lin	Dir/Lan	Fx/Fx
cm	-----%					
0-5	27 a	34 a	50 a	35 a	47 a	43 a
5-10	25 ab	18 b	18 b	15 b	15 b	20 b
10-15	15 bc	16 b	11 bc	14 b	12 b	13 bc
15-20	12 c	13 b	8 bc	13 b	10 b	9 c
20-30	11 c	10 b	8 bc	12 b	8 b	8 c
30-40	10 c	9 b	5 c	11 b	8 b	7 c

¹ Con= convencional; Dir= Direto; Lin= linha; Lan= lanço; Fx= faixa. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey (P<0,05).

Considerando que o experimento vem sendo conduzido sob plantio direto por longo tempo (18 anos), é de se esperar que tenham ocorrido melhorias em diversas propriedades do solo, condicionando-o para um melhor desenvolvimento de raízes (Elles & Barnes, 1980). Neste contexto, a maior densidade radiuclar no Dir/Lin, a partir de 5 cm (Figura 1b e Tabela 1), corrobora com as maiores densidades radiculares no plantio direto em relação ao preparo convencional obtidas por Pearson (1991), sendo isso também pelo aumento da macroporosidade e da continuidade de poros em solos nesse sistema (Chassot, 2001).

Por outro lado, os maiores teores médios de P em profundidade no tratamento Fx/Fx (Figura 1a) não resultaram em maior crescimento (Figura 1b) e distribuição de raízes em profundidade (Tabela 1). Isto pode ser devido ao fato de que teores médios de P por camada de solo não representam o grau e a intensidade de mistura do adubo com o solo, que variam, tanto no sentido

horizontal como no vertical no solo, como verificado nos monólitos de solo coletados na área experimental. Assim, a distribuição espacial de P (Mehlich 1) e de raízes foi influenciada tanto pelo modo de adubação como pelo preparo do solo (Figuras 2 e 3). Cabe salientar a destacada variação espacial nos atributos avaliados, determinada pela forma de distribuição do adubo, de sua incorporação ou não ao solo, pela formação de microsítios pelos grânulos do adubo (Sousa & Volkweiss, 1987), pelo próprio processo de coleta do solo e, ainda, pela elevada variabilidade do fósforo e das raízes no solo (Dwyer et al., 1996).

Embora tenha se aplicado a mesma dose de P nos diferentes tratamentos ao longo dos anos, os teores observados variaram grandemente, quer sejam comparados os modos de adubação em um mesmo preparo de solo e vice-versa, ou seja, diferentes preparos no mesmo modo de adubação. Nas aplicações localizadas (linha e faixa), os teores de P disponível, de 100 a 200 mg dm⁻³, contrastam com os valores, em torno de 50 mg dm⁻³, dos solos que receberam adubações a lanço (Figuras 2 e 3). Os teores elevados de até 200 mg dm⁻³, no sistema Fx/Fx (Figura 2c) foram surpreendentes, uma vez que ocorreu a mobilização anual do solo, mesmo que em uma faixa de 20 cm, ao passo que as adubações em linha, independentemente do grau de revolvimento do solo, resultaram em picos de em torno de 100 mg dm⁻³. Por outro lado, os valores em torno de 40 mg dm⁻³ na camada de 0-15 cm no sistema Con/Lan (Figura 3a) refletem o efeito de incorporação do adubo no solo, dificultando a formação de gradiente acentuado. Cabe ressaltar que os valores extremos de P disponível observados em determinadas posições nos monólitos (Figuras 2 e 3), caracterizam a variabilidade de sua distribuição no solo (Schlindwein & Anghinoni, 2000a e b) e resultam em teores médios e elevados na respectiva camada de solo.

Os valores muito elevados de P disponível nas camadas superficiais, chamam atenção, principalmente, quanto a possibilidade da superestimação do P disponível pelo extrator Mehlich 1. A reaplicação superficial de calcário a cada quatro anos aumentando, além do pH, os teores de Ca na superfície (Marcolan, 2002) tornam possível a dissolução do P ligado ao Ca pelo extrator duplo ácido, porém, os valores extremos também obtidos pelo P - resina excluem tal hipótese (Capítulo 4).

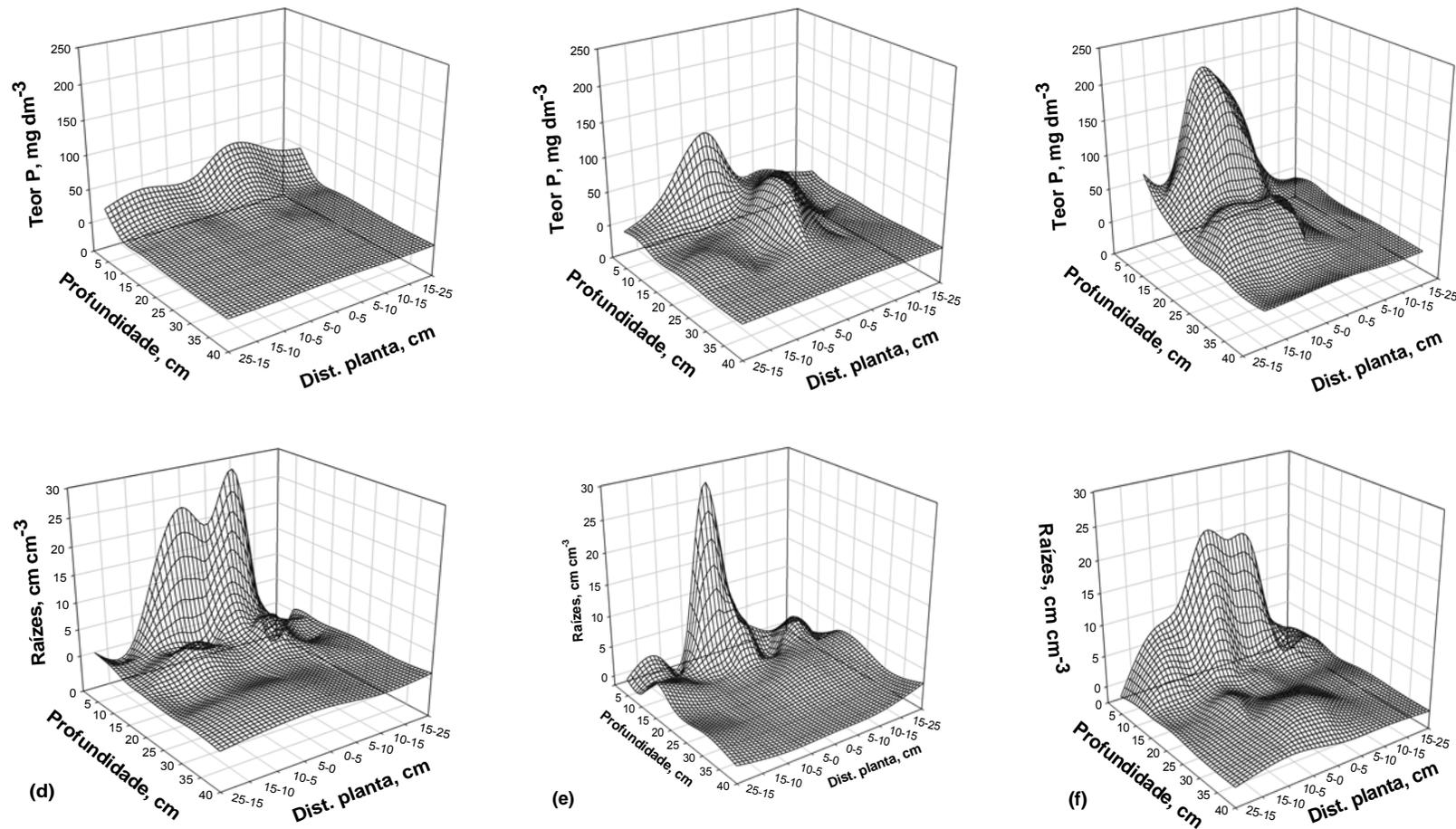


FIGURA 2. Distribuição de fósforo (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-lanço, convencional-linha e preparo em faixa-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).

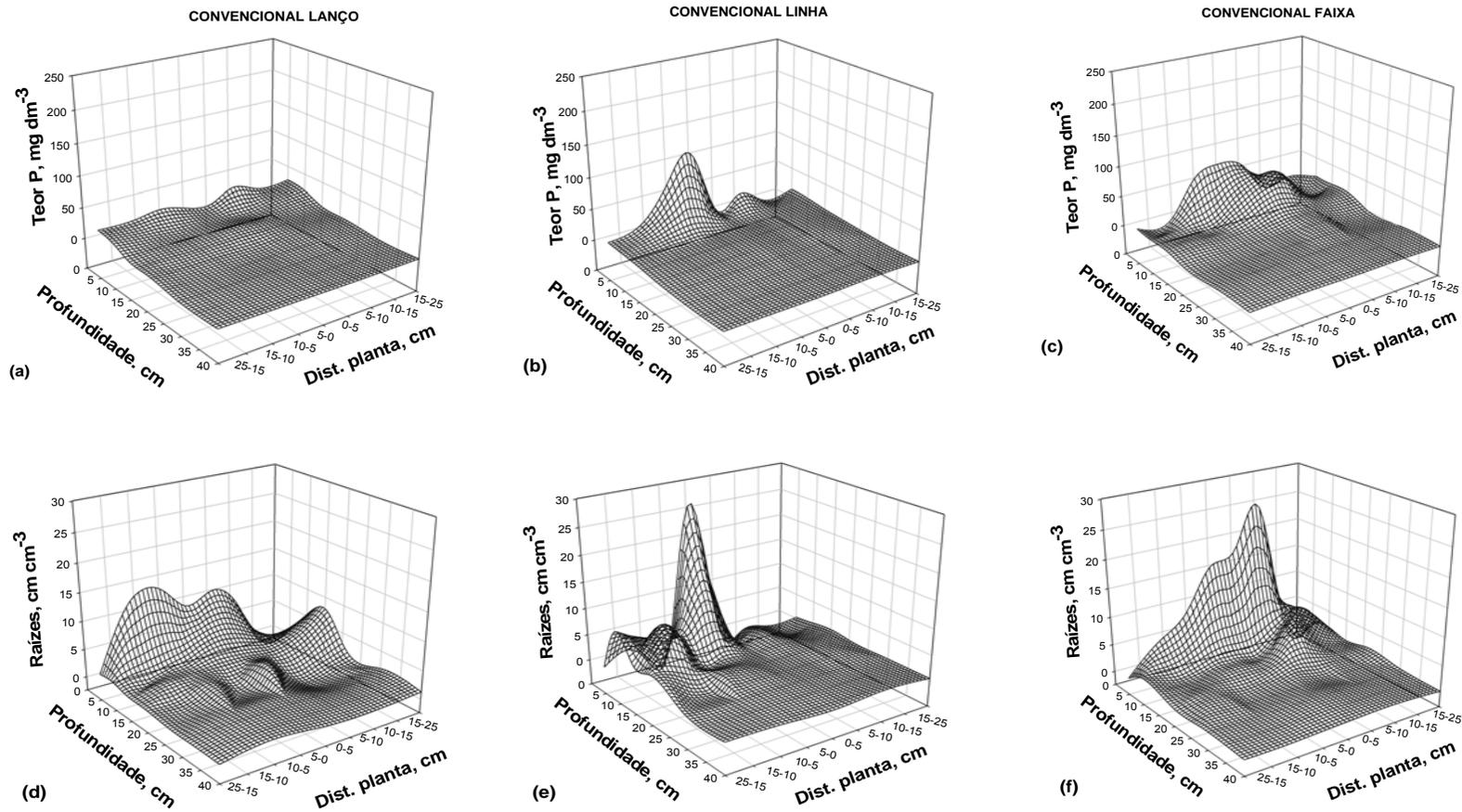


FIGURA 3. Distribuição de fósforo (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: convencional-lanço, convencional-linha e convencional-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).

A distribuição de raízes, de um modo geral, acompanhou o modo de aplicação do adubo fosfatado, havendo, porém, algumas alterações na magnitude dos valores de densidade radicular em função do sistema de manejo do solo adotado. Neste sentido, foram verificados na camada superficial (0-5 cm) valores em torno de 25 e 10 cm cm^{-3} nos sistemas Dir/Lan (Figura 2a) e Con/Lan (Figura 3a), respectivamente. Por outro lado, o acúmulo de raízes na linha, em função das aplicações localizadas de P, levou a ocorrência de picos em torno de 25 cm cm^{-3} no Dir/Lin (Figura 2b) e Con/Lin (Figura 3b), na camada de 0-5 cm. Este comportamento, que também foi observado para o P, demonstra que o volume de solo fertilizado afeta grandemente a distribuição de raízes no solo. Nos sistemas com adubação em faixa, houve uma distribuição mais profunda de raízes, onde o Con/Fx (Figura 3c) parece ter favorecido distribuição mais homogênea de raízes no solo, ao passo que no Fx/Fx (Figura 2c) as raízes se concentraram, como esperado, mais na região na qual o adubo foi misturado com o solo. Os resultados indicam, como sugerido por Ball-Coelho et al. (1997) que, na medida em que aumenta o grau de revolvimento do solo, há um favorecimento no desenvolvimento vertical do sistema radicular, ao passo que na ausência de revolvimento, esta distribuição ocorre principalmente no sentido horizontal.

Os modos de adubação resultaram em disponibilidades de P distintas das observadas em 1990 no mesmo experimento por Klepker & Anghinoni (1993), ao passo que os valores de densidade radicular apresentaram valores semelhantes. Todavia, Qin et al. (2005) observaram valores de densidade de raízes bem inferiores aos verificados neste trabalho, independentemente do manejo adotado. O fato de o milho ser uma espécie termofílica (Richner et al., 2007), as condições de clima temperado, com temperaturas baixas, poderiam explicar os valores mais baixos verificados por esses autores. Os valores mais elevados verificados neste trabalho, também podem ser explicados pelo grande acúmulo de P, em função das sucessivas aplicações ao longo de 18 anos.

Independentemente do modo de adubação, ocorreram maiores comprimentos de raízes no plantio direto, tanto com o adubo aplicado a lanço como em linha (Tabela 2). Porém, este maior comprimento radicular não teve reflexo na produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) ou no acúmulo de P nas plantas de milho.

TABELA 2. Matéria seca da parte aérea de milho (MSPA), comprimento de raízes e acúmulo e eficiência do uso de fósforo (EUP) em plantas de milho no monólito coletado no início do enchimento de grãos, em função de sistemas de manejo de um Argissolo Vermelho, safra 2006/07 (Valores de duas repetições)

Sistemas de manejo¹	Compr. raízes	Fósforo	MSPA	EUP
	-----m-----	---mg pl ⁻¹ ----	g planta ⁻¹	----g ² mg ⁻¹ ---
Con/Lan	288 bc	951 a	227a ²	54,4 a
Dir/Lan	353 a	763 b	202 abc	53,3 a
Con/Lin	220 d	596 c	190 bc	60,3 a
Dir/Lin	339 a	559 c	178 c	56,7 a
Con/ Fx	265 bcd	639 c	183 c	52,5 a
Fx/Fx	257 cd	853 ab	219 ab	56,4 a

¹ Con= convencional; Dir= Direto; Lin= linha; Lan= lanço; Fx= faixa. ² Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey (P<0,05).

O maior comprimento radicular em solos no plantio direto consolidado (>10 anos) também foi observado Way et al.(1986), entretanto, quando esta condição não é ainda atingida neste sistema de manejo, o sistema radicular pode apresentar menor desenvolvimento em relação ao preparo convencional (Qin et al., 2005).

Valores mais elevados de MSPA e de acúmulo de P pela planta de milho, verificados nos sistemas Con/Lan e Fx/Fx, com distribuições mais uniformes de P e raízes no solo (Tabela 2), também foram relatados por Klepker & Anghinoni (1993). Todavia, esses autores observaram que a EUP também foi mais elevada nessas condições, o que não foi verificado neste estudo. Os valores muito elevados de P disponível, em aplicações localizadas, podem prejudicar a absorção desse nutriente, devido ao excessivo crescimento radicular e a diminuição no teor de água disponível nessa região do solo. Efeitos de salinidade no solo, causados pela aplicação de cloreto de potássio, concomitantemente ao adubo fosfatado, podem ajudar a explicar tais diferenças.

Cabe ainda destacar que no solo do presente trabalho, com baixa capacidade de fixação de P e com teor inicial médio de P, a relevância de haver a disponibilidade de P próximo às raízes para o desenvolvimento inicial do milho. Segundo Matt & Brown (1989), a importância das adubações localizadas para o desenvolvimento inicial das plantas se resume em dois efeitos primordiais: 1) o aumento do contato do P com as raízes, reduzindo os efeitos

de fixação do mesmo pelo solo e; 2) o aumento das concentrações de P nesta região, melhorando as condições para sua absorção, que é mais significativo para solos com mais capacidade de retenção desse nutriente.

A aplicação de 150 kg P₂O₅ neste experimento, equivale a uma concentração de 750 mg kg⁻¹ de P no solo. Valores de 500 mg kg⁻¹ (Peryean, 1990) e de 400 mg kg⁻¹ de P (Klepker & Anghinoni, 1993), em função de aplicações na linha de semeadura, limitaram o crescimento radicular. No primeiro caso, os autores atribuíram tal impedimento ao dano causado no meristema apical, em função da elevação da pressão osmótica, ao passo que o valor de 400 mg kg⁻¹ de P, foi considerado restritivo em função do aumento da densidade radicular, acarretando, em um efeito de secamento parcial e da elevação do grau de salinidade na zona de maior crescimento radicular, que pode ter sido potencializada pela aplicação de cloreto de potássio concomitantemente a de superfosfato triplo.

Embora tenham sido observadas elevadas densidades radiculares em função da concentração de P, a capacidade de absorção desse nutriente pela planta não parece ter sido afetada. As contínuas oscilações térmicas, hídricas e atmosféricas no solo, induzem a alterações, tanto nas raízes quanto na parte aérea das plantas, fazendo com que a relação raiz-parte aérea, principalmente em condições de campo, seja variável (Qin, 2005).

O efeito da localização dos adubos na MSPA, observado nas plantas individuais (monólitos), não refletiu no acúmulo de P quando foram avaliadas as combinações dos tratamentos nas parcelas experimentais (Tabelas 3 e 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Pavinato & Ceretta (2004) que, avaliando épocas e formas de adubação de P e K em SPD, não observaram diferenças para o acúmulo de P e na MSPA nas plantas de milho. Os teores elevados de P acima do nível crítico deste solo (12 mg dm⁻³), em todos os sistemas de manejo, na camada de 0-10 cm (Figuras 2 e 3), explicam este comportamento, visto que, nestas condições, há uma baixa probabilidade de respostas das culturas à aplicação de fertilizantes (Heckman, 2007).

TABELA 3. Acúmulo de fósforo no tecido do milho no início do enchimento de grãos em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de fósforo			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	37,0 ^{ns}	32,0	36,3	35,1
Faixa	25,9	30,8	30,8	29,2
Convencional	26,6	26,3	30,0	27,6
Média	29,9	29,7	32,4	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

A melhoria da fertilidade do solo com o passar do tempo, principalmente no SPD, contribui para a redução na magnitude de importância do modo de aplicação dos fertilizantes (Ceretta et al., 2007), visto que não foram observadas diferenças tanto no rendimento quanto no acúmulo de P nos grãos de milho (Tabelas 5 e 6).

TABELA 4. Produção de matéria seca de milho no início do enchimento de grãos em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de fósforo			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- Mg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	10,01 ^{ns}	9,73	10,21	9,98
Faixa	9,22	9,71	10,83	9,92
Convencional	9,83	10,10	9,85	9,93
Média	9,68	9,84	10,30	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

TABELA 5. Rendimento de grãos de milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de fósforo			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- Mg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	8,34 ^{ns}	7,21	7,64	7,73
Faixa	8,04	8,13	7,03	7,74
Convencional	8,62	8,13	8,95	8,62
Média	8,33	7,82	7,84	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

TABELA 6. Acúmulo de fósforo nos grãos de milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de fósforo			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	57,1 ^{ns}	54,2	54,2	55,2
Faixa	52,1	55,0	45,5	50,8
Convencional	59,5	54,8	55,1	56,5
Média	56,3	54,6	51,6	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

Em solos sob SPD já consolidado, tem sido observado rendimentos de milho mais elevados em relação ao preparo convencional (Santos et al., 2003). Todavia, no presente estudo, possivelmente devido ao fato do experimento ter sido conduzido sob irrigação e elevada disponibilidade de nutrientes em geral, há uma redução nas vantagens que o SPD tem, notoriamente em longo prazo, em relação ao SCC, como a conservação da umidade e a maior tolerância aos verânicos (Fancelli & Dourado Neto, 2004). Mesmo assim, o secamento na região da rizosfera pode ocorrer temporariamente, mesmo em condições irrigadas, em função dos mecanismos de absorção de nutrientes (Gerloff & Gabelman, 1983).

Desta forma, pode-se ressaltar que, na ausência de déficit hídrico, uma das principais condições para a eficiência na absorção de P é a aeração adequada. Em condições irrigadas, o revolvimento contínuo do solo, mantendo uma elevada porcentagem de macroporos (Marcolan & Anghinoni, 2006), cria um ambiente mais propício para a absorção de P pelas raízes do milho. Sendo assim, foi observada uma tendência de maior Índice de Eficiência de P (IEP= kg grãos /P kg aplicado⁻¹) no preparo convencional (Tabela 7), demonstrando que, em condições de irrigação, o SPD pode não apresentar superioridade em relação a outros tipos de manejo do solo, quando analisando somente o rendimento de grãos e a produção de matéria seca pela cultura do milho.

TABELA 7. Índice de eficiência ao P pelo milho em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de fósforo			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- g ² mg ⁻¹ -----			
Plantio Direto	126,2 ^{ns}	109,5	115,7	117,1
Faixa	122,6	123,6	106,2	117,5
Convencional	131,5	124,1	136,3	130,6
Média	126,8	119,1	119,4	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

3.4. Conclusões

O modo de aplicação de superfosfato triplo no solo, independentemente do grau de revolvimento do solo, proporciona acúmulo de fósforo e de raízes no volume de solo fertilizado.

Independentemente do manejo adotado, o fósforo disponível e as raízes de milho acumulam na camada de 0-10 cm.

A produção de matéria seca da parte aérea, o acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas e o rendimento do milho não são afetados pelos sistemas de manejo do solo nas condições deste experimento.

A despeito do efeito do manejo do solo e do modo de aplicação de fósforo na sua distribuição e na de raízes no solo, na sua absorção e no crescimento do milho, a eficiência de utilização desse nutriente por essa cultura não é afetada.

4. CAPÍTULO 3: DISTRIBUIÇÃO DE POTÁSSIO E DE RAÍZES E CRESCIMENTO DE MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

4.1. Introdução

A distribuição de nutrientes no solo é influenciada por diversos fatores, entre os quais se pode destacar o preparo solo e o modo de aplicação de fertilizantes. A umidade do solo é outro fator a ser considerado na avaliação do suprimento de nutrientes às raízes, especialmente naqueles, como o potássio, em que a difusão é o processo dominante (Barber, 1995). A disponibilidade de água no solo, por sua vez, é influenciada pelo manejo do solo, afetando o crescimento e desenvolvimento das plantas. Desta forma, pode-se inferir que a dinâmica do potássio no solo, é afetada pelo manejo do solo e da adubação.

As plantas, em geral, têm uma demanda inicial de K elevada, sendo que 40% do seu acúmulo pode se dar em apenas 52 dias após emergência (Karlem et al., 1988). Além disso, pelo fato do K não ser componente estrutural da planta, o mesmo tem elevado potencial de ciclagem em sistemas com adição contínua de resíduos (Rossatto, 2004). Um período ao redor de 52 semanas pode ser suficiente para que ocorra a liberação de, em torno de, 90% do K contido no resíduo vegetal (Lupwayi et al., 2005). A dinâmica do K pode ser afetada também pelo aumento dos teores de carbono orgânico (CO) (Bayer & Mielniczuk, 1997), cujo aumento, em longo prazo, causa um incremento na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, podendo alterar as doses e o manejo da fertilização potássica (Kayser & Isselstein, 2005).

Nesse contexto, o grau de mistura do fertilizante com o solo, determinado pelos métodos de preparo e pelos modos de adubação, tem sido objeto de poucos estudos no Brasil (Model & Anghinoni, 1992, Klepker & Anghinoni, 1995). O modo de aplicação de fertilizantes potássicos merece especial atenção devido à susceptibilidade do K a perdas por processos erosivos, principalmente em solos com baixa CTC (Mielniczuk, 2005), e também ao elevado grau de salinidade do cloreto de potássio (KCl), principal fonte de K utilizada na agricultura (Bevilaqua et al., 1996). Os cuidados ao utilizar o KCl como fonte de K se justificam, porque aplicações a lanço podem não fornecer a quantidade de nutriente necessária ao desenvolvimento inicial das plantas (Ceretta et al., 2007), ao passo que aplicações na linha, em doses elevadas, podem resultar em danos ao sistema radicular (Salton et al., 2002).

Em áreas sob sistema plantio direto (Dir) consolidado, tem sido verificado um acúmulo de K na camada superficial do solo (0 -5 cm) (Ketcheson, 1980; Eltz et al., 1989). Esse acúmulo, aliado à maior disponibilidade hídrica nesse sistema de manejo, pode resultar em maior disponibilidade de K, em relação ao sistema convencional de cultivo (Con) (Bordoli & Mallarino, 1998). O revolvimento periódico do solo e a deposição de fertilizantes potássicos em camadas mais profundas (Rehm & Lamb, 2004) parecem ser alternativas viáveis para aumentar os teores de K em profundidade, aliviando o efeito da estiagem sobre o suprimento de K para as plantas. Por outro lado, a distribuição do K no perfil parece ser independente do grau de revolvimento do solo e/ou do modo de aplicação de K (Model & Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1995).

Os sistemas de manejo do solo podem afetar também a distribuição radicular no solo (Mello Ivo & Mielniczuk, Motta et al., 2006), sendo que, em longo prazo, estas alterações parecem ocorrer em diferentes profundidades (Ishaq et al., 2003). Sendo assim, o revolvimento do solo pode influenciar, de forma positiva, a taxa de crescimento inicial radicular e, conseqüentemente, o desempenho da cultura (Petersen, 2008). Segundo este autor, a mobilização intermediária do solo, como ocorre nos preparos em faixa, em longo prazo, proporciona um melhor movimento e armazenamento de água no perfil do solo, criando condições adequadas para o desenvolvimento inicial da cultura, como também permite maior aprofundamento do sistema radicular. Por outro lado, o acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes na superfície em solos sob SPD

pode resultar na restrição do crescimento radicular em profundidade no solo (Ball-Coelho et al., 1998). Neste âmbito, a distribuição do K no solo pode estar relacionada à distribuição do sistema radicular, conforme verificado por Klepker & Anghinoni (1995), podendo inclusive influenciar a morfologia das raízes (Rosolem et al., 2003b).

Percebe-se que, principalmente no SPD, a influência do manejo do solo na distribuição de K e de raízes no perfil, quer seja em função do reduzido grau de revolvimento do solo ou da adubação localizada, ainda carece de mais informações a respeito. O presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito de modos de preparo do solo e de aplicação de adubo potássico por longo tempo, na distribuição de potássio e de raízes no solo e a sua relação com o crescimento e a produtividade de milho.

4.2. Material e Métodos

O experimento foi instalado em 1988, em um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com textura franco-argilo-arenosa, localizado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul, região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS). Antes da instalação do experimento, o solo apresentava elevado teor de K disponível (130 mg dm^{-3} - Mehlich 1). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em um bifatorial 3x3, separados por uma faixa de 5 m, em parcelas subdivididas, com três repetições, onde os métodos de preparo do solo (3) ocuparam as parcelas principais (24x12 m) e os modos de adubação (3) as subparcelas (12x8 m).

Em maio de 1988, foi feita calagem em toda área, com incorporação do calcário (uma aração + duas gradagens), visando elevar o pH do solo a 6,0. Na seqüência, foi cultivada aveia preta (*Avena strigosa*, S.). Ao final do ciclo da aveia, foram estabelecidos os seguintes manejos do solo: preparo convencional (Con - uma aração até 15-17 cm de profundidade e duas gradagens); preparo em faixas (Fx – faixas de 20 cm de largura e 15 cm de profundidade, centrada na linha de semeadura do milho, usando um sulcador tipo “asa de andorinha”); e sem preparo (Dir - sulco para semeadura do milho com 5 cm de largura e 5-8 cm de profundidade). Os modos de adubação potássica (K) foram a lanço (Lan),

em faixa (Fx) de 20 cm (10 cm para cada lado do colmo) e na linha (Lin) de semeadura, sendo efetuados manualmente e após os tratamentos de preparo do solo. A seqüência de culturas utilizada, a partir de outubro de 1988, foi de milho (*Zea mays*, L.), na primavera/verão, e aveia + ervilhaca (*Vicia sativa*), no outono/inverno. Em 1992 foi feita nova calagem, nos mesmos moldes da primeira, a qual foi repetida a cada quatro anos a partir de então. Maiores detalhes sobre o histórico e a condução do experimento podem ser obtidos no Item 3.2 e em Marcolan (2002).

Alguns atributos químicos do solo anteriores à implantação da cultura do milho são listados no Item 3.2 do presente trabalho. O milho (híbrido Pioneer 30R50) foi semeado em 20/10/2006, logo após a aplicação dos tratamentos de preparo do solo e modos de adubação, com uma densidade de semeadura de 5-7 plantas m^{-1} , com espaçamento de um metro entre linhas e adubação com base em análise de solo, de 60, 150, 100 $kg\ ha^{-1}$ de N, P_2O_5 e K_2O na semeadura, utilizando como fontes uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente, seguindo as recomendações da CQFS RS/SC (2004) para uma produtividade de grãos superior a 8 $Mg\ ha^{-1}$. Aos 15 dias após a emergência (DAE), a população foi ajustada para 5 plantas m^{-1} (50.000 plantas ha^{-1}), por desbaste manual. Nessa mesma oportunidade e aos 35 DAE, foram aplicados em cobertura 60 $kg\ ha^{-1}$ de N, na forma de uréia. O cultivo do milho ocorreu em condições de irrigação por aspersão, a qual era feita sempre que as plantas apresentavam sinais de déficit hídrico. Em adição aos 721 mm de chuva no período de cultivo, foram fornecidos 150 mm de água, aplicando em lâminas em torno de 25 mm por turno de irrigação.

Para a avaliação da distribuição de K e de raízes no solo, foram amostrados monólitos de solo no início de enchimento de grãos (08/01/07), nas seguintes combinações de modos de preparo e de adubação: Con, com revolvimento anual do solo e adubação em Fx, Lin e Lan; Dir, sem revolvimento do solo e adubação em Lin e Lan; e Fx com revolvimento do solo para incorporação do adubo em Fx. Concomitantemente à amostragem de raízes, foi coletada a planta de milho correspondente a cada monólito em duas das três repetições do experimento. Desta forma, cada combinação entre modo de preparo e modo de adubação foi considerada um sistema de manejo do solo.

Os monólitos de solo foram coletados em peças retangulares de madeira com pregos metálicos, de acordo com a metodologia proposta por Schuurman & Goedewagen (1965), modificada por Pedó (1985). Cada monólito (50x40x15 cm) foi subdividido em: quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm) com quatro distâncias para cada lado do colmo da planta de milho (0-5, 5-10, 10-15 e 15-25 cm) ($4 \times 8 = 32$) e duas profundidades (20-30 e 30-40 cm) com cinco estratificações horizontais (5-5, 5-15, 15-25, 25-15 e 15-5 cm) ($2 \times 5 = 10$), respectivamente, totalizando em ($32 + 10 = 42$) 42 quadrículas de solo. Em cada quadrícula de solo foi efetuada a separação do solo e das raízes em camadas sobrepostas.

O comprimento radicular foi obtido por meio da utilização de imagens digitais das raízes, obtidas com auxílio de um scanner (Epson, modelo CX4100), e posterior utilização do *software* computacional SIARCS 3.0 (Guimarães et al., 1997). Com os dados de comprimento radicular, foi calculada a densidade de raízes, pela razão comprimento de raízes/volume de solo (cm cm^{-3}).

O K extraível do solo (Mehlich-1) foi determinado nas subamostras retiradas das placas. Também foram determinados o carbono orgânico total (COT - em analisador Shimadzu TOC- V CSH) e a estabilidade de agregados em água, segundo a metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965), com alterações propostas por Carpenedo & Mielniczuk (1990) e Silva & Mielniczuk (1997b).

Nas plantas de milho referentes a cada monólito e nas quatro outras plantas das parcelas do experimento, foram determinados a massa seca da parte aérea e o teor de K no tecido vegetal (Tedesco et al., 1995), com os quais se calculou o acúmulo desse nutriente na parte aérea e a eficiência de utilização de potássio ($\text{EUK} = \text{MSPA}^2 \text{CK}^{-1}$), representada pela razão entre a produção de matéria seca na parte aérea do milho pelo acúmulo de potássio na mesma (Teor de K na parte aérea \times produção de matéria seca da parte aérea), conforme proposto por Siddiqi & Glass (1981).

O milho foi colhido em 20/03/07, quando foi amostrada uma área de 12 m^2 de cada subparcela, para determinação do rendimento de grãos. Após a secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C , foi obtido o rendimento de grãos, ajustando-se a umidade para $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$. Os teores de K no grão também foram determinados (Tedesco et al., 1995) calculando-se,

posteriormente, o acúmulo desse nutriente e o índice de eficiência do K (IEK= kg grãos kg de K aplicado⁻¹), de acordo com Moll et al. (1982).

A distribuição de potássio e de raízes no perfil do solo foi obtida utilizando-se gráficos gerados a partir do programa Sigma Plot 10.0[®] (Systat Software, Inc.), os quais possibilitaram a elaboração dos mapas de distribuição espacial.

A análise de variância dos resultados para produção de massa seca da parte aérea, rendimento do milho, acúmulo de K na parte aérea e nos grãos, foi feita considerando o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + M_j + \text{Erro } a(ik) + A_k + M_i A_{jk} + \text{Erro } b(ijk),$$

onde: μ = média geral do experimento; B= bloco (i= 1,2,3); M= manejo do solo(j= 1,2,3); A= modo de adubação (k=1,2,3) e Erro= o erro experimental

Para as avaliações de K e raízes nas camadas dos monólitos foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + \text{erro } a(ik) + P_j + SP_{ij} + \text{erro } b(i,j,k),$$

onde: μ = média geral do experimento; S= sistemas de manejo do solo (i=1,2,3,4,5,6); P= profundidade (j=1,2,3,4,5,6) e Erro = erro experimental.

Para as avaliações na parte aérea e comprimento total de raízes dos monólitos foi utilizado o modelo:

$$Y = \mu + S_i + \text{erro}(ij),$$

onde: μ = média geral do experimento; S = sistemas de manejo do solo (i=1,2,3,4,5,6); e Erro = erro experimental.

No caso de significância de análise de variância, foi utilizado o teste de Tukey (P<0,05) para a distinção entre médias.

4.3. Resultados e Discussão

Os teores de K disponível se enquadram nas faixas Muito alto e Alto (CQFS RS/SC, 2004) até as profundidades de 10 e 20 cm, respectivamente (Figura 4a), e os teores, em torno de 50 mg dm⁻³, até a profundidade de 40 cm, enquadram-se na faixa Médio. Esses valores podem ser devidos ao teor inicial de K elevado, ao seu acúmulo pela adubação potássica durante 18 anos consecutivos e, também, pelo material de origem do solo, que é rico em feldspatos de potássio (Meurer et al., 1996). Ressalta-se, ainda, a facilidade de

redistribuição de K no solo, como reflexo da sua mobilidade, principalmente em solos menos argilosos (Havlin, 2005), como no presente trabalho.

Para os teores de potássio no solo, foi verificada uma interação ($P < 0,05$) entre os sistemas de manejo e a profundidade havendo, no entanto somente efeito de profundidade em cada sistema de manejo. Para a densidade de raízes, houve efeito ($P < 0,05$) de sistemas de manejo em cada profundidade. Assim, conforme esperado, os teores de K disponível (Figura 4a) e a densidade de raízes (Figura 4b e Tabela 2) se concentraram na camada superior e diminuíram em profundidade. No entanto, a distribuição de potássio no perfil do solo, especialmente na camada de 0-5 cm, não teve relação com a distribuição de raízes. Embora as raízes da planta de milho se acumulem nessa camada (Weisler & Horst, 1994) o que tem sido verificado, é que a distribuição de raízes no solo é muito mais influenciada pela distribuição de fósforo do que de potássio (Mollier & Pellerin, 1999) como também verificado no presente estudo (Figuras 1 e 2).

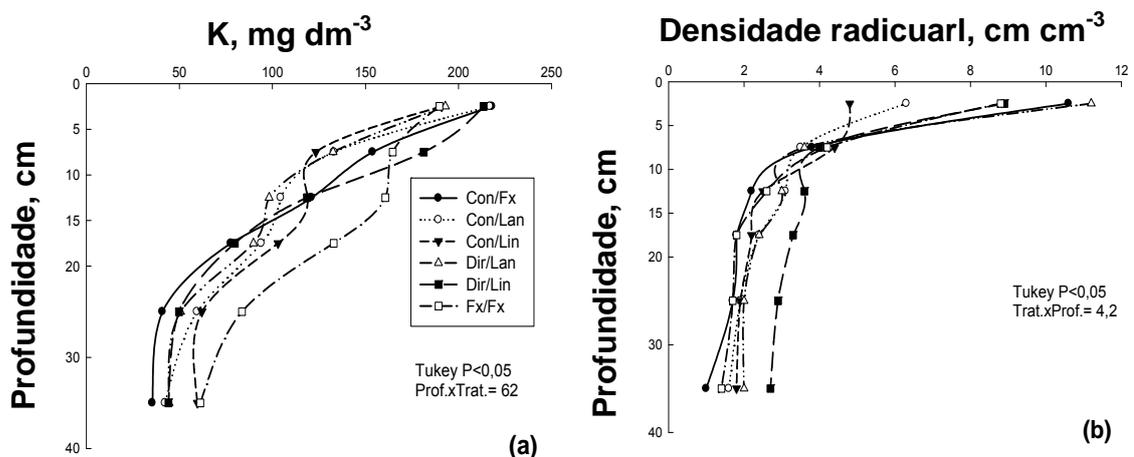


FIGURA 4. Distribuição de potássio (Mehlich 1) (a) e da densidade de raízes (b) no perfil de um Argissolo Vermelho conduzido por 18 anos em diferentes sistemas de manejo do solo: convencional – faixa (Con/Fx), convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan), plantio direto – linha (Dir/Lin) e Faixa – Faixa (Fx/Fx), safra 2006/07 (Valores de duas repetições).

Uma estratificação de K similar a deste trabalho, independentemente do manejo, também foi verificada por Mallarino & Borges (2006). Todavia, o acúmulo de K nas camadas superficiais do solo (0- 5 cm), nos sistemas com revolvimento mais intenso (Con/Fx, Con/Lan – Figura 4a), chama atenção, visto que esse gradiente geralmente é observado no sistema plantio direto (Murdock

et al., 2008). No presente estudo, uma distribuição mais profunda de K, nas camadas de 10-15, 15-20 e 20-30 cm do solo, respectivamente, foi verificada no preparo e adubação em faixa (Figura 4a). Por outro lado, no plantio direto (Dir), em longo prazo, ocorre aumento de palhada, com conseqüente aumento na ciclagem de K pela mineralização da matéria orgânica no solo (Mielniczuk, 2005) (Figura 5). Com isso, ocorre também o aumento da atividade microbiana e da agregação (Figura 6), que resulta em continuidade de poros (Nicolodi, 2007) e, por conseguinte, na descida desse nutriente pela água que infiltra no solo (Silva, 1996). No entanto, este comportamento não ocorreu no presente trabalho (Figura 4a). Para os sistemas com revolvimento do solo, a sua mobilização pode estar contribuindo para a decomposição da matéria orgânica (Figura 5) e degradação do solo (Figura 6), o que poderia provocar a lixiviação de potássio para abaixo da camada avaliada.

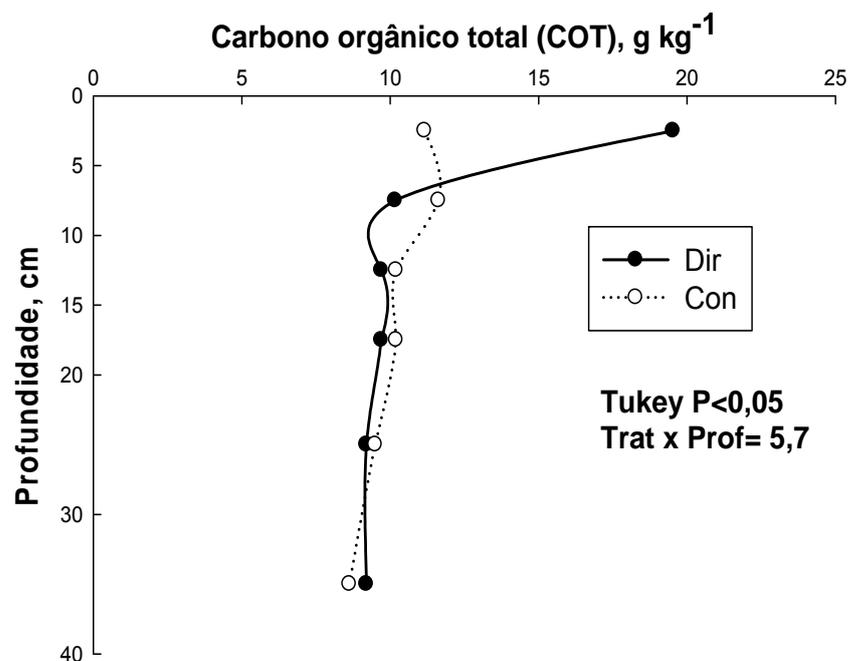


FIGURA 5. Distribuição de carbono orgânico total (COT) no perfil de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo: Dir= sistema plantio direto; Con= sistema convencional de cultivo por 18 anos, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).

Silva et al. (2006), observaram, após 17 anos, no mesmo solo, comportamento semelhante, ressaltando os teores mais elevados de COT na camada de 0-7,5 cm no solo sob plantio direto e o possível efeito da intensidade de preparo e incorporação de resíduos ao solo na distribuição do CO no perfil do solo.

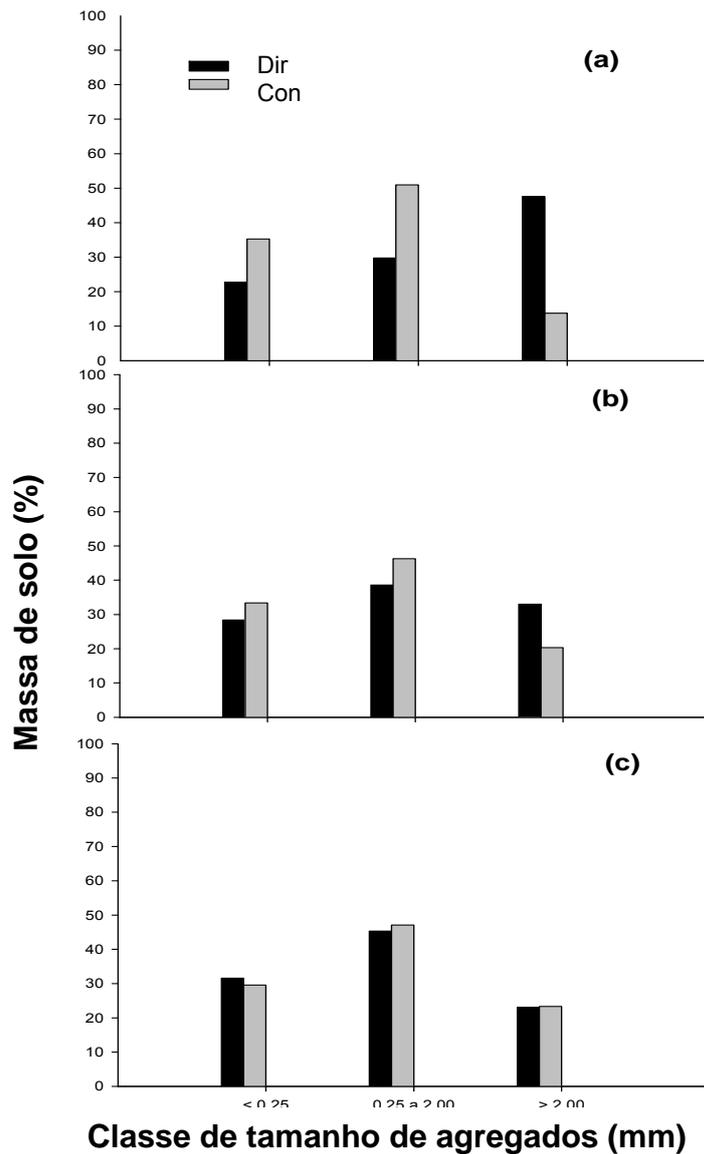


FIGURA 6. Distribuição percentual de classes de tamanho de agregados em um Argissolo Vermelho em sistema plantio direto (Dir) e preparo convencional (Con) nas profundidades de 0-5 (a), 5-10 (b) e 10-20 (c) cm, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).

Resultados semelhantes nesse mesmo tipo de manejo de solo também foram observados por Vyn & Raimbult (1992). O cultivo mínimo tem resultado no aumento de K em profundidade (Opuku et al., 1997), com efeito notório para o desenvolvimento do milho (Yibrin et al., 1993).

A estratificação de raízes (Figura 4b e Tabela 2) parece ser mais acentuada do que a observada para o K (Figura 4a). Com exceção do Con/Lin e Con/Lan, as raízes do milho se acumularam na camada de 0-5 cm nos demais sistemas de manejo. Tal comportamento pode resultar em restrições ao desenvolvimento das plantas em períodos de déficit hídrico (Davies & Zhang,

1991). Neste contexto, é importante enfatizar que, em todos os sistemas de manejo, em torno de 70% das raízes de milho se concentraram na camada de 0-15 cm (Tabela 2), corroborando com os dados obtidos por Silva et al. (2000). O acúmulo de raízes na camada superficial (0-5 cm), principalmente no Dir, pode estar relacionado com uma maior agregação nessa camada de solo neste sistema em relação ao Con (Figura 6). A presença das raízes no solo, principalmente de gramíneas, favorece as ligações entre partículas do solo, contribuindo, desta forma, para a formação e estabilização de agregados no solo (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Silva & Mielniczuk, 1997).

Essa dificuldade de se estabelecer um bom relacionamento entre a distribuição de K e de raízes, levou a necessidade de se verificar a distribuição espacial, em virtude dos diferentes graus de mistura do fertilizante com o solo e localização do mesmo no solo. De modo geral, independentemente do sistema de manejo, o K apresentou certa similaridade de distribuição no perfil do solo, tanto no sentido horizontal quanto no vertical (Figuras 7 e 8). Tais resultados corroboram com aqueles observados por Klepker & Anghinoni (1995) e Cavalcante et al. (2007). Assim, o revolvimento do solo (Con) com incorporação do adubo aplicado a lanço, em linha ou em faixas por 18 anos, acarretou teores mais elevados de K, em torno de 50 mg dm^{-3} até 40 cm de profundidade; enquanto que, sem revolvimento do solo (Dir), o K se concentrou até 15 cm, com o dobro de valores em relação ao Con. Essa distribuição é bem evidente na comparação Dir/Lin vs Con/Lin (Figura 8a,b). Tais gradientes são, no entanto, menores do que aqueles encontrados por Klepker & Anghinoni (1995), no segundo ano do experimento, provavelmente pelo acúmulo, no tempo, desse nutriente no perfil do solo. Aumentos de K em profundidade pelo revolvimento do solo foram também observados por Wright (2007). Esse aumento dos teores de K nas camadas mais profundas é importante na disponibilidade de K para as plantas, uma vez que é distribuído de forma mais homogênea no volume de solo explorado pelas raízes das culturas (Rehm & Lamb, 2004). No presente trabalho, mesmo após 18 anos, o manejo do solo e da adubação e a distribuição de potássio no perfil do solo não afetou, de forma significativa, a distribuição das raízes no perfil do solo (Figuras 7 e 8), como verificado

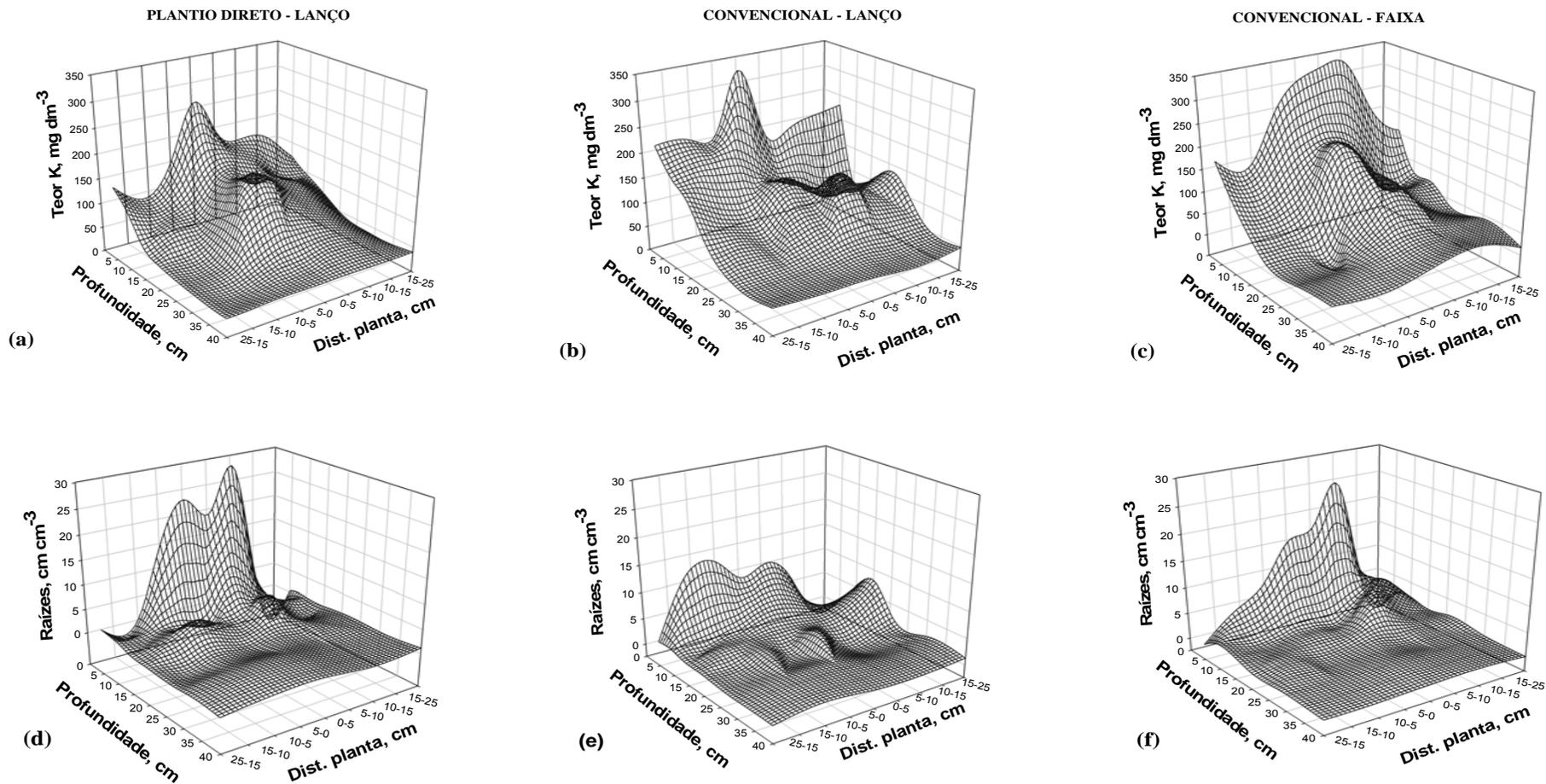


FIGURA 7. Distribuição de potássio (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-lanço, convencional-lanço e preparo em convencional-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).

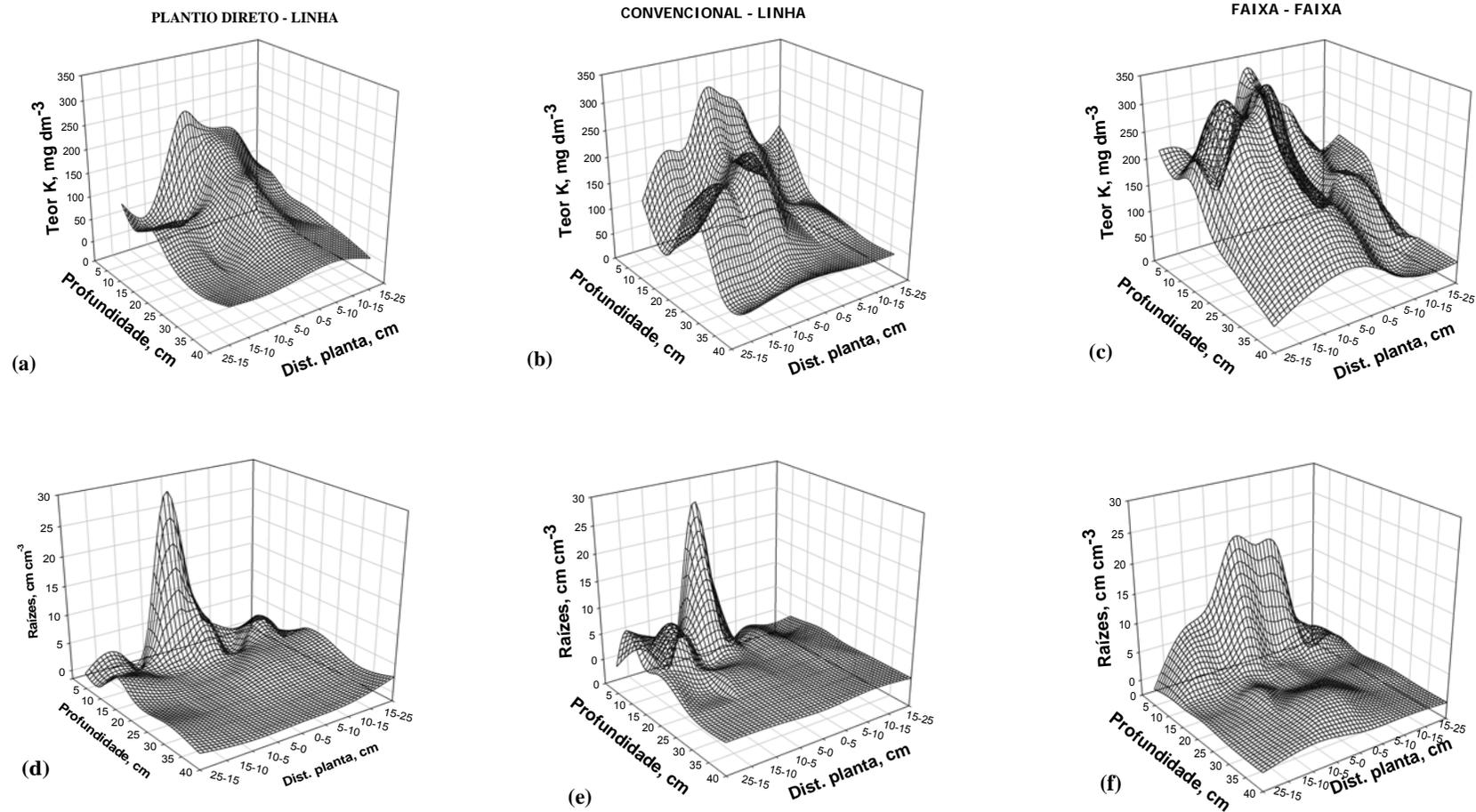


FIGURA 8. Distribuição de potássio (a, b e c) e de raízes (d, e e f) no início do enchimento de grãos de milho, no perfil de um Argissolo Vermelho sob os sistemas de manejo: plantio direto-linha, convencional-linha e preparo em faixa-faixa, respectivamente, por 18 anos, safra 2006/07 (Monólito representativo da parcela).

anteriormente por Klepker & Anghinoni (1995). Isto também foi observado por Vyn & Janovicek (2001), o que indica que não é a presença desse nutriente que induz o crescimento radicular. Associação entre os teores de K do solo e o crescimento de raízes, no entanto, pode ser observada em solos com baixa disponibilidade de K (Barber, 1995; Rosolem et al., 2003b).

Mesmo assim, foram verificadas algumas alterações na magnitude dos valores de densidade radicular em função dos sistemas de manejo (Figuras 7 d,e,f e 8 d,e,f). Na camada superficial (0-5 cm) ocorreram valores em torno de 25 e 10 cm cm⁻³ nos sistemas Dir/Lan e Con/Lan, respectivamente, ao passo que para os sistemas com adubação em linha houve um acúmulo de raízes em torno da linha fertilizada, resultando em picos ao redor de 25 cm cm⁻³ nos tratamentos Dir/Lin e Con/Lin.

Apesar das variações na distribuição do K no perfil do solo, discutidas anteriormente, parece que, independentemente do sistema de manejo, há um acúmulo desse nutriente nas proximidades do colmo da planta de milho (Figuras 7 a,b,c e 8 a,b,c) e uma diminuição dos teores a medida que há um afastamento da linha de semeadura e em profundidade. Tal comportamento pode ser atribuído ao fenômeno conhecido como “lavagem de K” (Klepker & Anghinoni, 1995). A absorção intensa de K pela planta de milho resulta numa redução temporária de seu teor no solo (Sanzonowicz & Mielniczuk, 1985) que, posteriormente, pela lavagem do K das folhas e colmos pela água, gera um gradiente radial a partir do colmo (Silva & Ritchey, 1982). A ocorrência do fenômeno de lavagem do K se dá pelo fato desse nutriente não fazer parte da estrutura química de compostos orgânicos na planta (Marschner, 1995). O acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho (Tabela 8), que foi de duas e meia vezes a quantidade aplicada ao solo, juntamente com a sua concentração no solo na base do colmo (Figuras 7 a,b,c e 8 a,b,c), independentemente do sistema de manejo (Figuras 7 a,b,c e 8 a,b,c), indicam a ocorrência da lavagem de K a partir da parte aérea da planta.

A distribuição de K e de raízes de milho no solo ou o seu crescimento, não parecem ter sido a causa da diferença entre os sistemas de manejo, pois os maiores comprimentos de raízes no Dir (Lan e Lin) (Tabela 8) não se refletiram na produção de MSPA ou no acúmulo de K pelas plantas de milho. Neste sentido, as aplicações a lanço, independentemente do tipo de

preparo do solo, resultaram em maior eficiência de uso de K (EUK) pela cultura do milho (Tabela 8). Na aplicação de K na linha, apesar dos teores elevados na linha de semeadura (Figuras 7 a,b,c, 8 a,b,c), aparentemente não provocaram restrição a sua absorção pelas plantas de milho (Tabela 8).

TABELA 8. Produção de matéria seca da parte aérea de milho (MSPA), comprimento total de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho, acúmulo de potássio em plantas de milho e eficiência na utilização do potássio (EUK), no monólito coletado no início do enchimento de grãos, em função de sistemas de manejo, safra 2006/07 (Valores de duas repetições)

Sistemas de manejo ¹	Compr. raízes	K na parte aérea	MSPA	EUK
	m/10 ⁻² m ³	--g planta ⁻¹ --	g planta	----g ² mg ⁻¹ ----
Con/Lan	288 bc	3,6 ab	227 a	14,4 a
Dir/Lan	353 a	3,1 b	202 abc	13,2 a
Con/Lin	220 d	3,2 b	190 bc	11,3 bc
Dir/Lin	339 a	3,0 b	178 c	10,6 c
Con/ Fx	265 bcd	3,1 b	183 c	10,8 c
Fx/Fx	257 cd	4,2 a	219 ab	11,5 bc

¹ Con= convencional; Dir= Direto; Lin= linha; Lan= lanço; Fx= faixa. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey 5%.

Mesmo com valores elevados de K na linha de semeadura, o desenvolvimento das plantas de milho não foi afetado (Tabelas 4 e 9). A redução de 30% no número e na altura de plantas, no comprimento de raízes e no rendimento de grãos de soja a partir da dose de 30 kg de K ha⁻¹ observados por Salton et al. (2002), não ocorreu neste trabalho mesmo com a dose de 83 kg de K ha⁻¹ (2006/07) na linha de semeadura (Tabela 5), mostrando que a dose de K recomendada (CQFS RS/SC, 2004), não restringiu o desenvolvimento do milho.

TABELA 9. Acúmulo de potássio no tecido de milho, 85 dias após a emergência, em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de P e K			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	227 ^{ns}	221	234	227
Faixa	192	204	232	209
Convencional	204	240	188	210
Média	208	221	218	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey (P<0,05).

Diante das condições do presente estudo, de modo geral, o rendimento de grãos verificado ficou próximo ao esperado ($> 8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), sem diferenciação entre os sistemas de manejo do solo, devido à baixa probabilidade de resposta à adubação potássica em solos com teores de K alto (Pavinatto & Ceretta, 2004). Esses autores relataram, no entanto, um menor acúmulo de K na parte aérea do milho para adubações a lanço em relação à linha, em função do espaçamento entre linhas utilizado (0,80 m). No presente estudo, mesmo com o uso de um espaçamento maior (1,0 m), a distribuição desse nutriente no perfil do solo (Figuras 4,7 e 8), parece não ser suficiente para afetar o acúmulo de K na parte aérea e nos grãos (Tabelas 9 e 10).

TABELA 10. Acúmulo de potássio nos grão do milho, em função do manejo de um Argissolo Vermelho e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de P e K			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Plantio Direto	52,5 ^{ns}	45,7	46,8	48,3
Faixa	42,2	47,2	40,1	43,1
Convencional	51,9	47,0	53,0	50,6
Média	48,9	46,6	46,7	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey ($P < 0,05$).

O índice de eficiência de K, obtido pela razão rendimento de grãos / K aplicado ao solo, não apresentou diferenças entre os sistemas de manejo (Tabela 11). A presença de irrigação, no presente estudo, parecem ter nivelado os benefícios advindos do plantio direto consolidado, de forma que foi observada inclusive uma tendência de maior IEK no preparo convencional. Ainda, o acúmulo de K verificado em todos os sistemas de manejo, e, principalmente no caso do SPD, pode ter contribuído para assimilaridade de eficiência de uso desse nutriente.

TABELA 11. Índice de eficiência ao K pelo milho, 85 dias após a emergência, em função do manejo do solo e do modo de adubação, safra 2006/07 (Valores de três repetições)

Manejo do solo	Modo de aplicação de P e K			Média
	Lanço	Linha	Faixa	
	----- g ² mg ⁻¹ -----			
Plantio Direto	99,2 ^{ns}	86,1	91,0	92,1
Faixa	96,4	97,1	83,5	92,3
Convencional	103,5	97,5	107,2	102,7
Média	99,7	93,6	93,9	

^{ns} não significativo pelo Teste de Tukey ($P < 0,05$).

4.4. Conclusões

Independentemente do manejo do solo e da adubação o potássio tende a se distribuir no solo de forma similar, formando gradientes a partir da superfície e em torno do colmo do milho.

Os gradientes, no entanto, são diferenciados em relação ao manejo do solo, concentrando-se mais na superfície em plantio direto e aumentando mais em profundidade, no manejo convencional.

As raízes de milho também se concentram na camada superficial do solo, com maior crescimento em plantio direto, independentemente do modo de adubação formando, porém, gradientes maiores em relação ao potássio.

A absorção de potássio e o crescimento do milho não estão associados à distribuição desse nutriente e de raízes resultantes dos manejos adotados; diferentemente ocorre com a eficiência de sua utilização pelas plantas, que é favorecida pela aplicação a lanço do adubo potássico, independentemente do preparo do solo.

O rendimento de massa seca e grãos, acúmulo de potássio na parte área e nos grãos de milho não são afetados pelos sistemas de manejo.

5. CAPÍTULO 4: DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO DE POTÁSSIO E DE RAÍZES DE MILHO NO SOLO NO TEMPO EM SISTEMAS DE MANEJO

5.1. Introdução

A concepção de que o manejo adequado dos solos resulta em sistemas sustentáveis, rentáveis e práticos já está bem consolidada no Brasil (Landers, 1999). Deste modo, a expansão do sistema plantio direto em território nacional (FEBRAPDP, 2008) tem trazido novos enfoques para a dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera. Dentre os fatores importantes a serem considerados, o tempo de adoção desse sistema deve ser destacado, pois, grande parte das alterações que afetam a qualidade do solo são graduais e não detectadas em curto prazo (Calegari et al., 2008).

Os fatores que contribuem para a sustentabilidade do solo sob plantio direto em longo prazo são de natureza física (Cruz et al., 2003), química (Lopes, 2004) e biológica (Moreira & Siqueira, 2006). Desta forma, em relação a sistemas nos quais há revolvimento do solo, tem sido verificado que o plantio direto deve ser analisado por um novo prisma (Nicolodi, 2007). Dentre os atributos afetados pelo não revolvimento do solo, de forma direta, pode se destacar o gradiente químico formado ao longo do tempo, principalmente dos nutrientes de baixa mobilidade no solo, como o fósforo (P) e o potássio (K) (Muzilli et al., 1983; Sidiras & Pavan, 1985, Eltz et al., 1989).

Em longo prazo, o acúmulo de K nas camadas mais superficiais parece nem sempre ser maior no plantio direto em relação aos demais sistemas de cultivo (Hussain et al., 1999), podendo haver a estratificação desse nutriente no solo independentemente do sistema de manejo do solo e da adubação potássica (Mallarino & Borges, 2006). A mobilidade de K no solo está associada à sua concentração no solo, principalmente pela dose de fertilizante aplicada (Ernani et al., 2007). Fatores, como a textura do solo (Johnston, 2008), a capacidade de troca de cátions (CTC) (Silva & Meurer, 1988; Mielniczuk, 2005) e a ciclagem de K pelo manejo das culturas (Rosolem et al., 2003a) também influenciam na distribuição desse nutriente no solo.

Com relação ao fósforo, embora já esteja documentado o acúmulo nas camadas superficiais em solos com plantio direto consolidado (Muzilli, 1983), este pode ser tanto na camada de 0-2,5 cm (Eltz et al., 1989), 0-5 cm (Cowie et al., 1996, Bayer & Mieniczuk, 1997;) como na de 0-10 cm (Selles et al., 1998; Bravo et al., 2007). Além disso, ao longo do tempo, pode haver uma redistribuição desse nutriente no perfil do solo, em função tanto das raízes (Gregory, 2006), como da maior atividade da micro e mesofauna do solo (Sá, 1994). Esta nova dinâmica do P, que se estabelece no solo com o passar do tempo (Dwyer et al., 1996), torna fundamental, para seu entendimento, a avaliação da sua distribuição no perfil e as formas que esse nutriente se encontra no solo, além do próprio comportamento do sistema radicular em profundidade. Neste sentido, o incremento do P no perfil do solo e, principalmente, a forma na qual este se movimenta, são tópicos a serem mais bem estudados no Brasil (Sá, 1999; Anghinoni, 2007).

O efeito de métodos de preparo do solo na distribuição do sistema radicular nas culturas no perfil do solo (Taylor, 1983; Peterson, 2008) aliada à dificuldade de avaliação do sistema radicular no campo (Amos & Walters, 2006), fazem com que sejam escassas as informações na literatura sobre o comportamento de raízes em função de sistemas de manejo do solo. Embora o revolvimento do solo possa influenciar positivamente a taxa de crescimento radicular, em áreas conduzidas há vários anos sob plantio direto tem sido observado comportamentos divergentes, havendo ora a predominância de raízes nas camadas superficiais (Taylor, 1983) e ora o aprofundamento de raízes com o passar do tempo (Qin et al., 2005).

O presente estudo teve como objetivo verificar o efeito de sistemas de manejo do solo na distribuição de fósforo, potássio e de raízes no perfil do solo e no tempo em um experimento de longa duração.

5.2. Material e Métodos

Para a condução do presente trabalho foi utilizado um experimento de longa duração na Estação Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS). O mesmo se localiza na região fisiográfica da Depressão Central, no município de Eldorado do Sul, com precipitação anual de 1.440 mm, e de clima subtropical de verão úmido quente (Cfa), segundo a classificação de Köppen. O solo, de textura franco-argilo-arenosa e origem granítica, é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2006), com textura franco-argilo-arenosa.

O experimento foi, então, instalado em 1988, quando o solo apresentava, na camada de 0-15 cm, os seguintes atributos químicos do solo antes da aplicação dos tratamentos: pH (H₂O) 5,2, P e K (Mehlich 1) 2,0 e 132 mg dm⁻³ e matéria orgânica de 30 g kg⁻¹, respectivamente. Maiores detalhes podem ser obtidos em Marcolan (2002).

Em maio de 1988, foi aplicado calcário dolomítico em dosagem para aumentar o pH do solo até 6,0 (3,4 t/ha com PRNT=100%), em toda a área experimental, com incorporação por meio de uma aração e duas gradagens. Posteriormente, de julho a setembro, foi cultivada a aveia preta (*Avena strigosa*, S.) sendo, em seguida, aplicados os tratamentos, no final de outubro de 1988. Os preparos de solo consistiram de: preparo convencional (Con - uma aração até 15-17 cm de profundidade e duas gradagens); preparo em faixas (Fx - 20 cm de largura e 15 cm de profundidade, centrada na linha de semeadura do milho com linhas espaçadas de 1,0 m, usando um sulcador tipo “asa de andorinha”) e sem preparo (Dir - sulco para semeadura do milho com 5 cm de largura na linha do milho e 5-8 cm de profundidade = plantio direto). Os modos de aplicação de fósforo (P) foram: a lanço (Lan), em faixa (Fx) de 20 cm e na linha de semeadura, aproximadamente a 8 cm de profundidade (Lin), efetuados manualmente após os modos de preparo do solo.

A adubação, baseada na análise de solo antes da instalação do ensaio, da camada de 0-15 cm, descritas anteriormente, consistiu na aplicação de 80 kg P_2O_5 /ha, 60 kg K_2O /ha e 70 kg N/ha, sendo o nitrogênio aplicado em cobertura, em dose única, aos 30 dias após a emergência do milho.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em um bifatorial 3x3, em parcelas subdivididas, com os métodos de preparo do solo (3) ocupando as parcelas principais (24x12 m) e os modos de adubação (3) as subparcelas (12x8 m), com três repetições. A seqüência de culturas utilizada a partir de outubro de 1988 foi de milho, na primavera/verão e aveia + ervilhaca (*Vicia sativa*) no outono/inverno, com a aplicação de calcário a partir de 1992, de quatro em quatro anos, sempre visando elevar o pH do solo até 6,0 (método SMP). Mais detalhes sobre o histórico e a área experimental são fornecidos no capítulo 2 desta dissertação.

O experimento foi conduzido ao longo dos 18 anos com os mesmos procedimentos. Desta forma, utilizou-se espaçamento de 1 m entre as plantas de milho, sendo realizado desbastes para obtenção de uma população de 50.000 plantas ha^{-1} . Como para o presente trabalho são utilizados dados de três safras (1989/90, 1999/00 e 2006/07) é feita, a seguir, uma descrição das especificidades de cada uma delas.

Safra 1989/90

O fósforo, o potássio e o nitrogênio foram aplicados na forma de superfosfato triplo, cloreto de potássio e uréia, respectivamente, nas doses de 80 kg P_2O_5 /ha, 40 kg K_2O /ha e 150 kg N/ha. A aplicação de fósforo e potássio foi efetuada antes da semeadura do milho, pelo segundo ano consecutivo. O nitrogênio foi aplicado em cobertura, sem incorporação, em três doses de 50 kg N/ha, aos 25, 61 e 67 DAE, sendo que a terceira aplicação foi feita em função de possíveis perdas ocorridas na segunda, pelas altas temperaturas e baixa umidade do solo. A semeadura foi feita nove dias após a aplicação dos adubos, em 19/09/89, utilizando-se o híbrido C 511-A, e, durante o ciclo fizeram-se duas irrigações, aos 25 (20mm) e aos 69 (30mm) DAE, ambas após a aplicação de uréia em cobertura, de modo que somado aos 690 mm fornecidos pela chuva, o milho recebeu 740 mm de água durante seu ciclo.

Ainda na **Safra 1999/00**, foram aplicadas as mesmas doses de N, P_2O_5 e K_2O por hectare, de modo que esta época somente diferiu da de 90 em

relação ao híbrido de milho semeado, sendo o híbrido Pioneer 6069 utilizado em outubro de 1999.

Safra 2006/07

Os principais atributos químicos do solo anteriores a implantação da cultura do milho são listados no Item 3.2 do presente trabalho. O milho (híbrido Pioneer 30R50) foi semeado com máquina em 20 de outubro de 2006, logo após a aplicação dos tratamentos de preparo de solo e modo de adubação. Foi utilizada uma adubação de base de 60, 150, 100 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, utilizando as fontes uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente, visando uma produtividade de grãos acima de 8 Mg ha⁻¹, de acordo com recomendações da CQFS RS/SC (2004). Aos 15 e aos 35 DAE foram aplicados 60 kg de N em cada cobertura, na forma de uréia. O cultivo do milho ocorreu em condições de irrigação por aspersão, a qual era feita sempre que as plantas apresentavam sinais de déficit hídrico. No total, foram feitas seis irrigações, aplicando-se lâminas em torno de 25 mm, resultando uma aplicação total em torno de 150 mm de água ciclo⁻¹. Ainda, ao longo do cultivo, choveram 721 mm.

Avaliações

Para a avaliação da distribuição de fósforo, potássio e de raízes no solo, por ocasião do florescimento pleno e início de enchimento de grãos (Jan/90, Jan/00 e Jan/07), foram amostrados monólitos de solo nas seguintes combinações de sistemas de manejo do solo e modos de adubação: Con, com incorporação de calcário e de adubo em Li e La; Dir, sem incorporação do calcário e adubação em Lin e Lan, em duas das três repetições.

Os monólitos de solo foram coletados em pranchas de madeira com pregos metálicos, de acordo com a metodologia proposta por Schuurman & Goedewagen (1965), modificada por Pedó (1985). Cada monólito (50x40x15 cm) foi subdividido em: quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm) com quatro distâncias para cada lado do colmo da planta de milho (0-5, 5-10, 10-15 e 15-25 cm) (4x8=32) e duas profundidades (20-30 e 30-40 cm) com cinco estratificações horizontais (5-5, 5-15, 15-25, 25-15 e 15-5 cm) (2x5=10), respectivamente, totalizando em (32+10=42) 42 quadrículas de solo. Em cada quadrícula de solo, foi efetuada a separação do solo e de raízes em camadas

sobrepostas. As amostras de solo foram secas e acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas para posterior análise.

O P e K extraível (Mehlich-1) foram determinados nas amostras de solo de cada quadrícula das placas, segundo Tedesco et al. (1995). O carbono orgânico total (COT), o fósforo total e as formas inorgânicas e orgânicas foram determinadas em amostras compostas das camadas horizontais de cada monólito coletado em Jan/07, respectivamente, segundo Tedesco et al. (1995) e pelo método de ignição descrito por Saunders & Williams (1955) e modificado por Sá (1994) descrito a seguir:

Acondicionou-se uma sub-amostra de 2g de terra em cadinho de porcelana e levou-se a forno de mufla, regulado para 550°C. Ao atingir a temperatura desejada, as amostras foram mantidas por 1 hora. Após completo resfriamento, estas foram transferidas para erlenmayer de 250 ml e adicionado 100 ml de uma solução de H₂SO₄ 0.2N. Concomitantemente, outra sub-amostra de 2g, não incinerada, sofreu o mesmo procedimento. Ambas, foram colocadas num agitador horizontal e agitado por 10 minutos a 220 rpm e posteriormente, mantidas em repouso por um período de 16 horas. A determinação do conteúdo de P foi colorimétrica segundo Tedesco et al., (1995). Os padrões foram elaborados com as mesmas soluções utilizadas na extração. O Pt (Pi+Po) foi obtido da sub-amostra incinerada mais a extração com a solução ácida, enquanto o Pi, originou-se da extração na sub-amostra não incinerada. O Po foi estimado pela diferença entre o Pt (Pi+Po) e o Pi, pela seguinte expressão: $Po = Pt - Pi$.

As amostras das raízes foram acondicionadas em sacos plásticos, mantidas úmidas e congeladas. Posteriormente, as mesmas foram descongeladas em recipientes plásticos, contendo água e a seguir, novamente lavadas, quando necessário, para a determinação do comprimento radicular pelos métodos de Tennant (1975), no ano de 1990 e SIARCS (Guimarães et al., 1997) no de 2007, respectivamente. Com os dados de comprimento radicular, foi calculada a densidade radicular, pela razão comprimento de raízes/volume de solo (cm cm⁻³).

Análise Estatística

Os dados de P e K disponível (Mehlich 1), distribuição da densidade radicular (%) foram submetidos à análise da variância utilizando o seguinte modelo estatístico para a análise da variância:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + E_j + \text{erro } a(i,j) + P_k + \text{Erro } b(i,k) + AP_{jk} + \text{Erro } c(i,j,k)$$

onde: B = blocos (i = 1,2); E = épocas de amostragem (j = 1,2,3); P = profundidades amostradas (k = 1,2,3,4,5,6), e Erro= erro experimental.

A análise estatística foi feita em função da disponibilidade do dados: para o fósforo disponível foram três safras e para o potássio disponível e as raízes somente duas (1990 e 2007)

Para as avaliações das frações de P nas camadas dos monólitos coletados, foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + \text{Erro } a(ik) + P_j + SP_{ij} + \text{Erro } b(i,j,k),$$

onde: μ = média geral do experimento; S= sistemas de manejo do solo (i=1,2,3,4,5,6); P= profundidade (j=1,2,3,4,5,6) e Erro = erro experimental.

No caso de significância da análise de variância, foi utilizado o Teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) ($P < 0,05$) para a distinção entre médias.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Fósforo e raízes

As mudanças ocorridas nos teores de P (Mehlich 1) em função do uso dos diferentes sistemas de manejos no perfil do solo no tempo são apresentadas na Figura 9. Independentemente do sistema de cultivo adotado, foi verificada interação entre ano e profundidade ($P < 0,05$), havendo, então, efeito dos anos nas profundidades analisadas.

Foi verificado um gradiente de P no solo em todos os sistemas de manejo do solo, com acúmulo de P ao longo dos 18 anos de cultivo principalmente na camada de 0-5 cm (Figura 9). É importante salientar que, embora a magnitude dos gradientes formados, só houve significância ($P < 0,05$) em 2007, mostrando que os 10 anos iniciais de cultivo (1990 a 2000) não haviam sido suficientes para que esse acúmulo fosse significativo, mesmo em sistemas em que o solo não foi revolvido (Figuras 9 c e d).

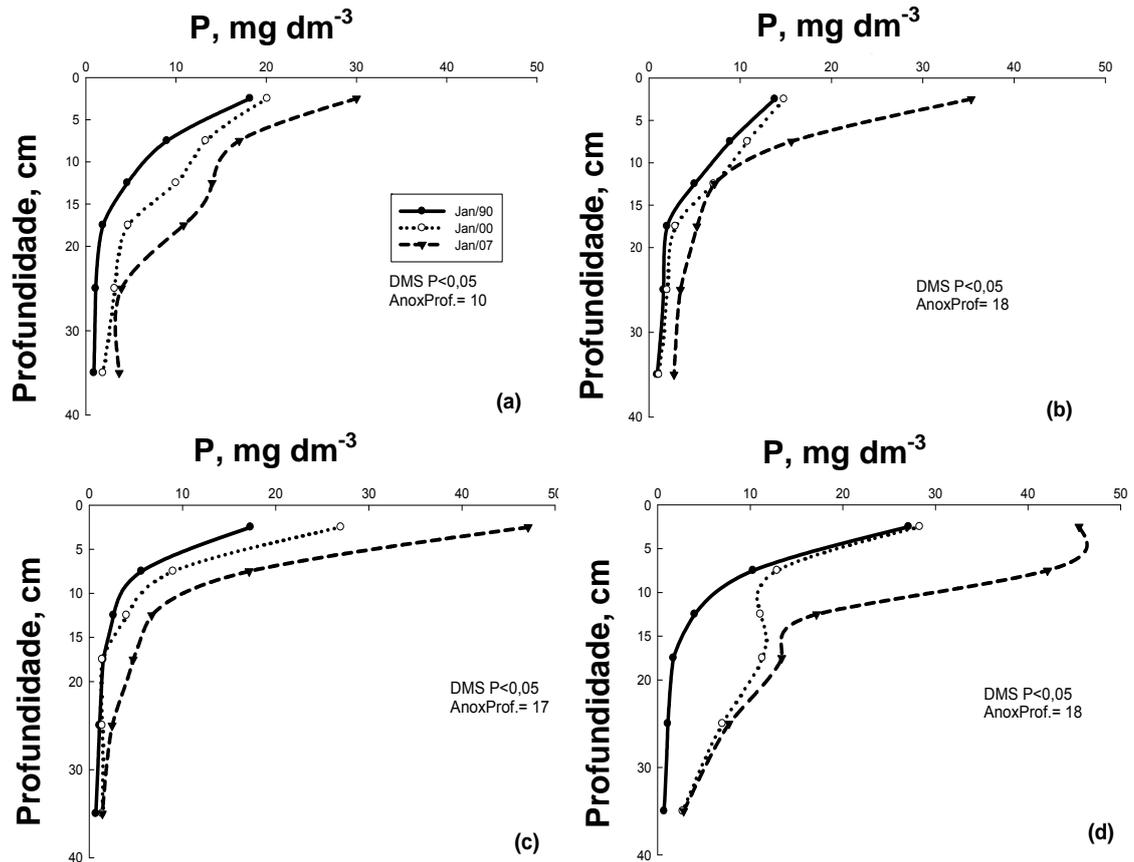


FIGURA 9. Distribuição de fósforo (Mehlich 1) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional – lanço (a), convencional – linha (b), plantio direto – lanço (c) e plantio direto – linha (d) no tempo (Valores de duas repetições).

No Dir/Lin (Figura 9d), foi verificado o efeito do tempo no acúmulo de P até a profundidade de 10 cm. O acúmulo de P até 20 cm nesse sistema, embora não significativo ($P > 0,05$), chama a atenção, visto que o adubo fosfatado é colocado, aproximadamente, a sete cm de profundidade.

O tempo pode proporcionar o acúmulo do P nas camadas mais superficiais do solo, independentemente do sistema de manejo (DeMaria et al., 1999). Assim, esses autores, após nove anos, observaram aumentos na percentagem de P no solo em Dir de 172, 154 e 101% nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. No presente estudo, após 18 anos, os sistemas Dir/Lan e Dir/Lin, promoveram, na média, aumentos de 135, 214 e 231%, nessas mesmas camadas, respectivamente, demonstrando que o tempo contribui continuamente no aumento de P no solo proporcionalmente maior em camadas mais profundas. Porém, deve ser feita uma ressalva no que diz respeito à mobilidade desse nutriente, pois, solos de diferentes resiliências

influenciam grandemente na distribuição de P no perfil do solo (Muzilli, 1983, Cowie et al., 1996)

Desta forma, a contradição existente na literatura, com acúmulo de P somente na camada de 0-5 cm (Byers et al., 2006; Falleiro et al., 2003), até 10 cm (Maria & Carmo, 1999) ou abaixo de 10 cm (Hussain et al., 1999; Essington & Howard, 2000) é aparente, pois a profundidade de aumento de P ao longo do perfil do solo, é efeito do tempo e da adição contínua e em excesso do adubo ao solo em plantio direto, juntamente ao tipo de solo.

As aplicações sucessivas de P na linha de semeadura ao longo dos anos parecem promover um efeito significativo na incorporação desse nutriente no solo, como sugerido por Ciotta et al. (2002). A deposição do adubo pela semeadura pode ocorrer até a profundidade de 10 cm, havendo, inclusive um leve preparo do solo a cada semeadura. Os autores levantam ainda a questão da liberação de P nessa camada pela decomposição das raízes. A distribuição das raízes em função do preparo do solo e do modo de adubação por 18 anos demonstra haver em plantio direto, em longo prazo, um aprofundamento das raízes (Figuras 10 e 11).

O efeito do tempo na distribuição radicular, em todos os sistemas de manejo, principalmente até a profundidade de 10 cm, teve um comportamento inverso ao verificado para a distribuição de P, (Figura 9) uma vez que houve menor densidade (Figura 10) e proporção (Figura 11) de raízes com o tempo no sistema. A partir dessa profundidade, parece que, com excessão dos sistemas com o revolvimento do solo (Con/Lan- Figura 10a), houve uma redistribuição das raízes no solo, com aprofundamento até as camadas de 20-30 cm e 30-40 cm. No Dir/Lan a relação entre o P disponível (Figura 9c) e a densidade radicular (Figura 10c) chama atenção, pois, houve um aumento de 190% nos teores de P disponível do ano de 1990 a 2007 ao mesmo tempo em que foi observada uma maior concentração radicular no ano de 1990, nas camadas de 5-10 e 10-15 cm, respectivamente. Desta forma, possivelmente, a estratificação do P no solo pode ter restringido o aprofundamento das raízes.

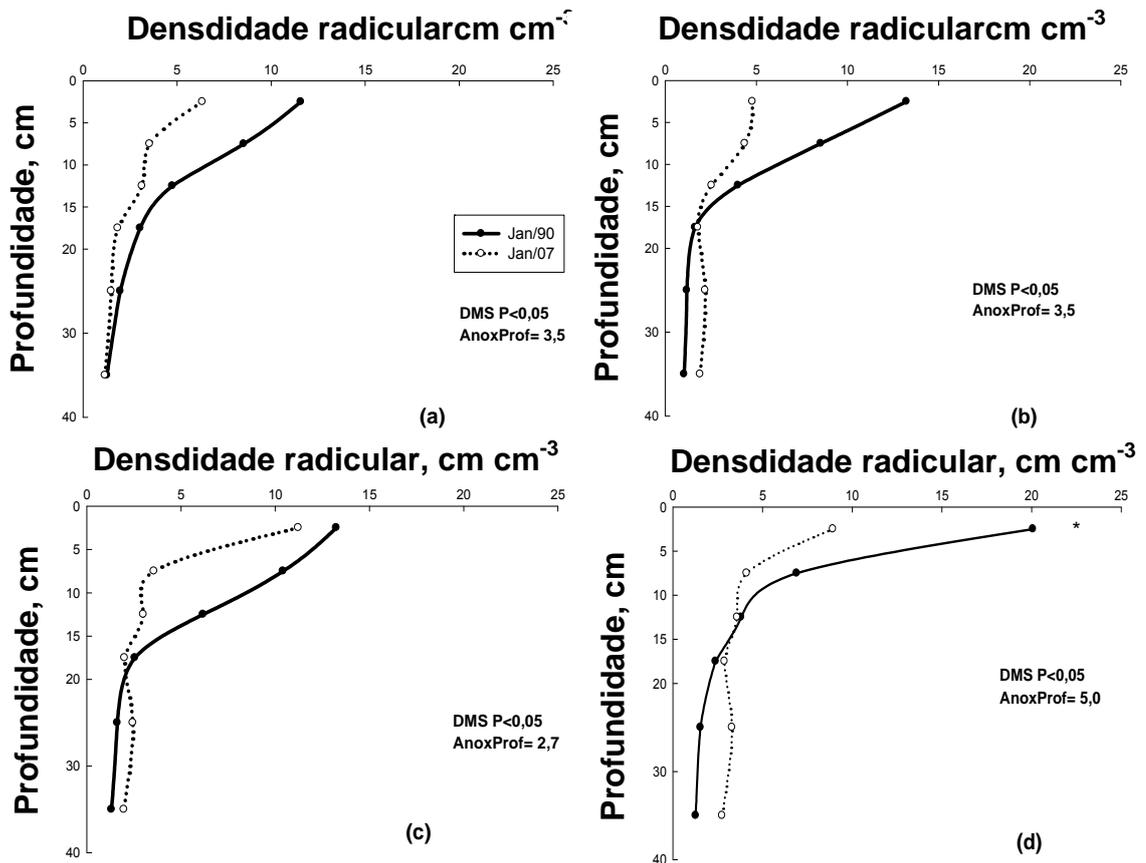


FIGURA 10. Distribuição de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional – lanço (Con/Lan) (a), convencional – linha (Con/Lin) (b), plantio direto – lanço (Dir/Lan) (c) e plantio direto - linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).

Para os sistemas Con/Lan e Con/Lin (Figuras 10 a,b e 11 a,b) foi verificada a tendência semelhante à discutida anteriormente, o que era esperado nesses casos, visto que o revolvimento do solo, aumentando a macroporosidade (Marcolan & Anghinoni, 2006), favorece o crescimento radicular em profundidade. A redistribuição das raízes no tempo em função do revolvimento do solo também foi observada por Ishaq et al., (2003) que, concluíram haver, ao longo de três anos, no preparo convencional, na camada de 15-30 cm, uma maior densidade radicular do milho.

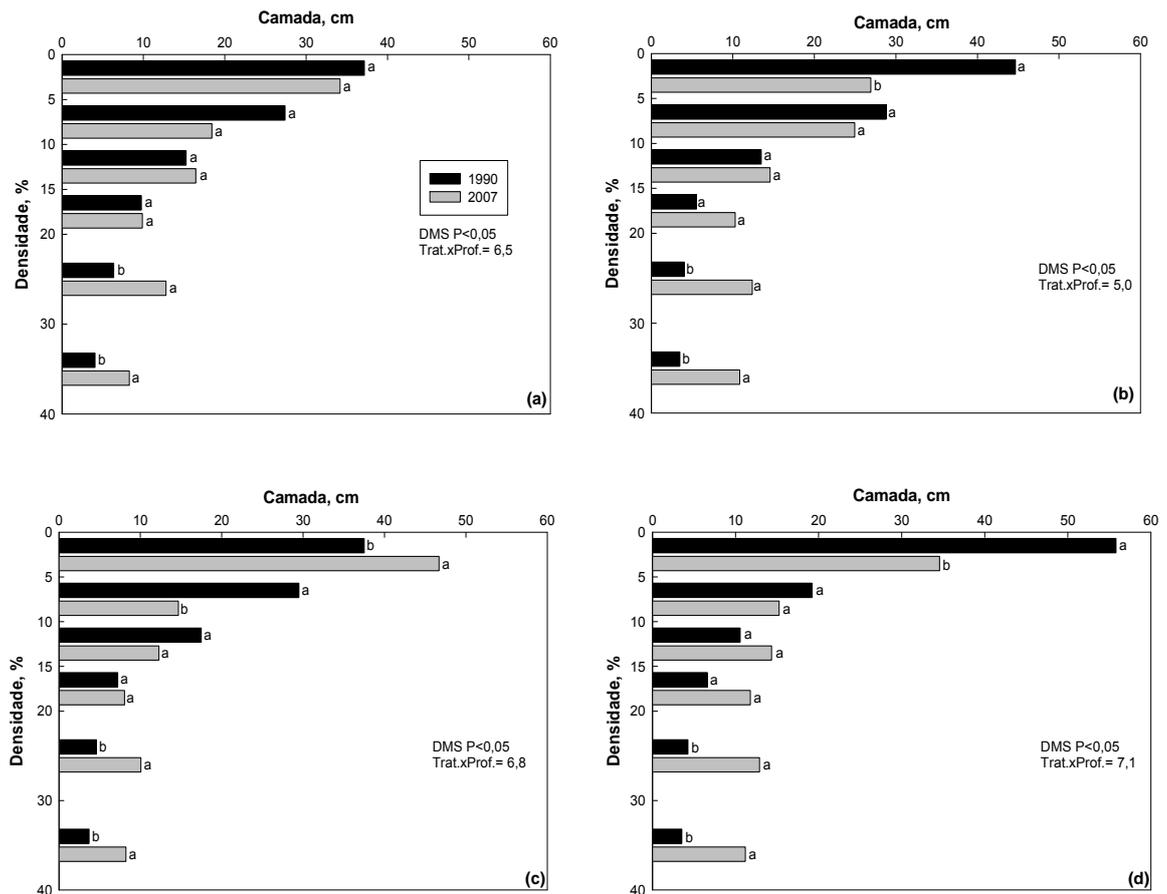


FIGURA 11. Distribuição da densidade de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo : convencional - lanço (Con/Lan) (a), convencional – linha (Con/Lin) (b), plantio direto - lanço (Dir/Lan) (c) e plantio direto – linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).

O comportamento das raízes, em função dos teores de P disponível no solo, carece atenção, uma vez que a resposta do crescimento radicular é diretamente influenciada pelos teores de P disponível (Anghinoni & Barber, 1980). Desta forma, é esperado um maior estímulo, pela aplicação de fertilizantes fosfatados, ao crescimento de raízes em zonas com teores de P disponível mais baixos, como ocorrido nesse experimento no ano de 1990. Por outro lado, o não revolvimento do solo, em paralelo à constante adição de resíduos com maior atividade da fauna, principalmente, da meso fauna (Adiscott, 1995), novas propriedades emergem nesses sistemas (Nicolodi, 2007), como o acúmulo de MO (Bayer & Martin Neto, 2000), as melhorias no estado de agregação (Carpenedo & Mielniczuk, 1990) e a continuidade de poros (Cannell & Hawes, 2003). Dessa forma, pode haver uma redistribuição de raízes nesse sistema, pois, embora tenha verificado que o tempo possa

favorecer uma maior distribuição radicular no sentido horizontal e vertical em solos sob plantio direto e preparo convencional (Ball-Coelho et al., 1998), respectivamente, a formação de bioporos no primeiro pode modificar o movimento da água no solo sob esse sistema, afetando o crescimento radicular (Cannell & Hawes, 2003).

Por outro lado, a redistribuição observada no preparo convencional (Figuras 11 a e b), de modo geral, provavelmente ocorreu em função da melhora nos atributos químicos em profundidade, visto a incorporação tanto dos fertilizantes quanto do calcário ao longo destes 18 anos.

Outro fator a ser enfatizado, são as diferenças, nos respectivos horizontes do solo no presente estudo. Pois, no horizonte A há um menor teor de argila em relação ao B, podendo, possivelmente, contribuir para a maior concentração radicular observada no ano de 2007 nas camadas mais profundas (20-40 cm). Uma maior redistribuição radicular no tempo em solos arenosos sob plantio direto foi também verificada por Hughes et al. (1992).

A redistribuição do P e das raízes no sistema plantio direto parece estar associada a três alterações importantes que ocorrem nesse sistema, no tempo: a reciclagem dos canais radiculares que permanecem no solo (Adiscott & Thomas, 2000), o acúmulo de MO na superfície e o rearranjo das formas desse nutriente no solo (Sá, 1999). Desta forma, a avaliação das formas de P (Figura 12) e dos teores de carbono orgânico (COT) no perfil do solo (Figura 13) se faz necessária.

Os sistemas de manejo afetaram de forma diferenciada as formas inorgânica (P_i), orgânica (P_o) e o fósforo total (P_t) em profundidade (Figura 12). Sendo assim, foi verificado, para o P_i e o P_t , efeito similar dos tratamentos até a profundidade de 20 cm, ao passo que, para o P_o , somente as camadas de 0-5 e 15-20 cm apresentaram diferenças entre os sistemas de manejo. Assim, os valores de P_i foram mais elevados no sistema Dir/Lin (Figura 12a) até a profundidade de 20 cm. Comportamento semelhante também pode ser verificado pelos teores de P disponível (Mehlich 1 e Resina) (Figura 13). A contribuição das sucessivas adubações na linha de semeadura na deposição do P no solo (Figura 9) em paralelo à decomposição de raízes presentes nestas camadas (Figuras 10 e 11), possivelmente explicam estes teores de P_i observados.

A adição superficial de fertilizantes fosfatados no sistema plantio direto, segundo Rheinheimer (2000), pode gerar um gradiente com aumento de concentração de P no solo em profundidade, predominantemente, na forma inorgânica. Todavia, Selles et al. (1997 e 1999) ressaltaram haverem constatado aumentos nas formas inorgânicas de fósforo somente até 6 cm nesse sistema.

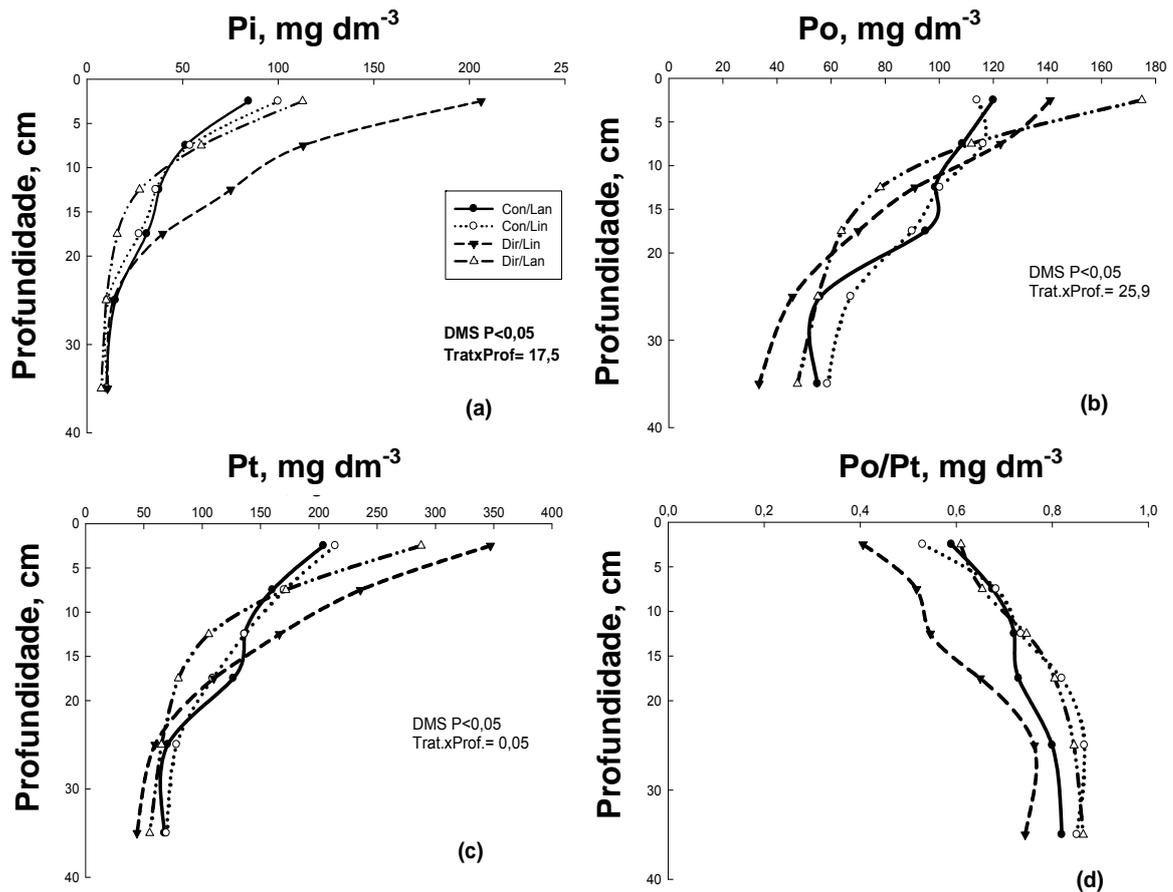


FIGURA 12. Distribuição das formas de fósforo; inorgânico (P_i), orgânico (P_o), fósforo total (P_t) e a razão fósforo orgânico/fósforo total (P_o/P_t), no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo, safra 2006/2007 (Valores de duas repetições).

É sensato, olhando por outro prisma, ressaltar que a decomposição de resíduos orgânicos depositados na superfície (ciclagem) e a decomposição de raízes (reciclagem), principalmente, possam estar influenciando neste aumento do P_i em profundidade (Anghinoni, 2007). A importância do componente biológico vegetal na disponibilidade de P para as plantas em cultivos sucessivos explica que somente ocorrerá aumento nos teores de P_i em profundidade, mediante aumentos na fração orgânica (Blair & Boland, 1978). Neste contexto, teores mais elevados de P_o foram verificados, na camada de 0-

5 cm, no Dir/Lan ao passo que, na camada de 15-20 estes foram mais elevados no Con/Lan e Con/Lin (Figura 12b).

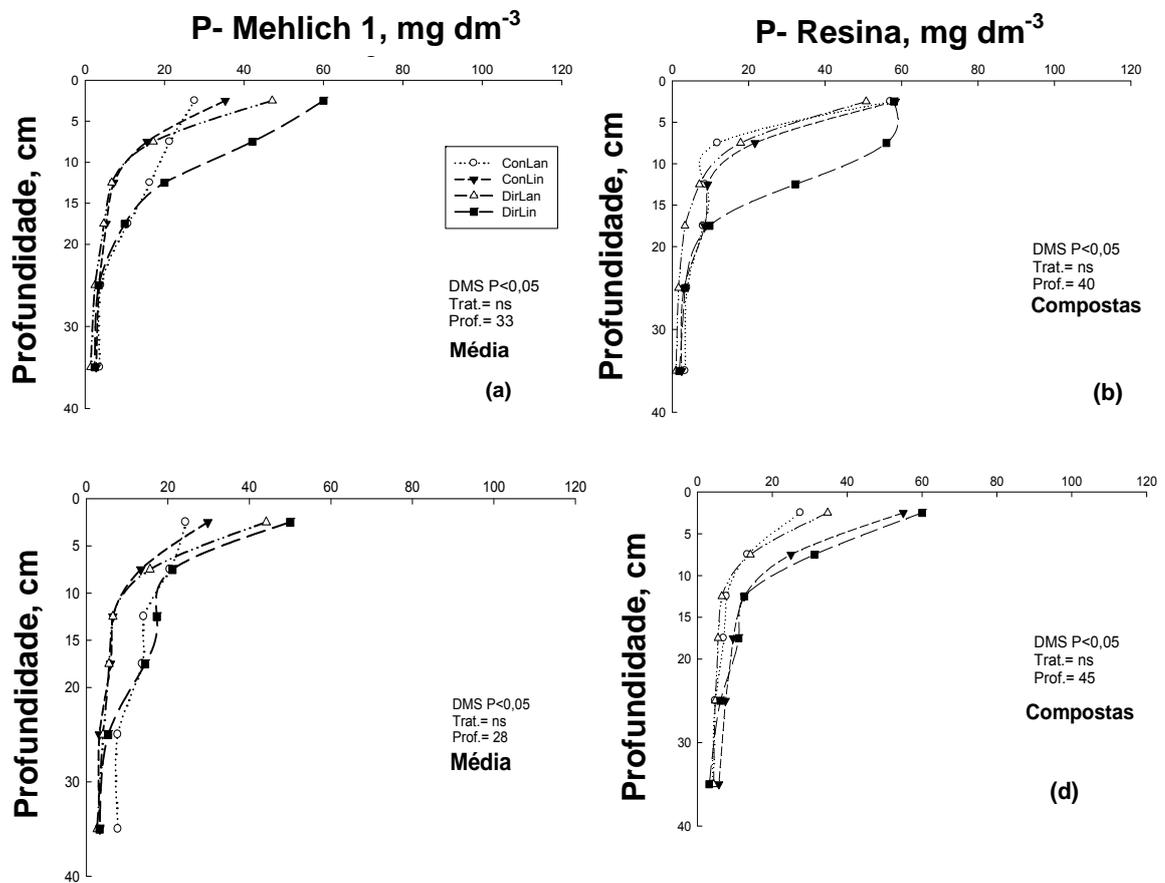


FIGURA 13. Valores de fósforo disponível (Mehlich 1 e Resina Iônica) obtido pela média de subamostras (a e c) e por amostras compostas (b e d) em função do sistema de manejo de um Argissolo Vermelho: convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan) e plantio direto – linha (Dir/Lin), no tempo.

A maior concentração de raízes no Dir/Lan (Figuras 10d e 11d) e o acúmulo de CO na camada mais superficial do solo, podem ter acarretado teores mais elevados de Po nesse manejo (Figura 14). Aumentos nos teores de P disponível, oriundo de formas orgânicas, nas camadas superficiais em solos conduzidos em plantio direto, em longo prazo, podem ser obtidos mesmo na ausência de fertilização fosfatada (Scheiner & Lavado, 1998). Desta forma, o comportamento semelhante entre as formas de P no plantio direto e convencional, independentemente do modo de aplicação do fertilizante fosfatado, podem ser oriundos dos efeitos de mineralização da MO, em função do revolvimento do solo. Tal comportamento é coerente, uma vez que o P está inserido em dois ciclos no solo, um inorgânico, controlado pelos processos

pedológicos, e outro biológico, o qual é controlado pela inter-relação planta-microbiota (Tate & Salcedo, 1988).

Sendo assim, percebe-se que há uma estreita relação entre o Po e a relação CO:Po (Sá 1994). Neste sentido, o revolvimento do solo e conseqüentemente, a distribuição mais homogênea da MO no perfil do solo, explicam os teores mais elevados de Po na camada de 15-20 nos sistemas Con/Lin e Con/Lan, respectivamente (Figura 12 b).

O efeito dos tratamentos no Pt no solo também foi observado até a profundidade de 20 cm (Figura 12c). O sistema Dir/Lin e Dir/Lan apresentaram teores de Pt mais elevados na camada de 0-5 cm, com o Dir/Lin sendo também mais elevado até 15 cm enquanto o Con/Lan foi maior na camada de 15-20 cm. Teores mais elevados em solos sob plantio direto, na sua camada superficial, foram obtidos por Selles et al. (1999), Essinton & Howard (2000) e Rheinheimer & Anghinoni (2001). Neste âmbito, fatores como o não revolvimento do solo, a contínua reciclagem dos resíduos nas camadas superficiais paralelamente às reações de adsorção e ao efeito de diluição contribuem segundo Sá (1999) para elevados teores de Pt nesse sistema.

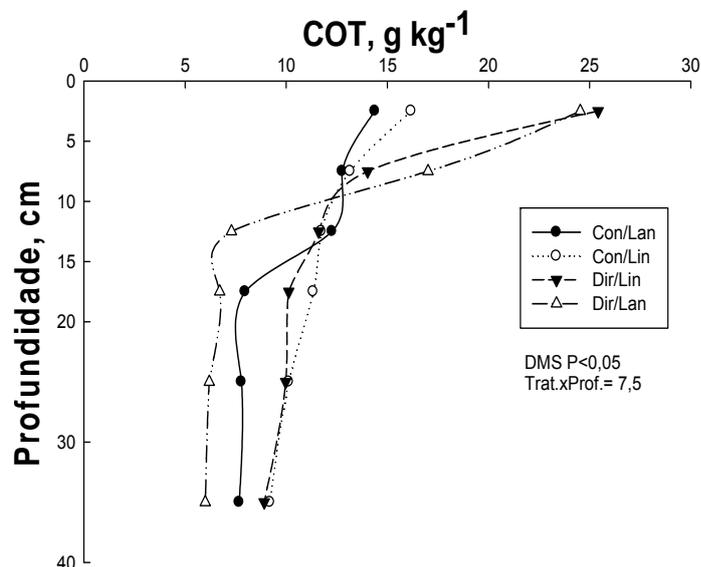


FIGURA 14. Distribuição do carbono orgânico total (COT) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional – lanço (Con/Lan), convencional – linha (Con/Lin), plantio direto – lanço (Dir/Lan) e plantio direto – linha (Dir/Lin), no tempo, safra 2006/07 (Valores de duas repetições).

Porém, este aumento no teor de Pt no solo é discutível, visto que as entradas (adição de resíduos+fertilização) e as saídas (exportação de P via grãos) observadas para os sistemas de manejo em discussão têm sido semelhantes. Uma explicação plausível poderia ser dada se houvesse uma diferença nos teores de Pt entre o sistema Dir e Con nas camadas inferiores de modo a haver compensação entre as camadas, o que não ocorreu no presente estudo. Embora, possa ser observada uma tendência de valores mais elevados de Pt ($P > 0,05$) nos sistemas Con/Lan e Con/Lin, a magnitude desses valores é insuficiente para explicar a maior quantidade de P no sistema Dir.

Neste sentido, parece que nos sistemas Dir/Lin e Dir/Lan ocorre uma certa redistribuição do P, que estaria sendo retirado de camadas mais profundas e depositado nas camadas mais superficiais do solo. Isto, de fato, ao longo do tempo, ocorre em sistemas conservacionistas, em um processo denominado de *minação* (Zibilske et al., 2002).

Algumas explicações para o menor teor de P nos sistemas Con/Lin e Con/Lan podem ser levantadas primeiramente, pelo gradiente desse nutriente no solo neste sistema (Figura 9), que, somado à menor agregação (Figura 5), e menores teores de CO na camada superficial (Figura 6) podem contribuir para perdas de P por processos erosivos (enxurrada) (Andraski et al., 2003). Outro ponto a ser salientado, é o maior aprofundamento radicular, principalmente da cultura do milho, podendo chegar até a 1 m de profundidade (Qin, 2005), que estaria extraindo um P não contabilizado, uma vez que ocorre maior aprofundamento das raízes ao longo do tempo no presente estudo (Figura 11).

A complexidade no entendimento da labilidade do Po no solo em função da diversidade química dessa fração (Brookes et al., 1984), em paralelo à dificuldade na detecção do acúmulo do Po e Pi em sistemas com elevado aporte de resíduos (Beck & Sanchez, 2004), têm resultado no uso mais freqüente da relação Po/Pt para avaliação da distribuição das formas de P no perfil do solo. No presente trabalho, os sistemas de manejo influenciaram na relação Po/Pt em todas as profundidades avaliadas (Figura 12d). Os valores verificados foram, de modo geral, mais elevados em relação ao trabalho realizado por Rheiheimer & Anghinoni (2003) em um solo semelhante. Essa relação (Po/Pt) foi menor no Dir/Lin até a profundidade de 20 cm em relação os

demais sistemas, destacando o comportamento semelhante do CO no perfil do solo para o mesmo tratamento (Figura 14).

Os teores elevados de Pi no Dir/Lin, especialmente até a profundidade de 20 cm (Figura 9d), dão suporte à baixa percentagem de Po verificada. Dessa forma, a relação Po/Pt nos solos sob sistema plantio direto parece estar sendo controlada pelo gradiente do Pi (Figuras 9d e 13) no perfil do solo. Todavia, percebe-se haver uma tendência de aumento maior na relação Po/Pt no Dir/Lin em profundidade em relação aos demais sistemas. Tal comportamento pode estar ocorrendo em função da redistribuição radicular nesse sistema, no tempo (Figuras 10 e 11).

O decréscimo da fração inorgânica de P em maior magnitude em relação à orgânica foi levantado por Anghinoni (2007). Por outro lado, a cultura do milho, possuidora de um sistema radicular fasciculado, em sistemas com cobertura permanente do solo com novos componentes de variação como galeria de minhocas e ninhos de formigas (Hamblim, 1985), pode estar proporcionando uma distribuição mais homogênea de P, pela redistribuição radicular, no perfil do solo (Figura 11b).

Os valores mais elevados de Po e da relação Po/Pt em profundidade nos sistemas Dir/Lin e Dir/Lan, em relação aos obtidos por Rheinheimer & Anghinoni (2003) em outro experimento, no mesmo solo, cinco anos atrás, chamam a atenção quanto ao acúmulo do Po nesse sistema no tempo e à possível mobilidade desse nutriente nessa forma. Quando o P se concentra na forma orgânica, pode ocorrer a liberação de compostos orgânicos de diferentes pesos moleculares (Hue et al., 1986) que, com o movimento descendente de água e em uma porosidade contínua e permanente, estará susceptível a ser deslocado ao longo do perfil do solo.

5.3.2. Potássio

O efeito do tempo na distribuição de K (Mehlich 1) no solo dos sistemas de manejo é apresentado na Figura 15. Independentemente dos sistemas de manejo, foi observado uma interação entre ano e profundidade ($P < 0,05$), havendo, então, efeito dos anos nas profundidades analisadas.

De modo geral, foi verificada a estratificação de K no solo em todos os sistemas de manejo do solo, sendo que esse nutriente ao longo dos 18 anos

de cultivo se acumulou, principalmente, na camada de 0-10 cm (Figura 15). Após 18 anos, independentemente do sistema de manejo, os teores de K, eram semelhantes na profundidade de 40 cm (em torno de 50 mg dm^{-3}) e se encontram muito acima do nível crítico, na média da camada de 0-20 cm, de 60 mg dm^{-3} (CQFS RS/SC, 2004).

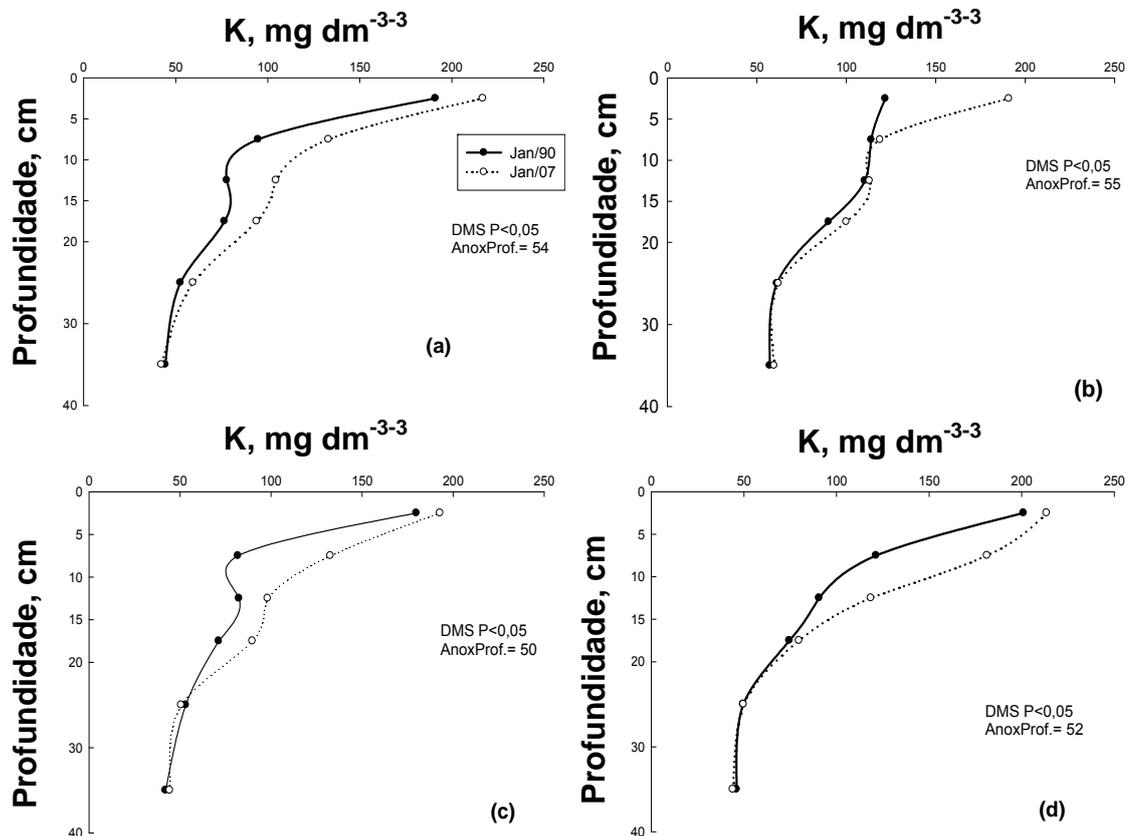


FIGURA 15. Distribuição de potássio (Mehlich 1) no perfil de um Argissolo Vermelho em função do sistema de manejo: convencional - lanço(Con/Lan) (a), convencional - linha (Con/Lin) (b), Plantio Direto – Lanço (Dir/Lan) (c) e Plantio Direto – Linha (Dir/Lin) (d), no tempo (Valores de duas repetições).

A estratificação do K no solo em diferentes sistemas de cultivo, em longo prazo, também foi verificada por Muzilli et al. (1983) e Eltz et al. (1989). O efeito do tempo na acumulação de K na camada de 5-10 (Figura 15) no Dir/Lin pode ser explicado pela própria incorporação desse nutriente aproximadamente a 8 cm de profundidade, no presente estudo. Segundo Lopes (2004) e Rehm & Lamb (2004) o próprio processo de semeadura e fertilização na linha de semeadura, no tempo, acarreta em incrementos nos teores desse nutriente nessa camada. Ainda, com relação ao Dir/Lan, possivelmente, a presença de um horizonte B textural no solo do presente estudo contruiu para a lixiviação

desse nutriente juntamente com os resíduos culturais (Duiker & Beegle, 2006) explicando os teores mais elevados na época de 2007 em relação a 1990 na camada de 5-10 cm. Em longo prazo, o constante aporte de resíduos que ocorre em solos sob plantio direto e, conseqüentemente, a melhoria da estrutura destes solos (Figura 6) aliado à maior quantidade de compostos hidrossolúveis presentes, podem alterar a mobilidade e, conseqüentemente, a dinâmica desse nutriente no perfil do solo (Pavan, 1997).

O acúmulo de K na camada de 0-5 cm em sistemas com revolvimento contínuo do solo, como ocorrido no Con/Lin foi observado por Hussain et al. (1999). No presente estudo, este comportamento pode ser explicado pela lavagem de K (Figuras 7 e 8) em paralelo às contínuas aplicações localizadas do fertilizante potássico na linha de semeadura. No entanto, as aplicações a lanço com incorporação do fertilizante (Con/Lan) resultaram, embora sem significância ($P > 0,05$), em uma menor estratificação do K no perfil do solo. Desta forma, a redistribuição desse elemento no perfil do solo, no tempo, parece ser influenciada pela incorporação do mesmo pelo manejo adotado (Macray et al., 1987; Wright, 2007).

O efeito dos sistemas de manejo, em longo prazo, aparenta contribuir para uma redistribuição desse nutriente no solo, pois, os incrementos de K no solo após 18 anos de cultivo, independentemente do manejo adotado, ocorreram até 15 cm (Duiker & Beegle, 2006) e que, a maior mobilidade do K em solos mais arenosos, parece contribuir grandemente na redistribuição desse nutriente no solo no tempo (Johnston, 2002).

5.4. Conclusões

O fósforo e o potássio se acumulam, de forma contínua no tempo e em profundidade independentemente do sistema de manejo do solo, sendo esse efeito mais evidenciado no fósforo.

O cultivo por longo tempo resulta no acúmulo de fósforo na camada de 0-5 cm, independentemente do sistema de manejo, sendo que este efeito ocorreu até a profundidade de 10 cm no sistema plantio direto com adubação em linha.

Os sistemas de manejo contribuem para a redistribuição das raízes no perfil do solo, com aumento, no tempo, da densidade radicular nas camadas mais profundas.

O fósforo se acumula com o tempo tanto na forma inorgânica como na orgânica, no sistema plantio direto, nas camadas mais superficiais, mas preferencialmente na forma inorgânica, atingindo a profundidade de 20 cm nesse sistema com adubação em linha.

Independentemente do sistema de manejo, ocorre aumento da relação fósforo orgânico/fósforo total em profundidade, sendo mais acentuada no sistema plantio direto com adubação em linha, à semelhança do carbono orgânico total e da distribuição de raízes no perfil do solo.

O cultivo com sistemas de manejo no tempo resulta, independentemente do manejo do solo e da adubação, na estratificação do potássio no perfil do solo, com acúmulo desse nutriente nas camadas superficiais.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Independentemente do manejo do solo e da adubação, ocorre acúmulo de fósforo e de potássio no tempo no perfil do solo, sendo mais evidenciado para o fósforo. Esse acúmulo desses nutrientes e de raízes de milho ocorre predominantemente na camada superficial, formando gradientes, e é diferenciado entre eles. A distribuição horizontal e vertical de fósforo no perfil do solo, por ser um nutriente pouco móvel, ocorre em função das proporções e das intensidades de mistura dos adubos com o solo resultantes do manejo do solo e da adubação. O acúmulo de fósforo no perfil do solo ocorre em ambas as formas, inorgânica e orgânica, mas predominantemente na forma inorgânica, atingindo até 20 cm de profundidade no sistema plantio direto com adubação em linha. O potássio, mesmo sendo móvel, tende a se concentrar mais na camada superficial do solo em plantio direto e aumenta em profundidade no preparo convencional, independentemente do modo de adubação. A distribuição de raízes, por sua vez, é mais relacionada com a distribuição de fósforo do que a de potássio, havendo redistribuição de ambos no tempo no perfil do solo, que se relacionam com a redistribuição do carbono orgânico do solo. Apesar do efeito do manejo do solo e da adubação na distribuição dos nutrientes estudados e de raízes no solo e na sua absorção pelas plantas, o rendimento de matéria seca e de grãos de milho não são afetados, provavelmente pelos teores no solo serem elevados, estando próximos ou acima do nível crítico para este Argissolo.

7. RECOMENDAÇÕES

Em virtude do gradiente de fósforo e potássio no perfil do solo no tempo há necessidade de se determinar melhor qual a camada a ser amostrada que represente o estado de disponibilidade de fósforo e potássio para a planta, inclusive levando-se em conta os efeitos de acumulação de fósforo nas camadas mais superficiais podendo acarretar em perdas por escoamento superficial causando impactos ambientais. Ainda, com relação ao potássio devido ao fenômeno de lavagem desse nutriente, um cuidado deve ser tomado com relação à época de amostragem do solo. Por fim, existe a necessidade de pesquisas para verificar a natureza dos compostos orgânicos solúveis formados e a sua mobilidade no perfil do solo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, C.L.; SHARMA, P.D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.32, p.291-302, 1994.
- ACQUAYE, D.K. Some significance organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. **Plant and soil**, Dordrecht, v.19, p.65-80, 1963.
- ADISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, p.161-168, 1995.
- ADISCOTT, T.M.; THOMAS, D. Tillage, mineralization and leaching: phosphate. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v.53, p.255-273, 2000.
- ALMEIDA, J.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; JÚNIOR, W.A.Z. Propriedades de um Cambissolo húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.437-445, 2005.
- AMOS, B.; WALTERS, D.T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon: An analysis of the literature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, n.5, p.1489-1503, 2006.
- ANDRASKI, T.W.; BUNDY, L.G.; KILIAN, K.C. Manure history and long-term effects on soil properties and phosphorus losses in runoff. **Journal of environmental quality**, Madison, v.32, p.1782-1789, 2003.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L.. (Org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1, p.873-928.
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, p.537-562. 2004.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração do solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.349-353, 1992.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.1041-1044, 1980.

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. **Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP sobre sistema radicular: metodologias e estudo de casos.** Aracaju: EMBRAPA - Tabuleiros costeiros, 1999. p.57-88.

BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C.; SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.45, p.237-249, 1998.

BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Baltimore, v.93, p.39-49, 1962.

BARBER, S.A. Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. **Agronomy Journal**, Madison, v.63, p.721-726, 1971.

BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability.** New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo com ênfase na matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.867-694, 1999.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L. Plantio direto aumenta a matéria orgânica do solo e contribui para a remoção do CO₂ atmosférico na região tropical do Cerrado brasileiro. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.55, p.19-21, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.105-112, 1997.

BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.184, p.23-31, 2004.

BELCHER, C.R.; RAGLAND, J.L. Phosphorus adsorption by sodplanted corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.754-756, 1972.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root response to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v.57, p.437-447, 2006.

BERTOL, I.; LEITE, D.; ZOLDAN JR., W.A. Decomposição do resíduo de milho e variáveis relacionadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.369-375, 2004.

BEVILAQUA, G.A.P.; BROCH, D.L.; POSSENTI, J.C.; VILLELA, F.A. Posição do fósforo e potássio na adubação da semente e no crescimento de plântulas de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Passo Fundo, v.2, n.2, p.87-92, 1996.

BLAIR, G.J.; BOLAND, O.W. The release of phosphorus from plant material added to soil. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.16, p.101-111, 1978.

BLEVINS, D.G. Why plants need phosphorus. **Better Crops**, Norcross, Georgia, v.83, n.2, p.29-30, 1999.

BORDOLI, J.M.; MALLARINO, A.P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, p.27-33, 1998.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BRASIL, E.C.; ALVES, V.M.C.; MARRIEL, I.E.; PITTA, G.V.E.; CARVALHO, J.G. Matéria seca e acúmulo de nutrientes em genótipos de milho contrastantes quanto a aquisição de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, p.704-712, 2007.

BRAVO, C.A.; GIRALDEZ, J.V.; ORDONEZ, R.; GONZALEZ, P.; PEREA, F. Long-term influence of conservation tillage on chemical properties of surface horizon and legume crops yield in a Vertisol of southern Spain. **Soil Science**, Baltimore, v.172, p.141-148, 2007.

BROCH, D.L.; FERNANDES, C.H. **Efeito do adubo aplicado no sulco de plantio no estabelecimento do milho safrinha**: Resultado de Pesquisa e Experimentação. Maracaju : Fundação MS, 1999. p.22-23.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.16, p.169-175, 1984.

BROWN, R. **Evaluating residual value of band applied fertilizer phosphorus**. Kansas: Kansas State University, 1996. 134f. Ph. D. (Tese) - . Kansas State University, Kansas, 1996..

BUCHANAN, M.; KING, L.D. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residues in non-till and conventional till agrosystems. **Agronomy Journal**, Madison, v.85, p.631-638, 1993.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisas de Potassa e do Fosfato, 1993. p.63-145.

BUSMAN, L.; LAMB, J.; RANDALL, G.; REHM, G.; SCHMITT, M. **The nature of phosphorus in soils**. Disponível em: <http://134.84.92.126/distribution/cropsystems/DC6795.html>. Acesso em: 10/02/2007.

BYERS, C. **Phosphorus, potassium and micronutrients stratification in long-term no-till soils**. Disponível em: <http://a-c-s.confex.com/a-c-s/2007am/techprogram/P36335.HTM>. Acesso em: 12/02/2007.

CALEGARI, A.; HARGOVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALICH, R.; TESSIER, D.; DeTOURDONNET, S.; DeFATIMA GUIMARÃES, M. Impact of long-term no-tillage and crop system managements on soil organic carbon in an Oxisol: A model for sustainability. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, p.1013-1019, 2008.

CANNELL, R.Q.; HAWES, J.D. Trends in tillage practices in relation to sustainable crop productions with special reference to temperate climates. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.30, p.245-282.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. (Ed.). **Tecnologias de produção do milho: economia, cultivares, biotecnologia, safrinha, adubação, quimigação, doenças, plantas daninhas e pragas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. p.139-182.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de MO, P, K, e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.394-400, 2007.

CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; PAVINATO, A. Manejo da adubação. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1, p.851-872.

CHASSOT, A.P.; STAMP, P.; RICHNER, W. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.231, p.123-135, 2001.

CHOUDHURY, F.N.; MELLO, C.A. de O.; MORGADO, L.B. **Preparo do solo e adubação residual na cultura do milho em áreas irrigadas**. Petrolina: EMBRAPA- CPATSA, 1991, 21p. (Boletim de pesquisa, 40).

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; AÇBUQUERQUE, J.A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.1055-1064, 2002.

COELHO, A.M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T. ; ROBERTS, T.L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p.613-658.

COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Piracicaba, 2004. Piracicaba, 2004. p.243-283.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBSC - Núcleo Regional Sul, 2004.

COREY, A.T.; BROOKS, R.H. Drainage characteristics of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.39, p.251-255, 1975.

COWIE, B.A.; HASTIE, M.; HUNT, S.B.; ASGHAR, M.; LACK, D.W. Surface soil nutrient distribution following zero tillage and traditional tillage management. [Proceedings of] **The Australian Society of Agronomy**. 1996. Disponível em: www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/160cowie.htm. Acesso em: 10/02/2008

CRUZ, A.C.R.; PAULETO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1105-1112, 2003.

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

DeMARIA, I.C.; NNABUDE, P.C.; CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.51, p.71-79, 1999.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant Soil**, Dordrecht, v.98, p.303-312, 1987.

DÍAZ-ZORITA, M.; GROVE, J.H. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.66, p.165-174, 2002.

DUIKER, S.W.; BEEGLE, D.B.; Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.88, p.30-41, 2006.

DuPREEZ, C.C.; STEYN, J.T.; KOTZE, E. Long-term effects of wheat residue management on some fertility indicators of a semi-arid Plinthosol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.63, p.25-33, 2001.

DWYER, L.W.; MA, B.L.; STEWART, D.W.; HAYHOE, H.N.; BALCHIN, D.; CULLEY, J.L.B.; McGOVERN, M. Root mass distribution under conventional and conservation tillage. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.76, p.23-28, 1996.

ECKERT, D.C.; JOHNSON, J.W. Phosphorus Fertilization in No-Tillage Corn Production. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, p.789-792, 1985.

EGHBALL, R.; SANDERS, D.H.; SKOPP, J. Phosphorus rate affects phosphorus movement. **Fluid Journal**, Indiana, Fall, p.1-2, 1995.

ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo de solo nas características físicas e químicas de um Latossolo bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.259-267, 1989.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

ENGELS, C.; MOLLENKOPF, M.; MARSCHNER, H. Effect of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths. **Zeith Pflanz, Bodenk**, v.157, p.139-144, 1994.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas (princípios e perspectivas)**. Londrina: Planta, 2006. 401p.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J.A.; CASSOL, P.C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, nota científica, Viçosa, v.31, p.393-402, 2007.

ESSINGTON, M.E.; HOWARD, D.D. Phosphorus availability and speciation in long-term no-till and disk-till soil. **Soil Science**, Baltimore, v.165, p.144-152, 2000.

FAGUNDES, J.L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1097-1104, 2003.

FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A.; FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

FEBRAPDP. **Expansão do sistema plantio direto em território nacional**. Disponível em: <http://www.febrapdp.com.br/>. Acesso em: 05/06/2008

FOX, R.L.; KANG, B.T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate on maize nutrition. **Soil Science**, Baltimore, v.125, p.34-40, 1978.

FRANCHINI, J.C.; BORKERT, C.M.; FERREIRA, M.M.; GAUDÊNCIO, C.A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, nota científica, Viçosa, v.24, p.459-467, 2000.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.627-636, 2007.

GILL, K.S.; GAJRI, P.R.; CHOUDHARY, J. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.39, p.213-227, 1996.

GOSS, M.J.; BARRACLOUGH, P.B.; POWELL, B.A. The extent to which physical factors in the rooting zone limit crop growth. **Aspects of Applied Biology**, Warwick, UK, v.22, p.173-181, 1989.

GRANT, C.A.; FALTEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações agropecuárias**, Piracicaba, n. 95, p.1-5, 2001.

GREGORY, P. **Plant roots- growth, activity and interaction with soils.** Oxford: Blackwell Publishing, 2006. 318 p.

GUERRA, J.G.M. **Produção sazonal de *Brachiaria decumbens* STAPP. , conteúdo de fósforo orgânico e microbiano em solos tropicais de baixa fertilidade natural.** Rio de Janeiro: UFRRJ, 1993. 234f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

HABIBI, M.A. SCHUMACHER, T.E. Phosphorus effects on root growth and development in two maize genotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.158, p.39-46, 1994.

HANWAY, J.J. Corn growth and composition in relation to soil fertility. II. Uptake of nitrogen, phosphorus and potassium and their distribution in different plant parts during the growing season. **Agronomy Journal**, Madison, v.54, p.145-148, 1962.

HARGROVE, W.L. Influence of tillage on nutrient uptake and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, p.763-768, 1985.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil Fertility and Fertilizers.** 7 ed. Nova York: Macmillan, 2005. 515p.

HECKMAN, J.R. **Soil Fertility Test Interpretation:** Phosphorus, Potassium, Magnesium and Calcium. RUTGERS, The State University of New Jersey, New Brunswick, 2007. Disponível em: <http://www.rce.Rutgers.edu/>. Acesso em: 20/02/2007.

HECKMAN, J.R.; SIMS, J.T.; BEEGLE, D.B.; COALE, F.J.; HERBERT, S.J.; BRUULSEMA, T.W. Phosphorus and potassium removal in corn. **Better Crops**, Norcross, v.85, p.4-6, n.1, 2001.

HERRERA, J.M.; STAMP, P.; LIEDGENS, M. Interannual variability in root growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) at low and high nitrogen supply. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.26, p.317-326, 2006.

HOLANDA, F.S.R.; MENGEL, D.B.; PAULA, M.B.; CARVADO, J.G.; BERTONI, J.C. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in soil profile. **Communication of Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, p.2383–2394, 1998.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.77-85, 2006.

HOUNTIN, J.A.; COUILLARD, D.; KARAM, A. Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents in maize plots after 14 years of pig slurry applications. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.129, p.187-191, 1997.

HOWARD, D.D.; MULLEN, M.D.; ESSINGTON, M.E. Assessing nutrients stratification within a long-term no-tillage corn soil. In: ANNUAL SOUTHERN CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE FOR SUSTAINABLE

AGRICULTURE, 21., 1998, Arkansas. **Proceedings...** Arkansas: Arkansas agriculture experiment station, 1998.

HOWARD, D.D.; TYLER, D.D. Comparison of surface applied rates of phosphorus and potassium and in-furrow fertilizer solution combinations for no-till corn production. **Journal of Fertility Issues**, London, v.4, p.48-52, 1987.

HUGHES, K.A.; HORNE, D.J.; ROSS, C.W.; JULIAN, J.F. A 10-year maize/oat rotation under three tillage systems:2. Plant population, root distribution and forage yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.22, p.145-157, 1992.

HUSSAIN, I.; OLSON, K.R. EBELHAR, S.A. Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1335-1341, 1999.

ISHAQ,M.; IBRAHIM,M.; LAL, R. Tillage and fertilizer effects on root growth of wheat and cotton on a sandy clay loam in Pakistan. **Journal of Sustainable Agriculture**, New York, v.22, p.43-57, 2003.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58 ,p.193-198, 1994.

JOHNSTON, A.M. Fertility issues and long-term no-till. Direct seeding advantage- Reduced Tillage Linkages. **Proceedings of Alberta Reduced Tillage Linkages**. Alberta, 2002. p. 1-7.

KAMH, M.; HORST, W.J.; AMER, F.; MOSTAFA, H.; MAIER, P. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.211, p.19-27, 1999.

KANSAS STATE UNIVERSITY. **Phosphorus facts, soil, plant and fertilizer**. Disponível em: <http://www.oznet.ksu.edu/library/crpsl2/c665.pdf>. Acesso em: 19/02/2007

KARLEN, D.L.; FLANNERY, R.L.; SADLER, E.J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.80, p.232-242, 1988.

KAYSER, M.; ISSELSTEIN, J. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. **Grass and Forage Science**, New York, v.60, p.213-224, 2005.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In.: BLACK, C. A. (Ed). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510,

KETCHESON, W.J. Effect of tillage on fertilizer requirements for corn on a silt loam soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, p.540-542, 1980.

KHAMIS, S.; CHAILLOU, S.; LAMAZE, T. CO₂ assimilation and portioning of carbon in maize plants deprived of orthophosphate. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.41, p.19-25, 1990.

KILMER, V.J.; YOUNTS, S.E.; BRADY, N.C. (Ed.). **The role of potassium in agriculture**. Wisconsin: American Society of Agronomy : Crop Science Society of America : Soil Science Society of America Journal, 1968. 508 p.

KIST, S. L. **Suprimento de potássio em Argissolo com histórico**. 2005. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

KLEPKER, D. **Distribuição de fósforo e de raízes no solo e sua relação com o estresse hídrico e o crescimento de milho**. 1996. 178f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

KLEPKER, D. **Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação**. 1991. 117f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.395-401, 1995.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agriculture Science)**, Madison, v.1, p.111-115, 1993.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F. Principais fatores que interferem no crescimento radicular das culturas anuais, com ênfase no potássio. **Potafos Informes Agronômicos**, Piracicaba, n.203, 2003.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Adubação profunda no sistema plantio direto. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE E MICROBIOLOGIA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 3., 1999, Passo Fundo, RS. **Resumos de palestras: fertilidade do solo em plantio direto**. Passo Fundo, RS, 1999. p.67-69.

KOSUTIC,S.; FILIPOVIC, D.; GOSPODARIC, Z.; HUSNJAK, S.; KOVACEC,I.; COPEC, K. Effects of different soil tillage systems on yield of maize, winter wheat and soybean on albic luvisol in north-west Slavonia. **Journal of Central European Agriculture**, Praga, v.3, p.241-248, 2005.

KOVAR, J.L.; BARBER, S.A.; KLADIVKO, E.J.; GRIFFITH, D.R. Characterization of soil temperature, water content, and maize root distribution in two tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.24, p.11-27, 1992.

LANDERS, J. How and why the Brazilian Zero Tillage Explosion Occurred. In: SCOTT, D.E.; MOHTAR, R.H.; STEINHARDT, G.C. **Sustaining and Global Farm**. Madison: Soil Science Society of America, 1999.p.29-39.

LARSON, W.E.; HANWAY, J.J. Corn production. In: Sprague, G.F. (Ed.) **Corn and corn improvement**. Madison: American Society of Agronomy, 1977. 878p.

LAURINGSON, E.; TALGRE, L.; ROOSTALU, H.; VIPPER, H. The effect of tillage and crop rotation on the content of available nitrogen, phosphorus and potassium. **Agronomy Research**, Madison, v.1, p.63-70, 2004.

LIVESLEY, S.J.; STACEY, C.L.; GREGORY, P.J.; BURESH, R.J. Sieve size effects on root length and biomass measurements of maize (*Zea mays*) and *Grevillea robusta*. **Plant Soil**, Dordrecht, v.207, p.183-193, 1999.

LOPES, A.S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo : Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 110p.

LUPWAYI, N.Z.; CLAYTON, G.W.; HARKER, K.N.; TURKINGTON, T.K.; JOHNSTON, A.M. Impact of crop residue type on potassium release. **Better Crops**, Norecross, Georgia, v.89, n.3, p.14-15, 2005.

MACKAY, A.D.; KLADIVKO, E.J.; BARBER, S.A.; GRIFFITH, D.R. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.970-974, 1987.

MACRAY, A.D.; KLADIVKO, E.J.; BARBER, S.A.; GRIFFITH, D.R. Phosphorus and potassium uptake by corn in conservation tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.970-974, 1987.

MALLARINO, A.P. Manejo de fósforo e potássio y starters para maíz y soya en siembra directa. In: CONGRESSO NACIONAL DE AAPRESID, 5., 1997, Mar del Plata. **Conferencias...** [S.I.], 1997. p.11-19.

MALLARINO, A.P.; BORGES, R. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.702-707, 2006.

MARCOLAN, A.L. **Atributos químicos de um argissolo e rendimento de culturas em função do seu revolvimento na reaplicação de calcário no sistema plantio direto**. 2002. 76f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.163-170, 2006.

MARIA, I.C.; CARMO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.471-477, 1999.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

MELLO IVO, W.M.P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.135-143, 1999.

MERRILL, S.D.; TANAKA, D.L.; HANSON, J.D. Root length growth of eight crop species in haplustoll soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.913-923, 2002.

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de prepare de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, p.369-374, 1991.

MEURER, E.J.; KAMPF, N.; ANGHINONI, I. Fontes potenciais de potássio em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.41-47, 1996.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba : Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p.165-178.

MIRANDA, F.R. de; FREITAS, J.A.D. de; MONTENEGRO, A.A.T.; CRISÓSTOMO, L.A. **Distribuição das raízes do coqueiro-anão verde para o manejo da irrigação e aplicação de fertilizantes**. Fortaleza: EMBRAPA, 2003. (Circular Técnica, 16)

MODEL, N. **Rendimento de milho e aveia e propriedades do solo relacionados ao modo de aplicação de fósforo e potássio e técnicas de preparo do solo**. 1990. 115f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Respostas do milho a modos e técnicas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.16, p.55-59, 1992.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and intrepretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.562-564, 1982.

MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Maize root system growth and development as influenced by phophorus deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.50, n.50, p.487-497, 1999.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras : Editora da UFLA, 2006. 729p.

MOTTA, A.C.V.; NICK, J.A.; YORINORI, G.T.; SERRAT, B.M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. **Acta Scientia Agronômica**, Brasília, v.28, p.455-463, 2006.

MURDOCK, L.L.; HERBEK, J.; MARTIN, J.; JAMES, J.; JAMES, D. C. 2000. **Yield potential and long term effects of no-tillage on wheat production**. Disponível em: <http://www.org/research/notillyield.html>. Acesso em: 13/02/2007

MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.95-102, 1983.

NELSON, W.L. Plant factors affecting potassium availability and uptake. In: KILMER, V.J.; YOUNTS, S.E.; BRADY, N.C. (Ed.). **The role of potassium in agriculture**. Wisconsin: American Society of Agronomy : Crop Science Society : American Society of Agronomy : Soil Science Society of America Journal, 1968. p.355-380.

NICOLODI, M. **Evolução da noção da fertilidade e sua percepção como uma propriedade emergente do sistema solo**. 2007. 140f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NICOULLAUD, B.; KING, D.; TARDIEU, F. Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.159, p.245-254, 1994.

NORTH Carolina growers since 1940. soil fertility note 16 (gearing up for conservation tillage). February, 1995. Disponível em: <http://www.ncagr.com/agronomi>. Acesso em: 19/04/2008

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L.. (Org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1, 1129 p.

OLIVEIRA, M.R.G.; NOORDWIJK, M. van.; GAZE, S.R.; BROUWER, G. Auger sampling, ingrowth cores, and pinboard methods, p.175-210, In: SMITH, A.L. et al (ed.) **Root methods: A handbook**. Berlin : Springer-Verlag, 2000.

OLNESS, A.; BENOIT, G.R. A closer look at corn nutrient demand. **Better Crops**, Norecross, Georgia, Spring, p.18-20, 1992.

OPOKU, G.; VYN, T.J.; SWANTON, C.J. Modified no-till systems for corn following wheat on clay soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, p.549-556, 1997.

PAULETTI, V.; LIMA, M.R.; BARCIK, C.; BITTENCOURT, A. Evolução nos atributos químicos de um Latossolo vermelho sob diferentes métodos de preparo do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, n.2, 2000, Santa Maria. **Anais....** Santa Maria, RS, 2000.

PAVAN, M.A. Ciclagem de nutrientes e mobilidade de íons no solo sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, p.4-7, 1997.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: época e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.1779-1784, 2004.

PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo.** 1985. 92f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

PETERSEN, M. **Tillage and root development in corn – Is there a connection?** Disponível em: http://www.precisiantillage.com/assets/uploads/tillage_root%20development%20article.pdf/. Acesso em: 20/02/2007.

PIERCE, F.J.; FORTIN, M.C.; STATON, M.J. Periodic plowing effects on soil properties in a no-till plowing system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1782-1787, 1994.

PIETOLA, L.M. Root growth dynamics of spring cereals with discontinuation on mouldboard ploughing. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.80, p.103-114, 2005.

PINTON, R.; VARANINI, Z.; PAOLO, N. (Eds.). **The Rhizosphere-biochemistry and organic substances at the soil-plant interface.** 2ed. Boca Raton: CRC press, 2007. 447p.

QIN, R.; STAMP, P.; WALTER, R. Impact of tillage and banded starter fertilizer on maize root growth in the top 25 centimeters of the soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.674-683, 2005.

RANDALL, G.W.; EVANS, S.D.; IRAGAVARAPU, T.K. Long-term P and K applications: II. Effect on corn and soybean yields and plant and K concentrations. **Journal of Production in Agriculture**, Madison, v.10, p.572-580, 1997.

RANDALL, G.W.; HOEFT, R.G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Production in Agriculture**, Madison, v.1, p.70-79, 1988.

RASMUSSEN, K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.3-14, 1999.

REHM, G.W.; LAMB, J.A. Impact of banded potassium on crop yield and soil potassium in ridge-till planting. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.629-636, 2004.

RESENDE, A.V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado.** Lavras : UFLA, 2004. 169f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

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

RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos.** 2000. 210f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do

Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, Luciano Colpo. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v.33, n.6, p.1053-1059, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G.C. E SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos do solo arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.713-721, 1998.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G.C.; SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.713-721, 1998.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.355-362, 2003a.

ROSOLEM, C.A.; ESTEVES, J.A.F.; SILVA, R.H. Significance of mass flow and diffusion in supplying K to cotton root as affected by liming and K rates. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERCATIONS AT LOW pH., Johannesburg, South Africa, 2001. **Programme**. Johannesburg, África do Sul, 2001. p.48.

ROSOLEM, C.A.; MATEUS, G.P.; GODOY, L.J.G.; FELTRAN, J.C.; BRANCALIAO, S.R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.875-884, 2003b.

ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSE, H.F.; MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v, 18, p.491-497, 1994.

ROSSATO, R.R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto**. Santa Maria : UFSM, 2004. 106f. Dissertação(Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

ROVIRA, A.D. Biology of the soil-root interface. In: HARLEY, J.L.; RUSSELL, R.S. (Ed.). **The soil root interface**. New York: Academic Press, 1979. p.145-160.

SÁ, J.C. **Comportamento de frações de fósforo e do carbono orgânico em um LE sob plantio direto**. Curitiba : UFPR, 1994. 133f. Dissertação(Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

SÁ, J.C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHEREME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E. e CARVALHO, J.G.(eds). **Inter-relação**

fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Lavras: SBCS, 1999. p.267-319.

SALTON, J.C.; FABRICIO, A.C.; TIRIONI, C.; GANCEDO, M. **Cloreto de potássio na linha de semeadura pode causar danos a soja.** Dourados : Embrapa, 2002. (Comunicado Técnico, 64)

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.477-486, 2003.

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O.; KOCHANN, R.A. Rendimento de grãos de milho em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Passo Fundo, v.9, p.251-256, 2003.

SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Fontes, doses e métodos de aplicação de potássio no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Piracicaba, v.20, n.2, p.189-195, 1985.

SAUNDERS, W.M.H.; WILLIAMS, E.G. Observation on the determination of total organic phosphorus in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.6, p.254-267, 1955.

SCHEINER, J.D.; LAVADO, R.S. The role of fertilization on phosphorus stratification in no-till soils. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v.29, p.2705-2711, 1998.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.85-91, 2000a.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.611-617, 2000b.

SCHURMAN, J.J.; GOEDEWAAGEN, M.A.J. **Methods for the examination of root systems and roots.** Wageningen : Pudoc, 1965. 86p.

SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.44, p.23-34, 1998.

SHEAR, G.M.; MOSCHLER, W.W. Continuous corn by the no-tillage and conventional tillage method: A six-year comparison. **Agronomy Journal**, Madison, v.61, p.524-526, 1969.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v.4, n.3, p.289-302, 1981.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.9, p.249-254, 1985.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.313-319, 1997.

SILVA, J.E.; RITCHEY, K.D. Acumulação diferencial de potássio em oxissolos devido a lavagem do nutriente das plantas de milho para o solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.6, p.183-188, 1982.

SILVA, J.R.T.; MEURER, E.J. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.137-142, 1988.

SILVA, L.S. da. **Características químicas de um Latossolo nos sistemas plantio direto e convencional no primeiro ano**. 1996. 87f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVA, L.S.; BOHNEN, H. Relações entre nutrientes na fase sólida e solução de um Latossolo durante o primeiro ano nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1164-1171, 2006.

SILVA, M.A.G.; BOARETTO, A.E.; FERNANDES, H.G.; BOARETTO, R.; MELO, A.M.T. de.; SCIVITTARO, W.B. Características químicas de um latossolo adubado com uréia e cloreto de potássio em ambiente protegido. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, p.561-566, 2001.

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**, Viçosa, v.24, p.191-199, 2000.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A.T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.

SOUSA, D.M.G; VOLKWEISS, S.J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, p.133-140, 2008.

SOUZA, F.A.; CARVALHO, M.P.; BAUMGARTNER, J.G. Efeito de doses e de modos de aplicação de adubo na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cv. Santa Rosa. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, Londrina, 1979. **Anais...** Londrina, PR, 1979. p.229-234.

STECKER, J.A.; BROWN, J.R.; KITCHEN, N.R. Residual phosphorus distribution and sorption in starter fertilizer bands applied in no-till culture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.1173-1183, 2001.

TATE, K.R.; SALCEDO, I.H. Phosphorus control of soil organic matter accumulation and cycling. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.5, p.99-107, 1988.

TAYLOR, H.M. Managing root systems for efficient water use: An overview. In: TAYLOR, H.M.; JORDAN, W.R. SINCLAIR, T.R. (Eds.), **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison : ASA-CSSA-SSSA, 1983. p.87-113.

TEBRÜGGE, F.; DÜRING, R.A. Reducing tillage intensity- a review of results from a long-term study in Germany. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.15-28, 1999.

TEDESCO J. M.; GIANELLO C.; BISSANI C. A.; BOHNEM H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995-2. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TENNANT, D. A teste f a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.63, p.995-1001, 1975.

UNGER,P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A Review. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p.759-766, 1994.

VADAS, P.A.; MALLARINO, A.P.; MCFARLAND, A. **The importance of sampling depth when testing soils for their potential to supply phosphorus to surface runoff**. Disponível em: http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/Soil_Sampling_Depth_for_P.pdf. Acesso em: 12/04/2008

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

VASELLATI, V.; OESTERHELDS, M.; MEDAN,D.; LORETIM, J. Effects of flooding and drought on the anatomy of *Paspalum dilatatum*. **Annals of Botany**, Oxford, v.88, p.355-360, 2001.

VEENSTRA, J.J.; HORWATH, W.R.; MITCHELL, J.P.; MUNK, D.S. Conservation tillage and cover cropping influence soil properties in San Joaquin Valley cotton-tomato crop. **California Agriculture**, San Joaquin, v.60, p.146-153, 2006.

VENZKE FILHO, S.P. de.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C. de.; FANTE JR, L.; SIQUEIRA NETO, M.; CERRI, C.C. Root systems and soil biomass under no-tillage system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.61, n.5p.529-537, 2004.

VYN, T.J.; BALL, B.J. **Spatial response of maize to conservation tillage and potassium placement on variable soils**. Disponível em: http://www.agry.purdue.edu/kteam_index.asp/. Acesso em: 22/03/2007.

VYN, T.J.; JANOVICEK, K.J. Potassium placement and tillage system effects on corn response following long-term no till. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.487-495, 2001.

VYN, T.J.; RAIMBAULT, B.A. Evaluation of strip tillages systems for corn production in Ontario. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.23, p.163-176, 1992.

WIESLER, F.; HORST, W.J. Root growth of maize cultivars under Field conditions as studied by the core and minirhizotron method and relationships to shoot growth. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Berlin, v.157, p.351-358, 1994.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000, Santa Maria. **FertBio 2000**: biodinâmica do solo. Santa Maria, 2000. CD ROM

WILHELM, N.; WHITE, J. Potassium responses observed in south Australian cereals. **Better Crops**, Norcross, v.88, n.1, p.28-31, 2004.

WRIGHT, A.L.; HONS, F.M.; LEMON, R.G.; McFARLAND, M.L.; NICHOLS, R.L. Stratification of nutrients in soil for different tillage regimes and cotton rotations. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.96, p.19-27, 2007.

YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Ed.) **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. 841p.

YIN, X.; VYN, T.J. Residual effects of potassium placement and tillage systems for corn on subsequent no-till soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, p.1112-1119, 2002.

ZERKOUNE, M.A. **Residual P from single and repeated bands in no-till systems as evaluated by crop response and sampling strategies**. Lincoln : University of Nebraska, 1996. Ph. D. (Tese) - University of Nebraska, Lincoln, NE, 1996.

ZIBILSKE, L.M.; BRADFORD, J.M.; SMART, J.R. Conservation tillage induced changes in soil organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.66, p.153-163, 2002.

9. APÊNDICES

Apêndice 1. Teores de P e K no tecido do milho, no início de enchimento de grãos, em sistemas de manejo do solo e da adubação em um Argissolo Vermelho. EEA/UFRGS - safra 2006/07.

Manejo	Repetição	Fósforo	Potássio
		-----g kg ⁻¹ -----	

Con/Lan	1	4,2	15,9
	2	3,8	14,3
	3	3,5	15,0
Dir/Lan	1	3,8	17,0
	2	3,7	17,6
	3	3,4	17,1
Con/Lin	2	3,1	14,8
	3	3,3	15,9
	3	3,0	14,5
Dir/Lin	1	3,4	17,6
	2	3,2	18,1
	3	3,3	18,0
Con/ Fx	1	3,4	18,7
	2	3,0	16,5
	3	3,2	16,4
Fx/Fx	1	3,2	21,4
	2	3,3	20,3
	3	3,0	20,5

Apêndice 2. Teores de P e K no tecido do milho, no início de enchimento de grãos, em sistemas de manejo do solo e da adubação em um Argissolo Vermelho. EEA/UFRGS - safra 2006/07.

Manejo	Adubação	Bloco	TKPA	TKG	g kg ⁻¹	
					TPPA	TPG
Conv	Faixa	1	20,9	6,0	3,7	6,2
Conv	Faixa	2	19,2	6,5	2,8	6,9
Conv	Faixa	3	19,2	5,4	3,0	5,6
Conv	Lanço	1	22,6	5,4	2,1	6,5
Conv	Lanço	2	19,8	6,5	3,3	7,4
Conv	Lanço	3	19,8	6,0	2,6	6,8
Conv	Linha	1	21,4	6,0	2,6	6,8
Conv	Linha	2	22,6	6,0	2,1	7,2
Conv	Linha	3	20,9	5,4	2,5	6,3
Direto	Faixa	1	20,3	6,0	4,0	7,2
Direto	Faixa	2	24,2	5,4	3,6	6,2
Direto	Faixa	3	22,0	7,1	2,7	8,0
Direto	Lanço	1	26,4	6,5	3,6	6,9
Direto	Lanço	2	19,8	6,0	3,4	7,0
Direto	Lanço	3	20,3	6,5	3,9	6,9
Direto	Linha	1	19,2	6,5	3,1	7,1
Direto	Linha	2	28,6	6,0	3,8	6,5
Direto	Linha	3	20,9	6,5	3,0	8,8
Faixa	Faixa	1	23,7	5,9	2,7	6,8
Faixa	Faixa	2	20,3	6,0	2,5	7,1
Faixa	Faixa	3	20,3	5,4	3,3	5,7
Faixa	Lanço	1	22,6	4,3	1,9	6,1
Faixa	Lanço	2	19,8	5,4	3,3	6,6
Faixa	Lanço	3	20,3	6,0	3,3	6,7
Faixa	Linha	1	23,7	5,4	3,1	6,2
Faixa	Linha	2	19,8	6,0	3,2	7,0
Faixa	Linha	3	20,9	6,0	3,5	7,0

Apêndice 3. Matéria seca de raízes em sistemas de manejo do solo e da adubação em um Argissolo Vermelho. EEA/UFRGS - safra 2006/07.

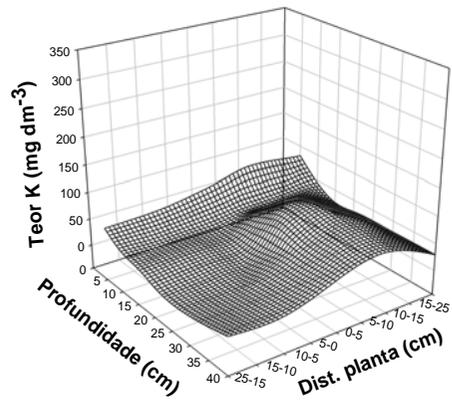
Camada	Manejo do solo e da adubação					
	Con/Fx	Con/Lan	Con/Lin	Dir/Lan	Dir/Lin	Fx/Fx
-- cm --	----- g -----					
0-5	0,097 a ¹	0,920 a	0,853 a	3,031 a	1,286 a	1,306 a
5-10	0,456 b	0,299 ab	0,367 a	0,371 b	0,644 ab	0,349 b
10-15	0,147 b	0,130 ab	0,215 a	0,148 b	0,310 b	0,226 b
15-20	0,103 b	0,122 ab	0,107 a	0,135 b	0,149 b	0,105 b
20-30	0,084 b	0,087 b	0,097 a	0,095 b	0,148 b	0,105 b
30-40	0,052 b	0,058 b	0,084 a	0,075 b	0,099 b	0,074 b

¹ Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

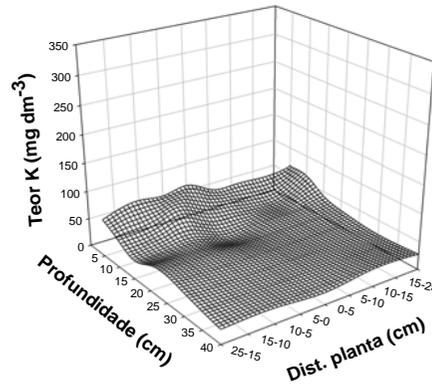
Apêndice 4. Distribuição percentual da massa de raízes em sistemas de manejo do solo e da adubação em um Argissolo Vermelho. EEA/UFRGS - safra 2006/07.

Camada	Manejo do solo e da adubação					
	Con/Fx	Con/Lan	Con/Lin	Dir/Lan	Dir/Lin	Fx/Fx
-- cm --						
0-5	57 a ¹	57 a	49 a	79 a	49 a	57 a
5-10	23 b	19 b	21 b	10 b	23 b	17 b
10-15	8 bc	8 bc	12 bc	4 b	11 bc	12 b
15-20	5 bc	7 bc	6 c	3 b	6 c	5 b
20-30	4 bc	5 bc	6 c	2 b	6 c	5 b
30-40	3 c	4 c	5 c	2 b	5 c	4 b

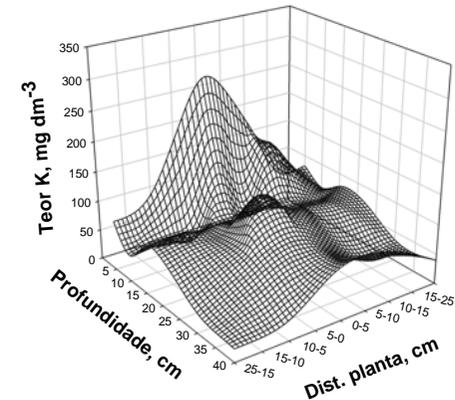
¹ Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.



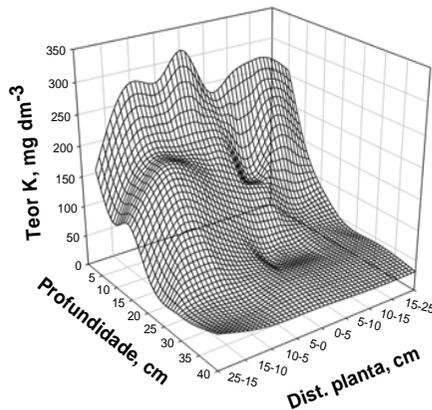
CONVENCIONAL – FAIXA RII



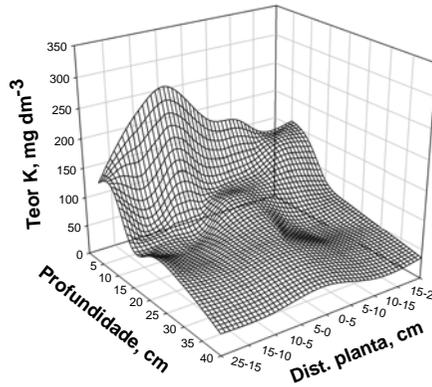
CONVENCIONAL – LANÇO RII



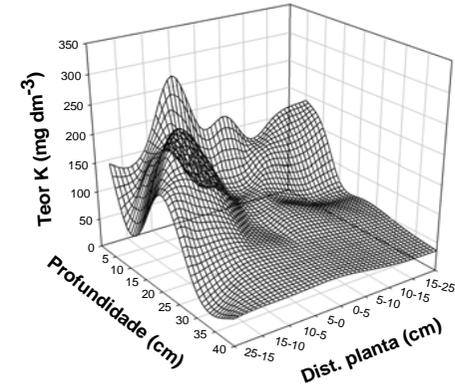
CONVENCIONAL – LINHA RII



CONVENCIONAL – FAIXA RIII

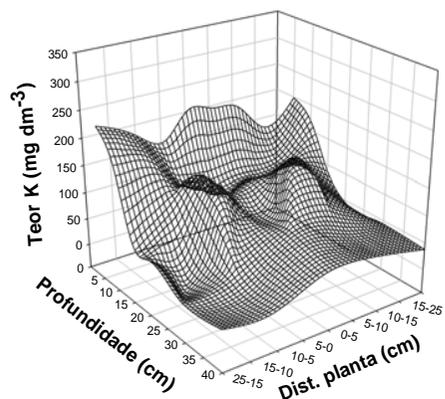


CONVENCIONAL – LANÇO RIII

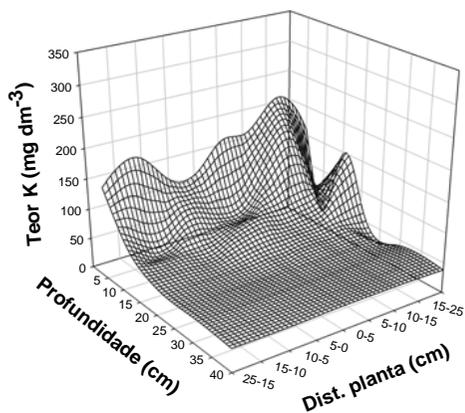


CONVENCIONAL – LINHA RIII

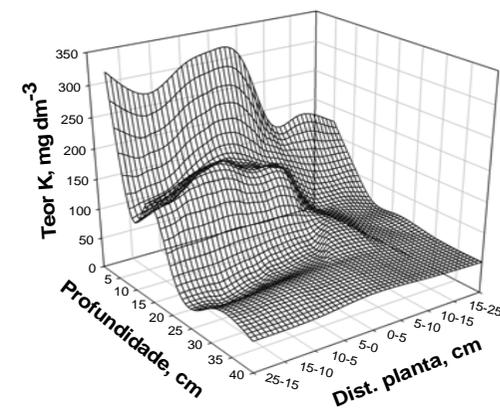
Apêndice 5. Distribuição de potássio no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo.
EEA/UFRGS - safra 2006/07.



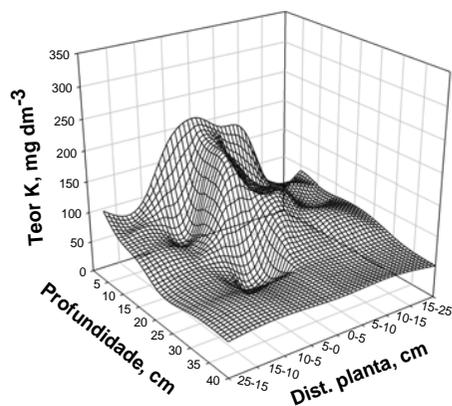
FAIXA - FAIXA RII



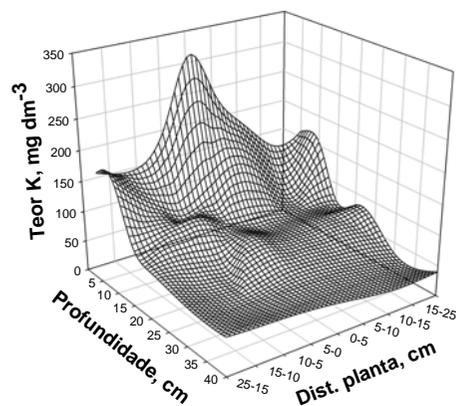
PLANTIO DIRETO - LANÇO RII



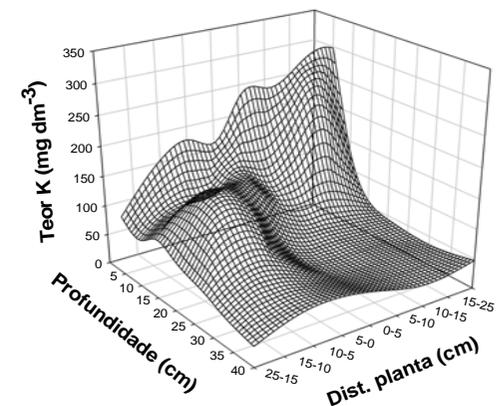
PLANTIO DIRETO - LINHA RII



FAIXA - FAIXA RIII

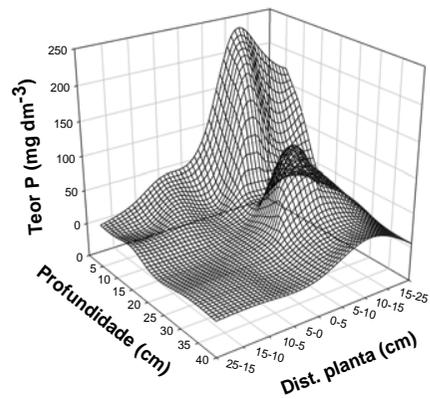


PLANTIO DIRETO - LANÇO RIII

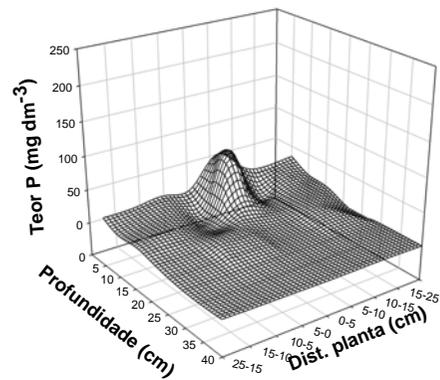


PLANTIO DIRETO - LINHA RII

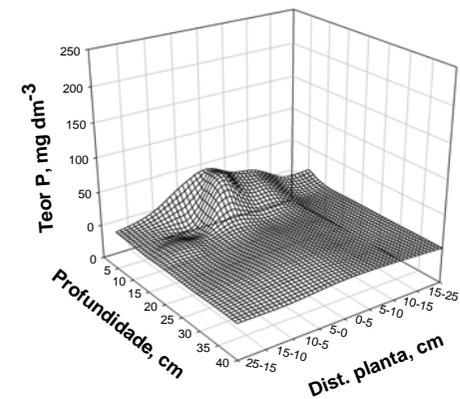
Apêndice 6. Distribuição de potássio no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo. EEA/UFRGS - safra 2006/07.



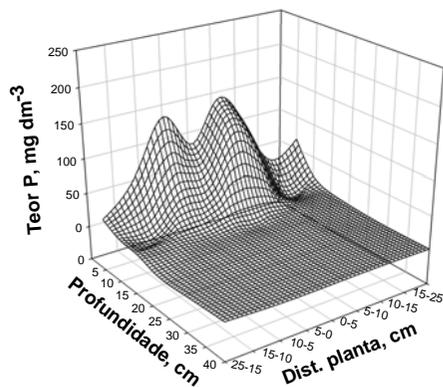
CONVENCIONAL – FAIXA RII



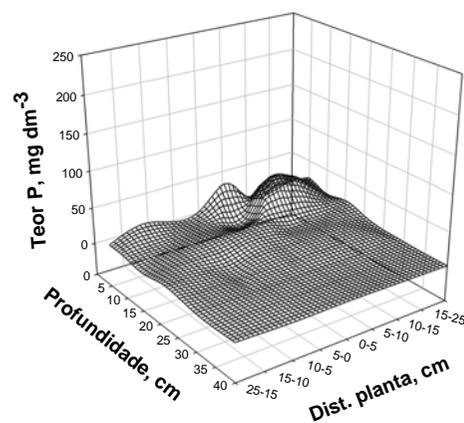
CONVENCIONAL LANÇO RII



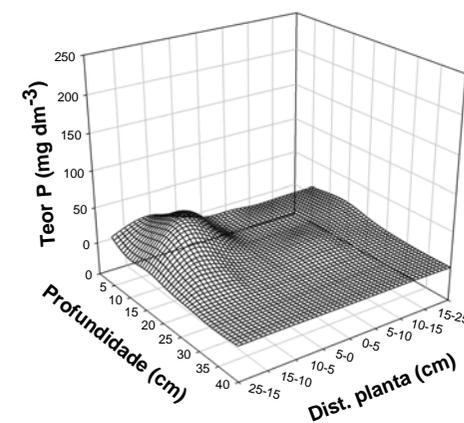
CONVENCIONAL – LINHA RII



CONVENCIONAL – FAIXA RIII

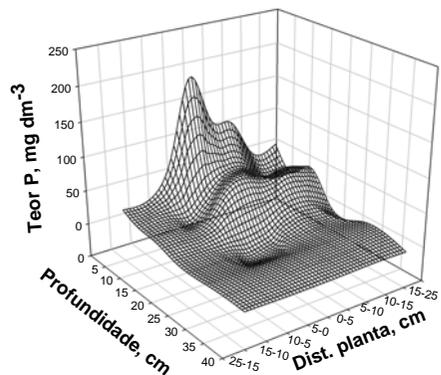


CONVENCIONAL LANÇO RIII

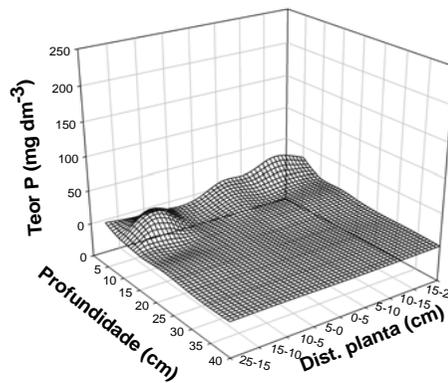


CONVENCIONAL – LINHA RIII

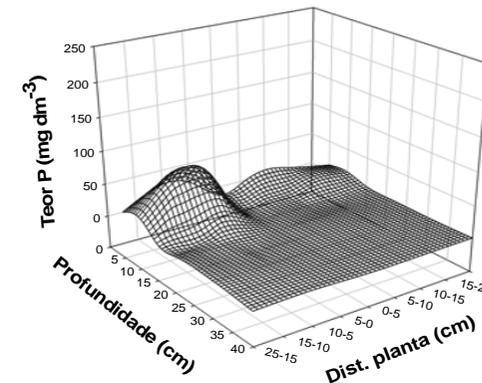
Apêndice 7. Distribuição de fósforo no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo.
EEA/UFRGS - safra 2006/07.



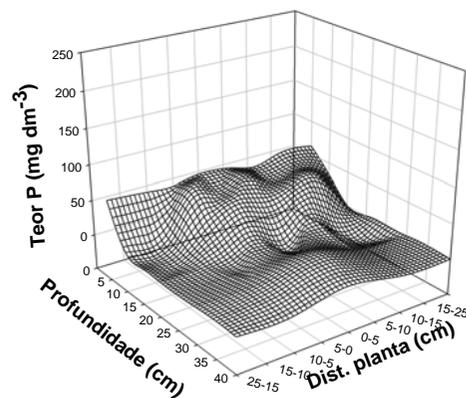
FAIXA – FAIXA RII



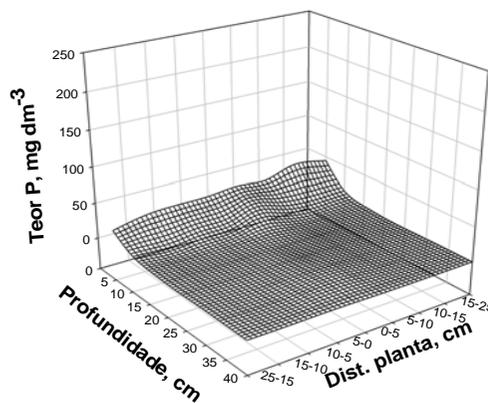
PLANTIO DIRETO – LANÇO RII



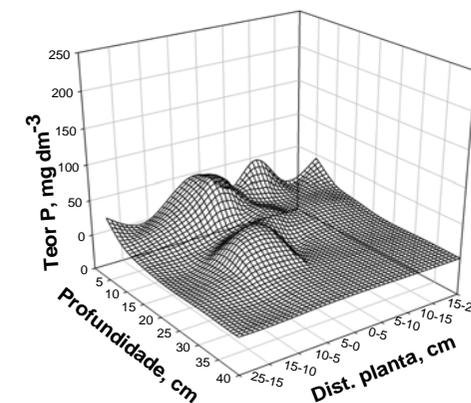
PLANTIO DIRETO – LINHA RII



FAIXA – FAIXA RIII

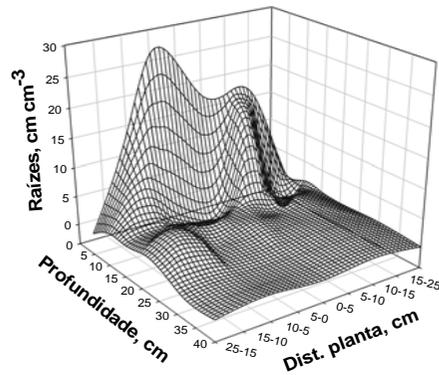


PLANTIO DIRETO – LANÇO RIII

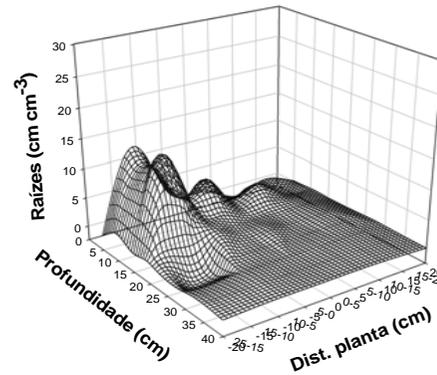


PLANTIO DIRETO – LINHA RIII

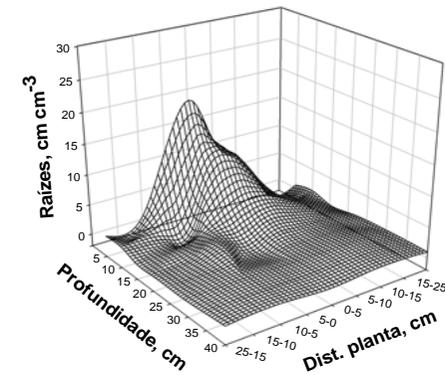
Apêndice 8. Distribuição de fósforo no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo.
EEA/UFRGS - safra 2006/07.



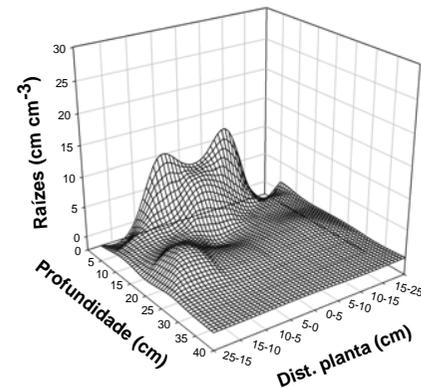
CONVENCIONAL – FAIXA RII



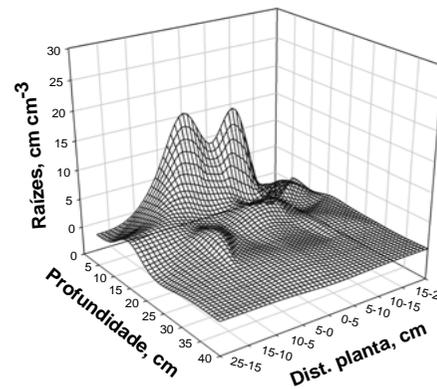
CONVENCIONAL – LANÇO RII



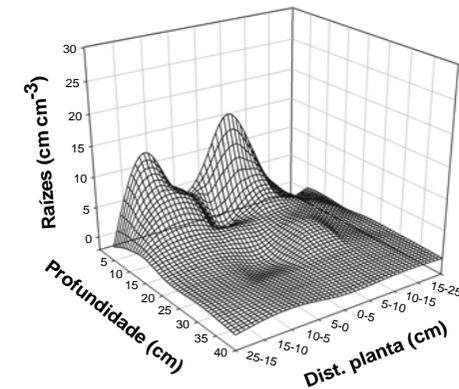
CONVENCIONAL – LINHA RII



CONVENCIONAL – FAIXA RIII

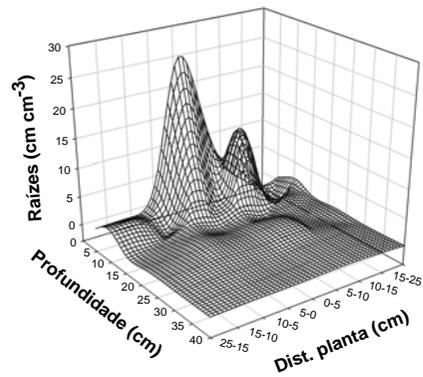


CONVENCIONAL – LANÇO RIII

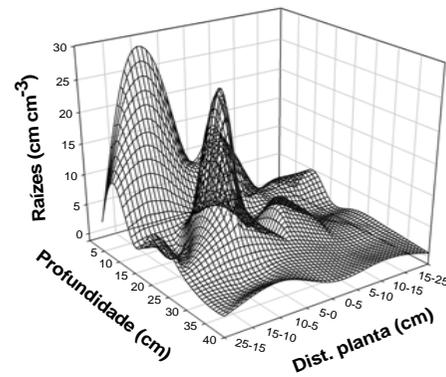


CONVENCIONAL – LINHA RIII

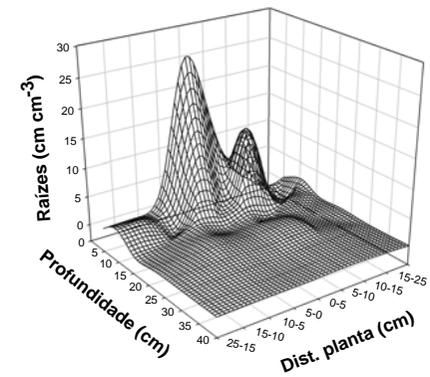
Apêndice 9. Distribuição de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo. EEA/UFRGS - safra 2006/07.



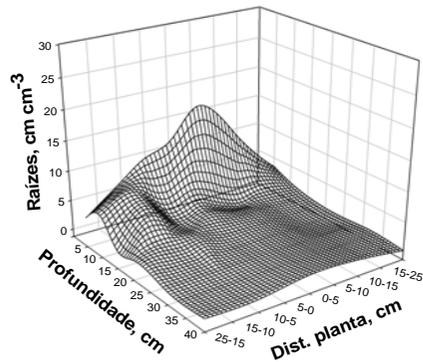
PLANTIO DIRETO – LANÇO RII



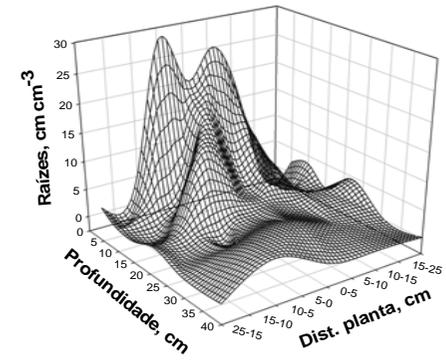
PLANTIO DIRETO – LINHA RII



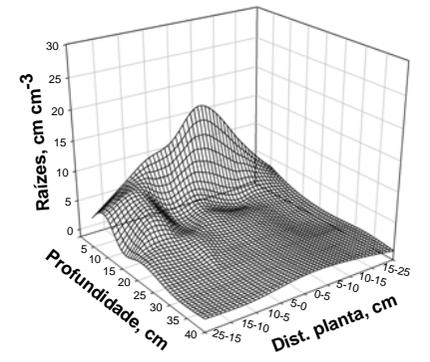
FAIXA – FAIXA RII



PLANTIO DIRETO – LANÇO RIII



PLANTIO DIRETO – LINHA RIII



FAIXA – FAIXA RIII

Apêndice 10. Distribuição de raízes no perfil de um Argissolo Vermelho após 18 anos sob sistemas de manejo. EEA/UFRGS - safra 2006/07.