



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Milton Aparecido Deperon Júnior

**IMPLEMENTOS DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS DE ARGISSOLO
AMARELO E ASPECTOS AGRÔNOMICOS DA CULTURA DO MILHO**

JUAZEIRO – BA
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Milton Aparecido Deperon Júnior

**IMPLEMENTOS DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO SOBRE ATRIBUTOS FÍSICOS DE ARGISSOLO
AMARELO E ASPECTOS AGRÔNOMICOS DA CULTURA DO MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Campus de Juazeiro, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: Profa. DSc. Nelci Olszewski

Coorientador: Prof. DSc. Jorge Wilson Cortez

JUAZEIRO – BA
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Milton Aparecido Deperon Júnior

**IMPLEMENTOS DE PREPARO DO SOLO E NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO SORE ATRIBUTOS FÍSICOS DE ARGISSOLO
AMARELO E ASPECTOS AGRÔNOMICOS DA CULTURA DO MILHO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

(Nome, sua titulação e Instituição a que pertence).

(Nome, sua titulação e Instituição a que pertence).

(Nome, sua titulação e Instituição a que pertence).

Juazeiro, de de 2014

DEDICATÓRIA

A minha família (Milton, Mary, Mariana, Vô Ângelo e Dona Meiry), pelos ensinamentos passados, amor, carinho, etc. A minha amada esposa Andréia Deperon pelo amor, carinho estímulo, sobretudo pela paciência e compreensão desde o início deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Minha orientadora Profa. Nelci Olszewski pelo imenso suporte, apoio, confiança, dedicação, amizade no desenvolvimento deste trabalho, auxiliando e direcionando a escrita bem como os resultados. Graças a você foi possível a realização desta conquista. Muito obrigado.

Ao colega Hideo de Jesus Nagahama pela amizade, comprometimento e apoio incontestável no desenvolvimento deste trabalho, também obrigado pelo auxílio na escrita e análises dos dados. Graças a você foi possível a realização desta conquista. Muito obrigado.

Ao Prof. Jorge Wilson Cortez pelo apoio, confiança, idéias e ensinamentos passados na realização deste trabalho. Muito obrigado.

Aos Professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNIVASF, pelos conhecimentos passados e paciência durante as aulas. Muito obrigado.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação pelas risadas e momentos divertidos que passamos juntos, em especial os acadêmicos Fernando e Alberto. Muito obrigado.

Aos funcionários do CCA-UNIVASF, pelo imenso apoio no desenvolvimento das atividades agrícolas, bem como ao Prof. Helder Ribeiro Freitas pela cessão da área experimental. Muito obrigado.

A todos que posso estar esquecendo, que direta ou indiretamente me ajudaram a realizar este trabalho. Muito obrigado.

DEPERON JÚNIOR, M. A. **Implementos de preparo do solo e níveis de compactação sobre atributos físicos de argissolo amarelo e aspectos agrônomicos da cultura do milho.** 2014. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro – BA

RESUMO

Em decorrência da intensificação da agricultura, quer seja nos moldes convencionais de semeadura ou com o uso do plantio direto, observam-se aumento de áreas compactadas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de implementos de preparo do solo e de níveis de compactação sobre os atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrófico típico textura arenosa e seus possíveis impactos em características agrônomicas do milho. Os tratamentos foram constituídos por três implementos de preparo do solo e quatro níveis de compactação, proporcionados pelo tráfego de um trator. Foi utilizado o delineamento experimental de blocos casualizados em esquema de parcelas sub-divididas com quatro repetições, sendo dispostas nas parcelas os implementos de preparo do solo, e nas sub-parcelas os níveis de compactação. Foram avaliados nas camadas de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30 e 0,30 - 0,40 m os seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e resistência mecânica do solo à penetração (RP). Nas plantas foram realizadas as seguintes avaliações: altura de plantas (AP), altura de inserção da primeira espiga (APE), diâmetro do colmo (DC), número de grãos (NG), fileiras da primeira espiga (FE), comprimento da primeira espiga (CE), diâmetro da primeira espiga (DE), matéria seca das plantas (MSP), matéria seca das raízes (MSR), massa de 1000 grãos (MG) e produtividade (P). Os implementos de preparo do solo influenciaram a Ds e a Pt na camada de 0,00–0,10 m, porém a RP não foi influenciada. Os níveis de compactação promoveram aumento da Ds nas camadas de 0,00 – 0,10 m e de 0,30 – 0,40 m, da Pt na camada de 0,00 – 0,10 m e da RP na camada de 0,00 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m. Das características agrônomicas avaliadas da cultura, implementos de preparo do solo apenas influenciaram a AP, APE e DC, sendo possível observar maiores valores para AP e APE quando foi utilizada a grade no preparo do solo. O aumento da RP na camada de 0,00 – 0,30 m, proporcionado pelos níveis de compactação restringiu todas as características avaliadas da cultura, com exceção do CE, DE e MG. Foi possível observar que valores de RP entre 1,53 a 3,33 MPa provocaram reduções na AP, APE, DC, NG, FE, MSP e P de 19, 14, 15, 20, 11, 39 e 22% respectivamente. Para a MSR houve aumento quadrático de seu valor até a RP de 2,18 MPa, e a partir deste até 3,33 MPa houve redução de 53%. Mostrou-se a importância da verificação das condições de compactação do solo para prevenir perdas na cultura do milho.

Palavras-chave: Densidade do solo; Resistência mecânica; *Zea mays*.

DEPERON JÚNIOR, M. A. **Tillage implements and levels of compaction on physical properties of yellow argisol and agronomic aspects of corn.** 2014. 72f. Dissertation (Masters in Agricultural Engineering) – Federal University of São Francisco Valley, UNIVASF, Juazeiro – BA

ABSTRACT

Due to the agriculture intensification, whether in conventional molds seeding or with the use of no-till, are observed the increase of compacted areas. The objective of this study was to evaluate the influence of tillage implements and compaction levels on physical properties of a Yellow Argisol dystrophic typical sandy texture and its possible impacts on the corn agronomic characteristics. The treatments consisted in three implements of tillage and four levels of compaction, provided by tractor traffic. The experimental delineation was randomized blocks in split-plot scheme with four repetitions, being disposal in the plots the implements of tillage and in sub-plots the levels of compaction. Were evaluated in depth of 0.00 – 0.10; 0.10 – 0.20; 0.20 – 0.30 e 0.30 – 0.40 m the following physical soil properties: soil density (Sd), total porosity (Tp) and mechanical resistance to soil penetration (MR). Also the following evaluations were performed in plants: plants height (PH), height of the first ear insertion (EH), stem diameter (SD), grain number (GN), rows of the first ear (RE), first ear length (FL), first ear diameter (FD), dry matter plants (DMP), root dry matter (RDM), weight of 1000 grain (WG) and productivity (P). The implements of tillage influenced the Sd and the Tp layer of 0.00 – 0.10 m, however the MR was not affected. The compaction levels caused an increase of Sd in layers from 0.00 – 0.10 m and 0.30 – 0.40 m, the Tp layer from 0.00 – 0.10 m and in the RP layer from 0.00 – 0.10 m; 0.10 – 0.20 m and 0.20 – 0.30 m. From agronomic characteristics of the culture evaluated, the implements of tillage just influenced the PH, EH and SD, was possible to note higher values for PH and EH when a disc harrow was used. The MR increase in layer of 0.00 – 0.30 m, provided by compaction levels restricted all agronomic characteristics of the culture evaluated, except FL, FD and WG. Was possible to note that MR values between 1.53 and 3.33 MPa caused reduction in PH, EH, SD, GN, RE, DMP an PG for 19, 14, 15, 20, 11, 39 and 22% respectively. For RDM was a squaring increase until MR of 2.18 MPa and as from this value until 3.33 MPa was reduction of 53%. Showed the importance of verify compaction condition of the soil, to prevent losses in corn.

Keywords: Soil density; Mechanical resistance; *Zea mays*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Dados climáticos da região durante desenvolvimento da cultura. Fonte: UNIVASF/CCA.28
- Figura 2. Densidade do solo em função dos implementos de preparo do solo (IP_1 = grade aradora; IP_2 = arado de aivecas e IP_3 = escarificador) e níveis de compactação (NC_0 = solo não trafegado; NC_3 = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC_6 = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC_9 = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). As linhas em cada camada representam o valor de DMS; ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey... 37
- Figura 3. Porosidade total em função dos implementos de preparo do solo (IP_1 = grade aradora; IP_2 = arado de aivecas e IP_3 = escarificador) e níveis de compactação (NC_0 = solo não trafegado; NC_3 = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC_6 = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC_9 = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). As linhas em cada camada representam o valor de DMS; ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey... 40
- Figura 4. Relação entre a densidade do solo (Ds) e a resistência mecânica do solo à penetração (RP) do Argissolo Amarelo.42
- Figura 5. Resistência mecânica do solo à penetração em função dos implementos de preparo do solo (IP_1 = grade aradora; IP_2 = arado de aivecas e IP_3 = escarificador) e níveis de compactação (NC_0 = solo não trafegado; NC_3 = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC_6 = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC_9 = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey..... 43
- Figura 6. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a altura de plantas, altura de inserção da primeira espiga e diâmetro de colmo do milho.47
- Figura 7. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e o número de grãos e fileiras da primeira espiga do milho.49
- Figura 8. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a matéria seca das plantas e raízes do milho.....
- Figura 9. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a produtividade do milho.53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição granulométrica, umidade gravimétrica do solo (US) no momento do preparo do solo, da aplicação dos níveis de compactação e da medição da resistência mecânica do solo nas profundidades do Argissolo Amarelo.	29
Tabela 2. Composição química do Argissolo Amarelo na camada de 0,00 – 0,20 m.	29
Tabela 3. Equipamentos agrícolas utilizados no experimento.	30
Tabela 4. Teste de F para Densidade do solo (Mg m^{-3}) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	36
Tabela 5. Teste de F para Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	39
Tabela 6. Teste de F para Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	41
Tabela 7. Teste de F e de médias para Altura de plantas (AP), Altura de inserção da primeira espiga (APE) e Diâmetro de colmo (DC) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	45
Tabela 8. Teste de F para Número de grãos (NG), Fileira da primeira espiga (FE), Comprimento da primeira espiga (CE) e Diâmetro da primeira espiga (DE) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	48
Tabela 9. Teste de F para Matéria seca das plantas (MSP) e Matéria secas das raízes (MSR) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	50
Tabela 10. Teste de F para Massa de 1000 grãos (MG) e Produtividade (P) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Compactação do solo.....	13
2.2 Sistemas de preparo do solo.....	20
2.3 A cultura do milho	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Local	28
3.2 Insumos e equipamentos	29
3.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	32
3.4 Avaliações.....	32
3.4.1 Atributos físicos do solo	32
3.4.2 Características agrônomicas da cultura.....	34
3.5 Análise dos dados.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Atributos físicos do solo	36
4.1.1 Densidade do solo (Ds).....	36
4.1.4 Porosidade total (Pt).....	38
4.1.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RP)	41
4.2 Características agronômicas da cultura	45
4.2.1 Alturas de planta (AP), Altura de inserção da primeira espiga (APE) e Diâmetro de colmo (DC).....	45
4.2.2 Número de grãos (NG), Fileiras da primeira espiga (FE), Comprimento da primeira espiga (CE) e Diâmetro da primeira espiga (DE).	48
4.2.3 Matéria seca das plantas (MSP) e Matéria secas das raízes (MSR).	49
4.2.4 Massa de 1000 grãos (MG) e Produtividade (P).....	52
5. CONCLUSÃO	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICE	70

1 INTRODUÇÃO

A substituição das matas nativas por áreas cultivadas promove alterações em características químicas, físicas e biológicas dos solos em função da mudança de uma condição natural para uma condição antropizada. Tais mudanças ocorrem, principalmente, na agricultura moderna e tecnificada, em função do uso de máquinas e implementos que promovem intensos processos de revolvimento do solo e, em muitos casos, tais operações são responsáveis por alterações negativas na qualidade do solo.

Podemos destacar atualmente três principais sistemas de preparo do solo, o convencional, o reduzido e o plantio direto. O preparo convencional do solo pode ser caracterizado por mobilizações mais agressivas do solo onde geralmente são utilizadas gradagens e arações. O preparo reduzido visa diminuir as mobilizações causadas no solo, e os principais implementos utilizados neste sistema são os escarificadores e subsoladores, considerados menos agressivos, pois trabalham o solo de forma diferente das grades e arados. Já o plantio direto é caracterizado pela mínima mobilização do solo que ocorre apenas nas fileiras de semeadura. Assim, as operações de preparo são realizadas com a função de melhorar e criar condições favoráveis à germinação e ao crescimento radicular das culturas. Entretanto, condições de umidade durante o preparo, teor de argila e de matéria orgânica do solo, profundidade de mobilização e tipo de implemento utilizado podem levar a modificações da estrutura do solo acarretando restrições ao crescimento das raízes (DE MARIA et al., 1999).

Em decorrência da intensificação da agricultura, quer seja nos moldes convencionais de semeadura ou com o uso do plantio direto, observam-se aumento de áreas compactadas e nessas, variações às vezes intensas ao longo do perfil do solo. No entanto, a compactação no solo, sob o ponto de vista agrônômico, somente tem significado quando interfere nos processo de crescimento e desenvolvimento das plantas (COLLARES, 2005).

Para a mensuração da compactação, vários parâmetros físicos e mecânicos do solo são utilizados, bem como a análise da planta, como seu desenvolvimento radicular e aéreo e a produtividade. É intenso o estudo para obter-se limites ou faixas de parâmetros do solo, como a densidade do solo, que sejam críticos ao

desenvolvimento das plantas, e a busca por parâmetros que sejam representativos da compactação do solo e possibilitem uma comparação entre os mais diferentes solos e manejos, como o “grau de compactação” ou “compactação relativa” (SUZUKI, 2005).

Devido a grande importância econômica da cultura do milho que, destaca-se entre os cereais, como uma das culturas mais plantadas no mundo, e no Brasil, apresenta a segunda maior área cultivada com aproximadamente 15,8 milhões de hectares plantados na safra 2012/2013 (CONAB, 2014), diversos autores estudaram os efeitos de sistemas de preparo e da compactação na, produção de matéria seca de raízes (KLEPKER, 1991; FOLONI et al., 2003; FREDDI, 2007), na produção de matéria seca das plantas (KLEPKER, 1991; FREDDI, 2007), na produtividade (TREIN, 1988; KLEPKER, 1991; CENTURION e DEMATTÊ, 1992; GAGGERO, 1998; MELLO IVO e MIELNICZUK, 1999; SILVA et al., 2000a; SEIXAS, 2001; SUZUKI, 2005; FREDDI, 2007; FREDDI et al., 2009; PENEDO, 2011), na altura de plantas (TREIN, 1988; SEIXAS, 2001; SUZUKI, 2005; FREDDI, 2007) entre outros aspectos agronômicos, entretanto, grande parte destes autores realizaram seus trabalhos principalmente em Latossolos que são encontrados com maior frequência nas regiões do Cerrado e Sul do país, sendo escassos os trabalhos para os solos do região Nordeste, principalmente nos Argissolos. A Região do Vale do São Francisco apresenta grande potencial para a cultura do milho por possuir um extenso perímetro irrigado, pela possibilidade de rotação de culturas, pelo clima seco que garante baixa incidência de doenças foliares, pela alta luminosidade, dentre outros aspectos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de implementos de preparo do solo e de níveis de compactação sobre os atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrófico típico textura arenosa e seus possíveis impactos em características agronômicas do milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compactação do solo

Os solos agrícolas vêm sofrendo grandes perturbações, sendo a compactação apontada como a principal causa destas mudanças em virtude do tráfego de tratores e de máquinas agrícolas em condições inadequadas de manejo (RICHART, et al., 2005).

Camargo e Alleoni (1997), definem a compactação do solo como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes. Para Lima (2004), o termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais.

Richart et al. (2005), relatam que o processo de compactação depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, a intensidade e frequência de carga aplicada, enquanto que, os fatores internos são o histórico de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial do solo e teor de carbono.

Para Richart et al. (2005), o tráfego de máquinas agrícolas é a principal causa da compactação do solo, sendo intensificada pela modernização da agricultura, com o aumento da massa dos equipamentos e da intensidade de uso do solo. O mesmo autor relata que este processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Segundo Silva et al. (2000b), os pneus usualmente utilizados nos tratores e colhedoras comercializadas no Brasil, possuem a parte lateral do pneu rígida, sendo chamados de pneus de banda diagonal. Essa rigidez, impede que o pneu se molde no solo de acordo com as irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo.

Radford et al. (2000), observaram um aumento significativo na densidade do solo, a uma profundidade de 0,11 m, e no índice de cone, nas camadas de 0,00 – 0,11 e 0,13 – 0,18 m, quando uma máquina com massa de 10 e 2 Mg,

respectivamente no eixo dianteiro e traseiro, trafegou uma vez em um Vertissolo. Collares (2005), trabalhando em um Argissolo Vermelho textura franco arenosa, observou que a compactação adicional causada pelo tráfego de uma máquina com massa de 10 Mg elevou os valores de densidade do solo e reduziu a porosidade total. Chan et al. (2006), encontraram em um Vertissolo sódico maior densidade e resistência à penetração e menor macroporosidade, além de redução do crescimento radicular de canola e trigo, bem como, redução da produtividade de canola nas linhas de tráfego de máquinas.

Para Lanças (2002), a utilização de máquinas tais como o arado, grade e enxada rotativa, resolve o problema da compactação do solo nas camadas superficiais porém, na maioria dos casos, a transfere para camadas mais profundas. A utilização dessas máquinas, quase sempre à mesma profundidade de preparo do solo e por diversos anos consecutivos, tem contribuído para o surgimento das camadas compactadas logo abaixo da linha de ação dos órgãos ativos das mesmas, sendo denominada de compactação subsuperficial. Centurion e Demattê (1985), estudando o preparo de solo convencional (aração, gradagem pesada + gradagem leve); preparo reduzido (gradagem pesada + gradagem leve); semeadura indireta (roçada e aplicação de herbicida) e super preparo (duas arações + gradagem pesada + gradagem leve), concluíram que os sistemas de preparo reduzido, convencional e super preparo induziram a formação de camadas compactadas nas profundidades de 0,10, 0,20 e 0,20 m respectivamente. Para Richart et al. (2005), a compactação do subsolo pode ser aliviada mediante a subsolagem e tende a ser de caráter permanente devido às peculiaridades da subsolagem.

A textura do solo apresenta grande importância no processo de compactação (RICHART et al., 2005). Segundo Reichert et al. (2003), a compactação ocorre com maior intensidade em solos argilosos, entretanto, esses solos são mais resistentes à desagregação, enquanto os solos arenosos apresentam menores problemas de compactação, porém revelam alta susceptibilidade à desagregação. Moura et al. (2008), trabalhando com compactação artificial em dois solos com classes texturais diferentes, verificaram que o maior grau de compactação, representado pela densidade do solo de $1,98 \text{ Mg m}^{-3}$ em um Planossolo com $0,055 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, não restringiu o desenvolvimento de bulbos da cultura do rabanete, comportamento diferente foi observado em um Nitossolo com $0,39 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, onde a uma densidade de solo de $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ não houve desenvolvimento dos bulbos da

cultura. Resultados estes que corroboram com Lima (2004), que ressalta que a uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. Para Kaiser (2010), os solos argilosos, por serem mais porosos, podem facilitar o crescimento das raízes, mesmo em condições de alta resistência. Os solos arenosos, por serem menos porosos e oferecerem maior atrito entre partículas, com menor variação de umidade, podem restringir o crescimento das raízes. Segundo Dias Júnior e Miranda (2000), isso pode ser explicado devido ao fato de que as partículas dos solos com predominância da fração areia se rearrajarem mais acirradamente do que nos solos com predominância da fração argila.

Outro importante fator que influencia o grau de compactação é a umidade do solo que, segundo Dias Junior e Pierce (1996), para uma mesma condição é a propriedade que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo no momento das operações mecanizadas. Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa. Entretanto, sob condições de elevada umidade, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (SWAN et al., 1987 *apud* RICHART et al., 2005). Secco (2003), em trabalho conduzido em Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e em Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa verificou que houve incremento médio da pressão de preconsolidação à medida que ocorreu aumento da densidade e o solo sofreu redução no grau de saturação de água de 91% para 58% e de 93% para 68% respectivamente, sugerindo que, quanto mais seco e compactado estiver o solo, maior será a capacidade de suporte do mesmo estando as partículas e, ou, agregados mais coesos, ainda segundo o autor, para um grau de saturação inferior a 45% e 60 %, respectivamente, para o primeiro e segundo solo, a pressão de preconsolidação foi pouco influenciada pela umidade e densidade do solo. Em um solo úmido, segundo o autor, a água atua como lubrificante entre as partículas, deixando o solo mais macio, alterando o estado de consistência do mesmo e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de suporte de carga do solo. Para Smith et al. (1997) *apud* Imhoff (2002), este processo continua até que água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, um novo incremento no conteúdo de água no solo, não responderá com um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida. Silva et al.

(2006), encontram redução da produção de matéria seca de raízes e densidade radicular de *Eucalyptus urophylla* pela compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo oxídico-gibítico em vaso, na umidade de $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$, em relação às demais umidades ($0,05$ e $0,10 \text{ kg kg}^{-1}$). Em um Latossolo Amarelo caulínico, houve redução apenas da densidade radicular com a compactação nas umidades de $0,10$ e $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$.

Muitas vezes as condições necessárias para evitar a compactação são difíceis de coincidir pois, algumas delas, como a umidade por exemplo, dependem das condições climáticas. É necessário, porém, que haja uma programação e organização das atividades para considerar esses fatores descritos anteriormente, evitando, assim, a compactação, problema complexo e de difícil recuperação (REICHERT et al., 2007). Oliveira et al. (2003), verificaram que para um Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa, nas tensões mais baixas, ou seja, maior umidade, o teste de compressão uniaxial foram maiores evidenciando a necessidade de um monitoramento da umidade do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas, resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (BRAIDA, 2004; DIAS JUNIOR et al., 2004; LIMA et al., 2006). Para Albuquerque et al. (2001), a umidade é um dos fatores que influenciam o nível de compactação do solo, assim, recomenda-se evitar o uso de máquinas pesadas e retirar os animais da área quando o solo estiver com umidade acima do ponto de friabilidade em um sistema de integração lavoura-pecuária em um Nitossolo para evitar a compactação.

Para Reichert et al. (2007), dentre as propriedades utilizadas para avaliar a compactação do solo, talvez a densidade seja a mais segura, pois apresenta menor ou nenhuma dependência de outros fatores, como a umidade.

Mudanças na densidade do solo são facilmente medidas e podem ser um indicador de alterações na qualidade do solo e no funcionamento do ecossistema. Aumentos na densidade geralmente implicam em diminuição na qualidade do solo para crescimento radicular, redução da aeração e mudanças indesejáveis no comportamento da água no solo, como redução da infiltração (SILVA, 2008).

A resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação do solo e muitos trabalhos têm buscado valores que causem restrições ao desenvolvimento das raízes das plantas e diminuição de produtividade. A dificuldade está em isolar o efeito dessas

propriedades físicas e da umidade do solo; portanto, dúvidas persistem sobre a propriedade do solo que melhor caracterize o estado de compactação e que seja sensível a variações de manejo do solo (SILVA, 2003).

Segundo Silva (2008), o conteúdo de água e a densidade do solo influenciam a resistência à penetração. A resistência à penetração aumenta com a compactação do solo e à medida que o solo seca. Deste modo, o efeito da densidade no crescimento radicular é mais intenso em solos relativamente secos. Em solos úmidos, uma maior densidade é necessária para restringir a penetração radicular. Por exemplo, uma camada compactada pelo tráfego, com densidade de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ pode restringir completamente a penetração radicular em solo muito seco e permitir a penetração radicular em solo úmido.

Segundo De Maria et al. (1999), para caracterizar a compactação entre camadas de solo, a resistência à penetração apresenta melhores resultados do que a densidade do solo. Porém como a resistência é dependente da umidade e da densidade do solo, determinar valores ou faixas de valores críticos ou restritivos torna-se difícil, sendo mais fácil obter esses valores para propriedades como a densidade do solo (REICHERT et al., 2007).

A avaliação da compactação do solo, seja pela densidade, seja pela resistência à penetração, apresenta boa relação com crescimento radicular. Geralmente, com aumento da densidade ou da resistência à penetração, há redução do desenvolvimento radicular (REICHERT et al., 2007). Segundo Reichert et al. (2003), de maneira geral, a compactação máxima situa-se em torno de 0,05 m de profundidade, com valores de densidade do solo de cerca de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ e macroporosidade variando entre 5% e 8%. Alguns valores de densidade do solo que poderiam causar impedimentos severos têm sido indicados na literatura, embora sejam estritamente empíricos. Valores de densidade do solo crítica foram encontrados por diversos autores (SILVA e KAY, 1997; KLEIN, 1998; TORMENA et al., 1998, TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; SILVA, 2003; SILVA et al., 2004) quando o intervalo hídrico ótimo foi igual a zero, utilizando-se destes dados Reichert et al. (2003) propuseram valores críticos de acordo com classes texturais, sendo eles: 1,25 a $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos muito argilosos; 1,3 a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos; 1,4 a $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos franco argilosos; $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos franco siltosos e 1,7 a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos franco arenosos.

Cintra e Mielniczuk (1983), encontraram que a densidade do solo de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ e a resistência do solo à penetração de 1.100 kPa reduziram 50% do sistema radicular de várias culturas, em um Latossolo Roxo muito argiloso. Alvarenga et al. (1996) determinaram que em um Latossolo Vermelho-Escuro muito argiloso, a densidade crítica do solo ao desenvolvimento radicular de diversas leguminosas ficou em torno de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, para a crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), feijão de porco (*Canavalia ensiformes*) e o feijão-bravo-do-Ceará (*Canavalia brasiliensis*), e acima de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, para o guandu (*Cajanus cajan*). De Maria et al. (1999), observaram em um Latossolo Roxo muito argiloso que a densidade do solo de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ provocou redução do crescimento radicular da soja. Secco (2003), em trabalho conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, observou que a densidade do solo de $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ promoveu redução na produtividade do trigo, e em um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, a densidade do solo de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ promoveu redução na produtividade do trigo e do milho. Collares (2005), observou em um Argissolo Vermelho distrófico de textura franco arenosa, que uma densidade do solo de $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$ promoveu redução do desenvolvimento radicular do feijoeiro. Silva et al. (2000a), em trabalho desenvolvido em Podzólico Vermelho-Amarelo, observaram que a densidade de raízes de milho correlacionou-se inversamente com a densidade do solo na camada de $0,10 - 0,25 \text{ m}$. Para Freddi et al. (2009), estudando os efeitos de diferentes tratamentos de compactação em um Latossolo Vermelho distrófico típico, verificaram que a macroporosidade e a resistência do solo à penetração foram as variáveis mais sensíveis às modificações causadas pelo tráfego dos tratores, enquanto a densidade do solo foi pouco alterada, apresentando menor coeficiente de variação.

A resistência do solo à penetração é apontada como um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, pois esta característica expressa o grau de compactação, variando com o tipo de solo e com a espécie cultivada, sendo que suas causas têm sido atribuídas ao tráfego de máquinas agrícolas (RICHART et al., 2005). Para alguns autores (CANARACHE, 1990; PABIN et al., 1998 *apud* REICHERT et al., 2007) a resistência à penetração é dependente da umidade e densidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas. Portanto, um solo seco ou mais denso apresenta maior resistência se comparado a um solo úmido ou menos denso, enquanto, para uma mesma umidade, um solo argiloso apresenta maior resistência que um solo arenoso.

Tormena et al. (1998) e Guimarães et al. (2002), concluíram que em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor e isto foi atribuído ao impedimento mecânico ao crescimento radicular, que resultou em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e de nutrientes e conseqüentemente, menor produtividade das culturas avaliadas. Para Abreu et al. (2004), nem sempre o limitante da produtividade das culturas é a resistência mecânica do solo, mas um conjunto de fatores, tais como: a própria resistência do solo à penetração de raízes, o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas.

Na literatura, os trabalhos têm apresentado diferentes valores de resistência à penetração considerados críticos ou restritivos ao desenvolvimento e produtividade de plantas (REICHERT et al., 2007). Taylor et al. (1966), trabalhando em condições de laboratório indicaram que uma resistência penetração de 2,0 MPa como restritiva. Em outro estudo também em condições de laboratório Canarache (1990), sugeriu alguns limites de resistência à penetração considerando o desenvolvimento radicular, valores menores que 2,5 MPa não apresentariam limitações ao crescimento radicular; valores entre 2,6 e 10 MPa causariam algumas limitações e valores superiores a 10 MPa não possibilitariam o crescimento radicular. Sene et al. (1985), consideram críticos os valores de resistência à penetração que variam de 6,0 a 7,0 MPa, para solos arenosos, e em torno de 2,5 MPa, para solos argilosos. Essa variação pode estar associada ao tipo de solo, espécie ou variedade envolvida e umidade do solo no momento da avaliação.

Meroto Jr. e Mundstock (1999), trabalhando em vaso, verificaram que uma resistência de 2,0 MPa ocasionou uma mínima redução da matéria seca de raízes, parte aérea e comprimento radicular do trigo, enquanto para uma resistência de 3,5 MPa as restrições foram severas. Beutler e Centurion (2004a), encontraram para a cultura do arroz valores de 2,30 e 2,90 MPa, como restritivos a produção de matéria seca da parte aérea respectivamente, para um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média e Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa. Ainda estes mesmos autores encontraram redução da produtividade da cultura do arroz partir da resistência do solo à penetração de 2,38 e 2,07 MPa, quando estes solos apresentavam teores de água de 0,14 kg kg⁻¹ e 0,27 kg kg⁻¹ respectivamente. Beutler et al. (2004), trabalhando com as culturas da soja e do arroz encontraram que as resistências à penetração de 1,66 e 2,22 MPa, para a cultura da soja, e de

0,27 e 2,38 MPa, para a cultura do arroz, respectivamente, para os conteúdos de água de 0,11 kg kg⁻¹ e de 0,14 kg kg⁻¹, reduziu a produtividade dessas culturas em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média em vaso. Segundo os autores com o aumento do teor de água, pode-se tolerar um maior valor de resistência à penetração, e o menor valor crítico de resistência à penetração com a redução do conteúdo de água pode ser indicativo de uma interação com efeito do potencial da água no solo, restringindo a atividade fisiológica da planta.

Em condições de campo De Maria et al. (1999), encontraram que uma resistência à penetração de 2,09 MPa poderia estar determinando redução do crescimento radicular da soja em um Latossolo Roxo distrófico muito argiloso. Secco et al. (2009), encontram que valores de resistência a penetração de 2,65 e 3,26 MPa, respectivamente em um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa e em um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, não foram restritivos para a cultura da soja em condições de campo, entretanto, para a cultura do milho o valor de resistência a penetração de 3,26 MPa foi suficientemente elevado para reduzir a produtividade de grãos da cultura. Para os autores a cultura do milho, foi mais sensível aos estados de compactação existentes nos dois Latossolos, evidenciando que as gramíneas, em comparação com as leguminosas, foram mais suscetíveis aos efeitos negativos nos atributos físicos do solo impostos pelos estados de compactação. Beutler et al. (2006), em trabalho conduzido em um Latossolo Vermelho de textura média com 4 cultivares de soja, observaram que a produtividade decresceu a partir de valores de resistência do solo à penetração de 2,24 a 2,97 MPa em função das cultivares estudadas.

2.2 Sistemas de preparo do solo

O preparo de solo pode ser definido como a manipulação mecânica, com as finalidades de destorroar e misturar o solo, erradicar ervas daninhas, incorporar resíduos de cultura e adubos, e de criar um grau de compactação ótimo para o crescimento radicular (GIL e VANDEN BERG, 1968). Há tempos atrás para a implantação de qualquer cultura era necessário o preparo do solo, que quase sempre envolvia a utilização de arados e grades, sendo que quanto mais se

pulverizava o solo melhor era considerado o preparo (INOUE, 2003). Atualmente, esse pensamento sofreu mudanças, visto o desenvolvimento de pesquisas relacionando atributos do solo com qualidade e produtividade agrícola.

Do ponto de vista técnico, o sistema de preparo do solo deve contribuir para a manutenção ou melhoria da qualidade do solo e do ambiente, bem como para a obtenção de produtividade satisfatória das culturas no longo prazo (COSTA et al., 2003).

Segundo Dorneles (2011), os métodos de preparo podem variar desde aqueles que causam intensa mobilização do solo, como o preparo convencional, até os chamados preparos conservacionistas, nos quais o solo é pouco mobilizado ou trabalhado apenas na linha de semeadura, como é o caso do plantio direto.

O preparo convencional do solo consiste no revolvimento mecânico das camadas superficiais, geralmente se utiliza uma aração e duas gradagens (FASINMIRIN e REICHERT, 2011), para reduzir a compactação, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água, além de facilitar o desenvolvimento das raízes das plantas. Para Carvalho Filho et al. (2007), as operações de aração e gradagens são denominadas respectivamente como preparo primário e secundário. O preparo periódico primário do solo é caracterizado por operações mais profundas, realizadas principalmente por arados de discos ou de aivecas tendo como objetivo cortar, elevar e inverter a leiva do solo. Durante este preparo ocorre a incorporação da vegetação e dos restos culturais. No preparo secundário têm-se as operações realizadas pelas grades, principalmente de discos lisos, recortados ou lisos e recortados; visando nivelar e destorroar o solo, incorporar herbicidas, corretivos e fertilizantes, e eliminar as plantas daninhas (ALVARENGA et al., 2002; BENTIVENHA et al., 2003).

O sistema de plantio direto caracteriza-se pelo revolvimento do solo apenas no sulco da semeadura, com rotação de culturas e manutenção da palhada na superfície do solo (BEUTLER et al., 2007). Com isso, proporciona redução dos processos erosivos, pela ausência de mobilização e presença da cobertura vegetal do solo, atua na melhoria das condições estruturais e biológicas do solo, eleva sua capacidade de infiltração e retenção de água e seu teor de matéria orgânica, diminui as variações de temperatura do solo, apresenta menor perda de água por evaporação promovendo, portanto, a preservação do meio ambiente e no aumento da produtividade agrícola (FASINMIRIN e REICHERT, 2011). No entanto esse

sistema tende a proporcionar formação de camadas compactadas no solo ocasionado pelo tráfego de máquinas e implementos, provocando alterações na estrutura do solo (CAMARA e KLEIN, 2005). Em virtude das práticas utilizadas e do tempo de adesão, pode resultar em aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, a compactação do mesmo, um dos principais problemas físicos que afeta a dinâmica da água e limita a produtividade das culturas (CAMARA e KLEIN, 2005; BEUTLER et al., 2007).

Como os sistemas de preparo trabalham o solo de diferentes formas, diversos trabalhos são desenvolvidos buscando verificar as alterações provocadas nas propriedades físicas e químicas e nas culturas. Falleiro et al. (2003), em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo câmbico, verificou que o plantio direto propiciou maiores valores de densidade do solo quando comparados aos outros tratamentos. Corsini e Ferraudó (1999), em trabalho desenvolvido em Latossolo Roxo epieutrófico textura argilosa, concluíram que a subsolagem com aração e gradagem, operações presentes no preparo convencional do solo, aumentaram a porosidade da camada superficial do solo bem como o potencial de desenvolvimento radicular, já o plantio direto, nos três primeiros anos agrícolas, diminuiu a porosidade e o desenvolvimento radicular da camada superficial do solo. Boukouna (2009), estudando as propriedades físicas de um Argissolo Vermelho Distrófico típico textura franco argilo arenosa, submetido a diferentes sistemas de preparo de solo (plantio direto, preparo convencional e preparo reduzido), observou que a densidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m foi significativamente menor quando foram utilizados arados de disco e grade niveladora ao observado no plantio.

Trein (1988), encontrou melhores resultados de produtividade na cultura do milho em um Argissolo Vermelho, quando este foi submetido a aração e gradagens niveladoras. Dorneles (2011), encontrou resultados estatisticamente superiores para a produtividade da soja em um Argissolo Vermelho distrófico típico textura franco argilo siltosa, quanto este foi submetido ao preparo convencional do solo, já para a cultura do milho, os melhores resultados foram encontrados no sistema de plantio direto, não diferindo estatisticamente dos outros sistemas. Fontanela (2012), estudando os efeitos dos sistemas de preparo convencional e direto na produtividade das culturas da cana-de-açúcar e mandioca, observou em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura franco arenosa que, na cultura da cana-de-açúcar o plantio direto propiciou a maior produtividade ($112,68 \text{ Mg ha}^{-1}$)

não apresentando diferença estatística do preparo convencional ($94,43 \text{ Mg ha}^{-1}$), para a cultura da mandioca o plantio direto propiciou também a maior produtividade ($32,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) não diferindo estatisticamente do preparo convencional ($24,3 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Os diferentes implementos disponíveis para o preparo do solo provocam alterações nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Cada implemento trabalha o solo de maneira própria, alterando, de maneira diferenciada, estas propriedades (SÁ, 1998). Os principais implementos utilizados no preparo do solo são os arados, grades, subsoladores e escarificadores.

A aração constitui-se numa operação de inversão de camadas do solo, trazendo benefícios tais como: aeração do solo; melhor penetração, movimentação e retenção de água; quebra e incorporação da matéria orgânica e de adubos verdes; controle de ervas daninhas e incorporação de fertilizantes e corretivos. Os arados podem ser classificados de diversas formas, dentre estas, de acordo com o órgão ativo, podendo ser de discos ou de aivecas (GALETI, 1988). Os arados de aiveca promovem melhor inversão da leiva e apresentam maior capacidade de penetração, invertendo as camadas do solo com menor efeito de esboroamento. Os resíduos culturais ficam depositados no fundo da camada arada e pouco misturados ao solo. Os arados de discos trabalham melhor em condições mais adversas, mas a leiva é invertida em inclinações menores e o efeito de esboroamento do solo é maior. Os resíduos culturais ficam mais próximos à superfície e bastante misturados ao solo (BALASTREIRE, 1990 *apud* FONTANELA, 2012). Stone e Moreira (1999), em trabalho desenvolvido em um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa sob irrigação, estudaram os efeitos de diferentes sistemas de preparo na compactação do solo e no compartimento do feijoeiro, os autores observaram que quando o arado de aivecas foi utilizado, menores valores de resistência á penetração e uma distribuição mais uniforme do sistema radicular ao longo do perfil do solo foram encontrados, entretanto, isso não propiciou maior produtividade do feijoeiro quando comparado aos demais sistemas de preparo do solo.

Para Stolf et al. (2008), o método mais comum de mobilização do solo é realizado inicialmente com grades da classe média (intermediária) e/ou pesada (aradora), para descompactação da primeira camada do solo e corte do material vegetal. Esta operação é complementada pela grade niveladora com o objetivo de destorroar e nivelar a superfície do solo, finalizando a operação. Ainda, segundo

Galeti (1988), a operação de gradagem pode ser utilizada também para eliminar ervas daninhas, cortar restos culturais, propiciar o enterrio de sementes, de fertilizantes e de corretivos e realizar controle de erosão para construções de práticas mecânicas de conservação do solo. Viana et al. (2006), relatam que as grades pesadas, assim como os outros implementos de discos, são agentes causadores de maior compactação a menor profundidade, pois o peso total do implemento é distribuído numa área muito pequena do disco. Cortez et al. (2011), em trabalho desenvolvido em um Argissolo Amarelo distrófico típico textura arenosa com três tipos de grades, não encontram diferenças significativas para a densidade do solo nas camadas estudadas em função dos implementos utilizados, já para a porosidade total foram observados valores significativamente menores quando foram utilizados uma grade com discos de 0,61 m de diâmetro e escarificador, não diferindo este um do outro. Ainda estes autores puderam concluir que a resistência mecânica à penetração apresentou valores adequados até a profundidade de trabalho dos implementos e foi alta nas camadas situadas abaixo, exceto para o preparo realizado com o escarificador.

A escarificação é uma técnica de preparo do solo que propõem mínima mobilização mantendo, sobretudo, os restos culturais na superfície do solo e atuando com uma das alternativas recomendadas, frequentemente, para reduzir os efeitos da compactação dos solos e, conseqüentemente, reduzir a densidade e aumentar a porosidade (FASINMIRIN e REICHERT, 2011). Os escarificadores contêm hastes que são utilizados no manejo do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos por não promoverem uma inversão de camadas, obtendo-se com isto, maior capacidade operacional e, principalmente, menor alteração da estrutura do solo. São utilizados no preparo do solo e rompimento de camadas sub-superficiais compactadas, facilitando, assim, a penetração das raízes e a infiltração da água no solo (FONTANELA, 2012). Camara e Klein (2005), verificaram em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa, que a escarificação diminuiu a densidade do solo e, propiciou maior infiltração de água, condutividade hidráulica do solo saturado e rugosidade superficial em relação ao plantio direto. Não verificaram diferença significativa entre os manejos para os parâmetros porosidade total e macroporosidade do solo. Em trabalho desenvolvido em um Latossolo Roxo distrófico textura muita argilosa submetido a cinco tratamentos de preparo primário do solo, sendo eles grade pesada/grade pesada;

escarificador/escarificador; escarificador/grade niveladora; escarificador/semeadura direta e semeadura direta/semeadura direta De Maria et al. (1999), encontraram que a utilização do escarificador resultou em maior uniformidade do perfil e menores valores de densidade e resistência, indicando, também, maior porosidade do solo, mesmo em combinação com o sistema de semeadura direta no inverno.

2.3 A cultura do milho

O milho (*Zea mays*) é uma cultura pertencente a família das *Poaceae*. O caráter monóico e a sua morfologia característica resultam da supressão, condensação e multiplicação de várias partes da anatomia básica das gramíneas. Os aspectos vegetativos e reprodutivos da planta de milho podem ser modificados por meio da interação com os fatores ambientais que afetam o controle da ontogenia do desenvolvimento (MAGALHÃES et al., 1994).

O Brasil produziu na safra 2012/2013, 81 milhões de toneladas de milho em uma área de 15,8 milhões de hectares, e segundo estimativa da CONAB (2014) espera-se uma leve redução na área da ordem de 2% e 2,5% na produção para a safra de 2013/2014. Ainda segundo estimativa da CONAB (2014) para a safra 2013/2014, a região Norte e Nordeste apresentará 20,1% de aumento da produção que passará de 6,5 milhões toneladas para 7,8 milhões de toneladas.

Para Salviano et al. (1980) *apud* Choudhury et al. (1991) a exploração do milho nas áreas irrigadas contribui para a implantação de um programa de rotação de culturas, visando a redução da incidência de pragas e doenças, a utilização do efeito residual dos fertilizantes e o uso de restos culturais para alimentação de animais, devido ao seu alto valor nutritivo.

Carvalho et al. (2012) avaliaram o desempenho de híbridos de milho na região nordeste do Brasil, em duas rede de ensaios, sendo que a primeira rede englobou 15 ambientes e a segunda 13 ambientes em cultivo de sequeiro. Para a primeira rede de ensaios foram encontradas resultados de produtividade média variando 7,52 Mg ha⁻¹ e 7,40 Mg ha⁻¹ para a segunda rede, assim, evidenciando capacidade de bons potenciais produtivos para a região Nordeste do Brasil.

De acordo com Aldrich et al. (1975) *apud* Boller et al. (1998), um leito de semeadura ideal para a implantação da cultura do milho deve prover boas condições para a germinação e desenvolvimento inicial das raízes das plântulas, proporcionar adequado controle de plantas daninhas, permitir a operação sem problemas de máquinas para a semeadura e para o cultivo, preservar ou melhorar a agregação do solo e permitir a máxima infiltração de água possível.

Na cultura do milho os resultados referentes aos diferentes manejos do solo são também bastante diferenciados. Maiores produtividades de milho no sistema de plantio direto, em relação a outros sistemas de manejo do solo, foram relatados por Hernani (1997) e Ismail et al. (1994) *apud* Kluthcouski et al. (2000), e menores por Oliveira et al. (1989), Balbino et al. (1994). Mello Ivo e Mielniczuk (1999), em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Escuro com três sistemas de preparo do solo (Convencional, Reduzido e Direto), não encontram diferenças significativas na produtividade da cultura do milho em função dos sistemas.

O preparo com arado de aivecas é pouco usado pois requer maior tempo e energia para a sua operação que os demais, embora possa resultar em maiores produtividades de milho, soja e trigo (BALBINO; OLIVEIRA, 1992; KOCHHANN; DENARDIM, 1997; KLUTHCOUSKI et al., 2000, *apud* YOKOYAMA et al., 2002), quando comparado ao sistema de plantio direto ou ao preparo com grade aradora. Isso ocorre devido ao desenvolvimento inferior do sistema radicular nesses tipos de preparo, por causa da compactação do solo na camada superficial ou subsuperficial, respectivamente (YOKAYAMA et al., 2002). Kluthcouski et al. (2000), em trabalho envolvendo quatro tipos de manejos de solo (plantio direto (PD); escarificação profunda (EP); grade aradora (GA) e aração profunda com aivecas (AP)) e três níveis de adubação em um Latossolo Roxo eutrófico textura franco argilo arenosa, encontraram para a produtividade significância na aração em relação aos demais manejos, seguido pela escarificação profunda, grade aradora e plantio direto. Yokoyama et al. (2002), também observaram melhores produtividades de grãos na cultura do milho quando um Latossolo Vermelho perférico foi preparado com arado de aivecas, que na média dos seis anos de avaliação foi, 9% e 7% superior às obtidas no preparo com grade e no plantio direto, respectivamente. Corsini e Ferraudo (1999), em trabalho desenvolvido em Latossolo Roxo epiutrófico textura argilosa submetidos a diferentes sistemas de cultivo, observaram que a subsolagem com

aração e gradagem aumentou a porosidade da camada superficial do solo, bem como o potencial de desenvolvimento radicular da cultura do milho.

Rosolem et al. (1994), observaram que o aumento da densidade do solo de 1,03 para 1,72 Mg.m⁻³ aumentou a resistência à penetração de 0,05 para 2,0 MPa, causando total impedimento ao crescimento de raízes de milho. Freddi (2007), estudando o efeito de compactação adicional em um Latossolo Vermelho textura média observou que, apenas uma passada com trator de 4,0 Mg no conteúdo de água equivalente a capacidade de campo, foi suficiente para elevar a densidade do solo acima de 1,46 Mg m⁻³, limitante a produtividade de grãos da cultura do milho.

A resistência mecânica à penetração pode restringir o desenvolvimento radicular do milho, e diversos trabalhos são desenvolvidos com o intuito de determinar limites críticos ao desenvolvimento da cultura. Tavares Filho et al. (2001) afirmaram que a resistência à penetração de um Latossolo Roxo textura argilosa de 3,5 MPa não restringiu o desenvolvimento radicular do milho, porém influenciou a sua morfologia. Foloni et al. (2003) em estudo realizado com dois materiais de milho, em um Latossolo Vermelho distroférrico textura média, encontraram que para ambos os materiais a compactação do solo influenciou negativamente o crescimento radicular e aéreo, ainda que uma resistência do solo à penetração da ordem de 1,4 MPa impedia que o sistema radicular do milho se desenvolvesse em profundidade. Freddi (2007) em um Latossolo Vermelho textura média verificou que o aumento da resistência mecânica do solo à penetração acima de 1,65 MPa restringiu as características agrônômicas e a produtividade do milho e para um Latossolo Vermelho Eutroférrico de textura argilosa quando a resistência mecânica à penetração do solo atingiu o valor de 1,16 MPa a produtividade do milho foi significativamente menor. Freddi et al. (2009) em trabalho desenvolvido em um Latossolo vermelho distrófico típico textura média, relatam que a produtividade de dois híbridos de milho foi significativamente menor quando a resistência do solo à penetração atingiu o valor de 2,15 MPa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O experimento foi conduzido em Petrolina-PE, no Campus de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, localizado nas coordenadas geográficas, 9°19'10" de latitude sul e 40°33'39" de longitude oeste, com altitude média de 376 m. A área utilizada para o experimento encontrava-se em pousio desde 2006. Segundo Brasil (1973), utilizando a classificação de Köppen, o clima da região onde estava localizada a área experimental é tropical semiárido, tipo BSw'h' caracterizado como muito quente, semi-árido tipo estepe com escassez e irregularidade de precipitações. Os dados climáticos da região durante o desenvolvimento da cultura estão apresentados na Figura 1.

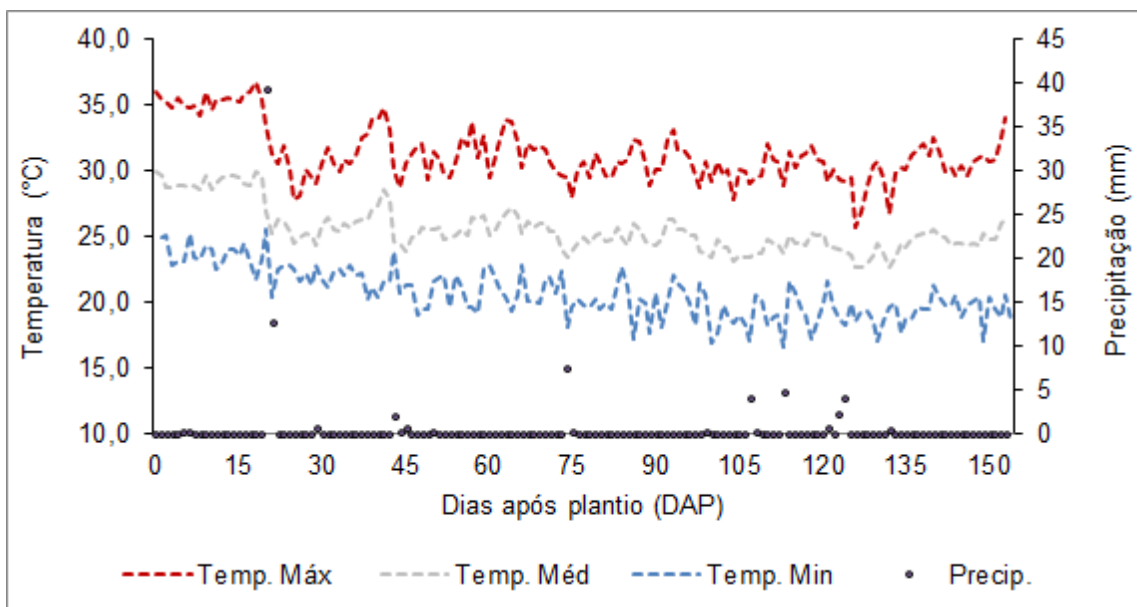


Figura 1. Dados climáticos da região durante desenvolvimento da cultura. Fonte: UNIVASF/CCA.

O solo onde foi desenvolvido o experimento é classificado como Argissolo Amarelo Distrófico típico textura arenosa segundo Amaral et al. (2006), utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). A composição

granulométrica e a umidade gravimétrica do solo (US) no momento do preparo do solo, da aplicação dos níveis de compactação e da medição da resistência mecânica do solo para as camadas de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,40 m encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Composição granulométrica, umidade gravimétrica do solo (US) no momento do preparo do solo, da aplicação dos níveis de compactação e da medição da resistência mecânica do solo nas profundidades do Argissolo Amarelo.

Profundidade	Argila	Areia	Silte	US: Preparo do solo	US: Níveis de compactação	US: Resistência mecânica
m	kg kg ⁻¹			kg kg ⁻¹		
0,00 - 0,10	0,09	0,88	0,03	0,112	0,088	0,078
0,10 - 0,20	0,10	0,88	0,02	0,096	0,088	0,090
0,20 - 0,30	0,08	0,85	0,07	0,088	0,080	0,075
0,30 - 0,40	0,14	0,81	0,05	0,071	0,082	0,079

A análise química do solo na área em que foi desenvolvido o experimento, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do Argissolo Amarelo na camada de 0,00 – 0,20 m.

MO	pH	C.E.	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H + Al	S	CTC	V
g kg ⁻¹	H ₂ O	dS m ⁻¹	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			%		
6,52	5,9	0,48	48	0,33	1,5	0,6	0,01	0,05	1,32	2,44	3,76	65

A área onde foi instalado o experimento possui sistema de irrigação por aspersão convencional malha fixa, que foi utilizado para manutenção da umidade do solo no momento do preparo, aplicação das compactações, coleta de dados e manutenção hídrica da cultura. A irrigação da cultura seguiu os volumes sugeridos por Andrade et al. (2006) em função da fase fenológica e demanda evaporativa, com isso, foram aplicados durante todo o ciclo da cultura aproximadamente 590 mm.

3.2 Insumos e equipamentos

No dia 01 de março de 2013 foi realizada a operação com os implementos de preparo do solo e no dia 27 de março de 2013 foram aplicados os níveis de

compactação, para isso, foi utilizada a segunda marcha reduzida do trator, correspondendo a uma velocidade de 3,88 km h⁻¹. Antes da aplicação dos níveis de compactação, toda a área experimental recebeu gradagem niveladora.

Para o desenvolvimento das atividades agrícolas foram utilizados os equipamentos descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Equipamentos agrícolas utilizados no experimento.

Equipamento	Marca	Modelo	Características
Grade Niveladora	TATU Marchesan	GH	Grade leve em <i>tandem</i> com 7 discos de 0,51 m de diâmetro (20") em cada uma das quatro seções, sendo 14 recortados na dianteira e 14 lisos na traseira. Largura de trabalho de 2,62 m, e profundidade de trabalho de 0,06 – 0,12 m. Discos espaçados de 0,19 m. Massa do implemento de 519 kg.
Grade Aradora	TATU Marchesan	ATCR	Grade leve <i>off-set</i> com 7 discos recortados de 0,61 m de diâmetro (24") em cada uma das duas seções. Largura de trabalho de 1,5 m, e profundidade de trabalho entre 0,10 - 0,18 m. Discos espaçados de 0,23 m. Massa do implemento de 1465 kg.
Arado de Aivecas	Maschietto	ARH ²	Arado de aivecas reversível, com duas aivecas recortadas de 0,41 m de comprimento (16"). Largura de trabalho de aproximadamente 1,0 m, e profundidade de trabalho entre 0,2 – 0,4 m. Massa do implemento de 570 kg.
Escarificador	TATU Marchesan	AST	Escarificador com 3 hastes espaçadas de 0,34 m, ponteira estreita de 0,05 m. Largura de trabalho de 0,7 m, e profundidade de trabalho de até 0,35 m. Massa do implemento de 292 kg.
Semeadora - Adubadora	TATU Marchesan	T ² SI	4 Linhas com espaçamento máximo de 0,9 m e mínimo de 0,45 m. Massa do implemento de 675 kg.
Trator	Valtra	785 TDA	Potência de 55.2 kW (75cv) com pneus dianteiros 12.4 - 24 R1 e traseiros 18.4 - 30 R1. Massa do equipamento de aproximadamente 3,5 ton.

O milho semeado na área foi o híbrido simples DKB390PRO cujas principais características são: 845 graus dias para florescimento; altura média de plantas de 2,2 – 2,4 m; altura de inserção da espiga de 1,25 – 1,4 m; grãos semiduro amarelo alaranjado; destinado para a produção de grãos. A operação de semeadura foi realizada no dia 28 de março de 2013, de forma mecânica, utilizando semeadora adubadora regulada para distribuir 7,6 sementes por metro. Quando a cultura atingiu

o estádio V3 (MAGALHÃES e DURÃES, 2006), foi realizado desbaste objetivando-se uma população final de 6 plantas por metro.

A adubação foi baseada na recomendação feita pela CFSEMG (1999) para produtividades de 6 - 8 Mg ha⁻¹ de grãos, sendo realizada da seguinte maneira: a adubação de semeadura foi constituída de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 6-24-12 (NPK) contendo 6% de Ca e 6% de S, com isso, as seguintes quantidades de nutrientes foram aplicadas; 24 kg ha⁻¹ de N; 96 kg ha⁻¹ de P₂O₅; 48 kg ha⁻¹ de K₂O; 24 kg ha⁻¹ de Ca e 20 kg ha⁻¹ de S. As adubações de cobertura foram realizadas utilizando 150 kg ha⁻¹ da fórmula 20-0-20 (NPK) aos 15, 25 e 35 dias após emergência (DAE). No total foram aplicadas as seguintes quantidades de cada nutriente; 114 kg ha⁻¹ de N; 96 kg ha⁻¹ de P₂O₅; 138 kg ha⁻¹ de K₂O; 24 kg ha⁻¹ de Ca; 20 kg ha⁻¹ de S.

Para a determinação da Umidade do solo (US), Densidade do solo (Ds) e Porosidade total (Pt) foram utilizados anéis metálicos com capacidade de 128 cm³, além de estufa de secagem com controle digital de temperatura e balança digital eletrônica com capacidade máxima de 5000 g e mínima de 200 g e precisão de 0,01g.

Para a determinação da Resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi utilizado penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar desenvolvido por Stolf et al. (1983), com as seguintes características; massa do êmbolo de 4 kg, curso de queda livre de 0,4 m, cone com 0,0128 m de diâmetro e ângulo sólido de 30° e haste com diâmetro aproximado de 0,01 m.

Para as determinações de Altura de planta (AP) e Altura de inserção da primeira espiga (APE) foi utilizado um bastão trena com altura de 3,0 m com precisão de 0,05 m. Para as determinações de Diâmetro de colmo (DC), Comprimento de espiga (CE) e Diâmetro de espiga (DE) foi utilizado paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Para a determinação da Matéria seca das raízes (MSR) foram utilizados monólito cilíndrico adaptado com volume de 2,1 dm³, peneiras de 2,0 mm, estufa de secagem com controle digital de temperatura e balança digital eletrônica com capacidade máxima de 5000 g e mínima de 200 g e precisão de 0,01 g. Para a determinação da matéria seca das plantas (MSP) foram utilizados, estufa de secagem com controle digital de temperatura e balança digital eletrônica com capacidade máxima de 5000 g e mínima de 200 g e precisão de 0,01 g. Para as determinações de massa de 1000 grãos (MG) e produtividade (PG) foi utilizada

balança digital eletrônica com capacidade máxima de 5000 g e mínima de 200 g e precisão de 0,01 g.

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram constituídos por três tipos de implementos de preparo do solo (IP_1 = grade aradora; IP_2 = arado de aivecas e IP_3 = escarificador) e quatro níveis de compactação (NC_0 = solo não trafegado; NC_3 = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC_6 = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC_9 = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). Para os tratamentos SP_2 e SP_3 foi realizada uma gradagem prévia com a finalidade de incorporação das plantas espontâneas. Para a simulação dos níveis de compactação, o trator trafegou por toda a parcela experimental de forma que os pneus comprimiram áreas paralelas entre si. O número de vezes que o trator trafegou variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC) em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, sendo dispostas nas parcelas os implementos de preparo do solo e nas subparcelas os níveis de compactação.

Cada parcela experimental ocupou área de $12,6 \text{ m}^2$ e foi constituída de quatro fileiras de milho espaçadas de 0,9 m com 3,5 m de comprimento, considerando como útil as duas linhas centrais. Sendo assim, a área útil da parcela foi de $6,3 \text{ m}^2$.

3.4 Avaliações

3.4.1 Atributos físicos do solo

No dia 07 de abril de 2013, na entrelinha da cultura, em um ponto por subparcela, foram avaliados nas camadas de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30 e 0,30 - 0,40 m os seguintes atributos físicos do solo: US, Ds, Pt e RP.

A US foi determinada empregando-se o método gravimétrico (EMBRAPA, 2011). Amostras deformadas foram coletadas aleatoriamente na área experimental. A equação 1, representa como foi calculada a US.

$$US = \frac{Mu - MS}{Ma - MS} * 100 \quad (\text{equação 1})$$

em que,

US: Umidade do solo (%),

Mu: Massa úmida do solo (g),

Ms: Massa seca do solo (g),

Ma: Massa do anel (g).

Para a determinação da Ds foi utilizada a metodologia do anel volumétrico, seguindo a recomendação da EMBRAPA (2011). A equação 2, representa como foi calculada a Ds.

$$Ds = \frac{Ms}{V} \quad (\text{equação 2})$$

em que,

Ds: Densidade do solo (Mg m^{-3}),

Ms: Massa seca do solo (Mg),

V: Volume do anel (m^3).

A Pt foi determinada utilizando a metodologia descrita por Camargo et al. (1986). A equação 3 representa como foi calculada a Pt.

$$Pt = \frac{(Vt - Vs)}{Vt} * 100 \quad (\text{equação 3})$$

em que,

$Vs = Vt - Vv$ e $Vv = (Msat - Ms)$

Pt: Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$),

Vt: Volume total (cm^3),

Vs: Volume de sólidos (cm³),
 Vv: Volume de vazios (cm³),
 Msat: Massa do solo saturado (g),
 Ms: Massa do solo seco (g).

A RP foi determinada conforme instrução apresentada por Stolf et al. (1983). Os dados obtidos foram transformados em MPa conforme metodologia adaptada de Stolf (1991).

$$RP = 0,56 + 0,689N \quad (\text{equação 4})$$

em que,

RP: Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)

N: Número de impactos

3.4.2 Características agrônomicas da cultura

Foram realizadas as seguintes avaliações: Altura de plantas (AP), Altura de inserção da primeira espiga (APE), Diâmetro do colmo (DC), Número de grãos (NG), Fileiras da primeira espiga (FE), Comprimento de espiga (CE), Diâmetro de espiga (DE), Matéria seca das plantas (MSP), Matéria seca das raízes (MSR), Massa de 1000 grãos (MG) e Produtividade (P). As avaliações de AP, APE e DC foram realizadas no estágio de R1 (Estilos-estigmas estão visíveis), conforme escala proposta por Magalhães e Durães (2006).

Foram utilizadas 6 plantas por parcela na área útil, para determinação da AP, APE e DC. A AP foi determinada a partir do nível do solo até a inserção da folha bandeira. A APE foi determinada a partir do nível do solo até o ponto de inserção da primeira espiga. O DC foi determinado utilizando-se a média de duas medidas do segundo internódio após o nível do solo (FREDDI, 2007).

No dia 15 de julho de 2013 foi realizada a colheita do experimento. Foram utilizadas 6 plantas por subparcela na área útil, para determinações de NG, FE, CE, DE, MG e MSR. O NG foi determinado contando-se os grãos das espigas

amostradas. Para determinação do FE foram contadas o número de fileiras das espigas amostradas. O CE foi determinado medindo-se a distância entre a base da espiga até seu ápice. Para a determinação do DE foi tomada a medida no centro da espiga. Para determinação do MG foi utilizado o NG. Estes foram pesados e os valores obtidos transformados (regra de três simples) em peso de 1000 grãos. Para determinação da MSR foram coletadas raízes a 0,15 m de profundidade empregando-se o método do monólito (BOHN, 1979). As raízes foram separadas do solo por meio de lavagem com jato d'água, sendo posteriormente levadas para estufa com ventilação forçada a 65°C até atingirem peso constante. A PG e a MSP foram determinadas em 1 m² da área útil de cada subparcela e os valores encontrados foram extrapolados para um hectare. A P foi obtida pesando-se a massa de grãos e considerando uma umidade padrão de 13%. Para determinação da MSP utilizou-se as plantas inteiras, que foram levadas para estufa com ventilação forçada a 65°C, até atingirem peso constante.

3.5 Análise dos dados

Os dados dos atributos físicos do solo, foram submetidos à análise de variância em função das camadas estudadas, e quando observado significância estatística a 5% pelo teste de F, utilizou-se o teste de Tukey a 5% para comparação de médias. As características agronômicas da cultura também foram submetidas à análise de variância, e observando significância estatística a 5% pelo teste de F, utilizou-se para os implementos de preparo do solo comparações de médias pelo teste de Tukey a 5% e ajustadas regressões para os níveis de compactação. Foram feitas análises de correlação de Person entre a Ds e a RP e seus valores submetidos ao teste de t a 5%. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SISVAR (FERREIRA, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos físicos do solo

4.1.1 Densidade do solo (Ds)

Os valores de Ds foram influenciados pelos implementos de preparo do solo e pelos níveis de compactação ($p < 0,05$), sendo a interação destes fatores não significativa, com isso, estudaram-se seus efeitos separadamente em função das camadas do solo (Tabela 4).

Tabela 4. Teste de F para Densidade do solo (Mg m^{-3}) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Teste de F	Camadas do solo (m)			
	0,00 – 0,10	0,10 – 0,20	0,20 – 0,30	0,30 – 0,40
IP	27,12*	0,58 ^{ns}	2,71 ^{ns}	0,50 ^{ns}
NC	7,50*	0,96 ^{ns}	0,99 ^{ns}	3,10*
Interação IP x NC	1,75 ^{ns}	0,65 ^{ns}	1,05 ^{ns}	1,23 ^{ns}
C.V. (%) – IP	1,60	5,88	2,95	5,93
C.V. (%) – NC	4,89	3,62	3,11	3,88

ns = não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%); IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

Os valores de Ds para os implementos de preparo do solo e para os níveis de compactação, considerando-se todas as camadas estudadas, variou de 1,64 a 1,83 Mg m^{-3} , sendo superiores aos encontrados por Cortez et al. (2011), que oscilaram entre 1,30 a 1,43 Mg m^{-3} em trabalho desenvolvido no mesmo tipo de solo. Apesar dos resultados encontrados, situarem-se próximo dos valores críticos de Ds propostos por Reichert et al. (2003), de 1,70 a 1,80 Mg m^{-3} para solos franco arenosos, estes podem vir a não causar prejuízos as culturas, conforme observado por Streck (2003), que verificou em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, que apenas Ds maior que 1,8 Mg m^{-3} e macroporosidade menor que 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

reduziram a altura da planta, a área foliar e a produtividade do feijoeiro, em torno de 50 %.

Na camada de 0,00 – 0,10 m, foram observados valores de Ds estatisticamente diferentes para os diferentes implementos de preparo do solo, sendo que o maior valor foi observado no SP₂ (1,76 Mg m⁻³) não diferindo do SP₃ (1,73 Mg m⁻³) (Figura 4). O SP₁ proporcionou o menor valor de Ds (1,69 Mg m⁻³), o que pode ser atribuído principalmente, ao fato de que as grades aradoras provocam destruição dos agregados deixando o solo mais solto. Além disso, esta menor Ds ocorreu na camada 0,00 – 0,10 m, pois o implemento trabalhou o solo a uma profundidade que variou entre 0,10 – 0,18 m. Nas demais camadas não foi possível observar diferenças na Ds em função dos implementos de preparo do solo utilizados. Feitosa et al. (2013), em trabalho realizado em Argissolo Amarelo textura arenosa, não encontrou diferenças estatísticas para a Ds entre os preparos e as camadas de solo avaliadas, entretanto, os menores valores de Ds observados na camada 0,00 – 0,10 m, foram encontrados quando o solo foi submetido a ação de grades semelhantes a utilizada neste trabalho. Mazurama et al. (2011), em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco argilo arenosa, encontrou para a camada de 0,03 – 0,12 m menores valores de Ds quando o solo foi submetido ao preparo envolvendo grades.

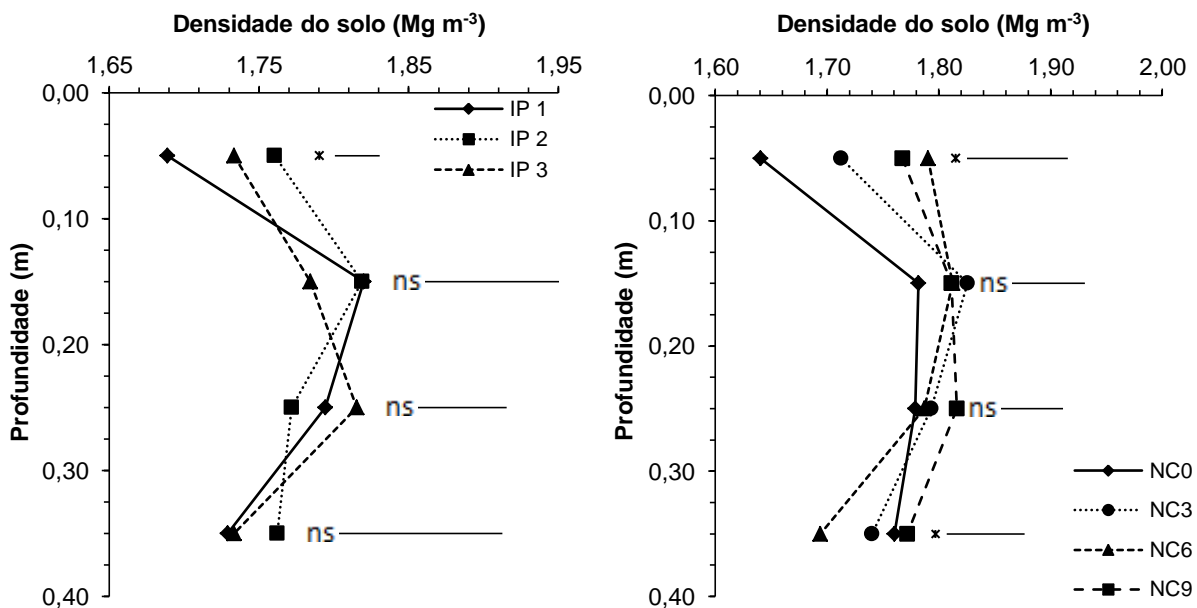


Figura 2. Densidade do solo em função dos implementos de preparo do solo (IP₁ = grade aradora; IP₂ = arado de aivecas e IP₃ = escarificador) e níveis de compactação (NC₀ = solo não trafegado; NC₃ = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC₆ = 6 passadas de trator de 3,5 Mg

e NC₉ = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). As linhas em cada camada representam o valor de DMS; ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Os valores de Ds foram estatisticamente diferentes para os níveis de compactação, apenas nas camadas de 0,00 – 0,10 m e 0,30 – 0,40 m, não sendo possível verificar diferenças nas demais camadas (Figura 4). Na camada de 0,00 – 0,10 m, o NC₀ proporcionou valor médio de Ds (1,64 Mg m⁻³) inferior aos obtidos no NC₆ (1,79 Mg m⁻³) e NC₉ (1,78 Mg m⁻³) sendo estatisticamente igual ao NC₃ (1,71 Mg m⁻³). NC₃, NC₆ e NC₉ geraram valores de Ds considerados críticos, de acordo com Reichert et al. (2003), podendo vir a interferir em aspectos produtivos da cultura. Na camada de 0,30 – 0,40 m as médias observadas no NC₀, NC₃ e NC₆ (1,73, 1,74 e 1,69 Mg m⁻³ respectivamente) foram estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, sendo que o NC₆ diferiu do NC₉ (1,79 Mg m⁻³), sendo este último estatisticamente igual aos dois primeiros (Figura 4). Streck et al. (2004), em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa, submetido a compactação adicional pelo tráfego de máquinas, também verificou aumento da Ds em função do número de passadas e observou para a camada de 0,05 – 0,10 m, que após quatro passadas, o valor de Ds foi estatisticamente superior em relação ao solo não trafegado. Resultados semelhantes também foram encontrados na camada de 0,08 – 0,11 m por Beutler et al. (2009), em Argissolo Vermelho Amarelo arênico.

4.1.4 Porosidade total (Pt)

Os resultados de Pt apresentaram valores estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) apenas na camada de 0,00 – 0,10 m em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação, sendo que a interação destes não foi significativa (Tabela 5).

Tabela 5. Teste de F para Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Teste de F	Camadas do solo (m)			
	0,00 – 0,10	0,10 – 0,20	0,20 – 0,30	0,30 – 0,40
IP	12,42*	0,70 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,54 ^{ns}
NC	7,36*	1,05 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,47 ^{ns}
Interação IP x NC	1,68 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,70 ^{ns}	1,45 ^{ns}
C.V. (%) – IP	4,88	12,01	5,93	10,12
C.V. (%) – NC	10,2	10,19	7,81	8,89

ns = não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%); IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

Na camada de 0,00 – 0,10 m observou-se que a maior Pt ocorreu no IP₃, que apresentou média estatisticamente superior às demais (Figura 3). Mazurana et al. (2011), trabalhando em Argiloso Vermelho Amarelo textura franco argilo arenosa com diferentes implementos de preparo do solo, encontrou maiores valores de Pt na camada de 0,12 - 0,20 m quando foram utilizados escarificadores. Para estes autores, tal fato ocorreu devido ao aumento de volume de macroporos, uma vez que os microporos foram destruídos pela ação dos escarificadores. Para Schaefer et al. (2001), o efeito do preparo sobre os valores de porosidade do solo pode ser pouco evidente, sendo mais comuns os efeitos na forma e na distribuição dos poros ao longo do perfil. Para o mesmo tipo de solo, Cortez et al. (2011) e Feitosa et al. (2013), encontraram valores muito superiores de Pt aos apresentados neste trabalho, possivelmente as condições iniciais do solo e o manejo empregado, propiciaram uma menor Ds, propriedade esta que tem relação estreita e inversa com a Pt, resultando em maiores valores.

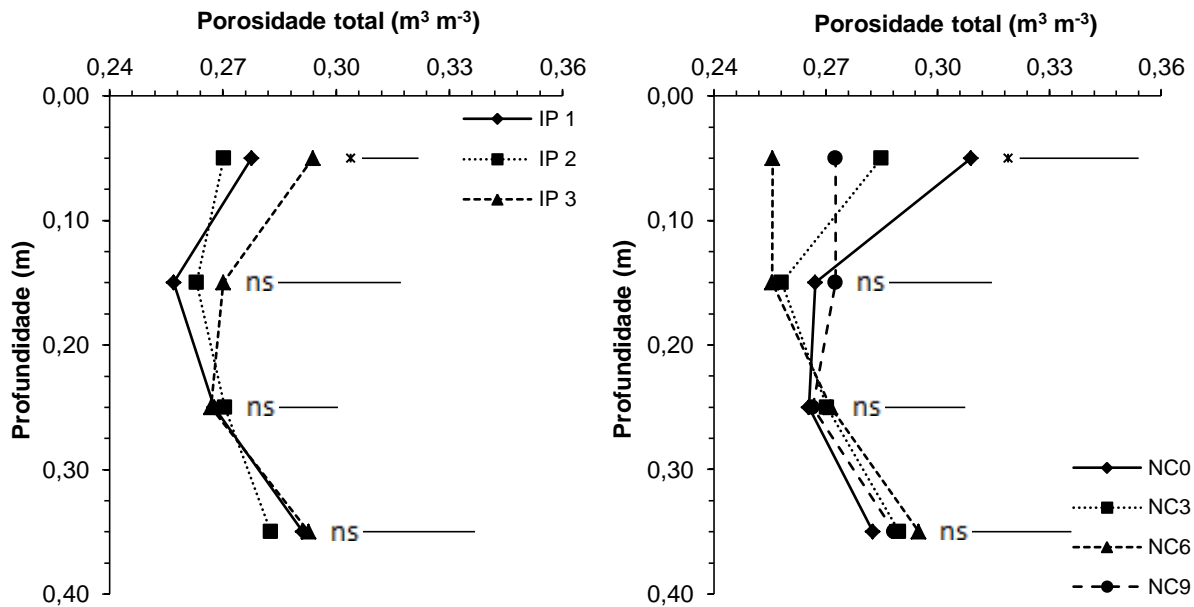


Figura 3. Porosidade total em função dos implementos de preparo do solo (IP₁ = grade aradora; IP₂ = arado de aivecas e IP₃ = escarificador) e níveis de compactação (NC₀ = solo não trafegado; NC₃ = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC₆ = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC₉ = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). As linhas em cada camada representam o valor de DMS; ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Assim como ocorreu para os implementos de preparo do solo, a Pt foi influenciada pelos níveis de compactação apenas na camada de 0,00 – 0,10 m, não sendo possível observar diferenças estatísticas ($p < 0,05$) para as demais camadas (Figura 3). Para a camada de 0,00 – 0,10 m o NC₀ (solo não trafegado) apresentou maior valor de Pt, valor este estatisticamente superior aos dos tratamento NC₆ e NC₉, sendo os dois últimos estatisticamente iguais.

O trator utilizado para a simulação das compactações, por possuir massa de 3,5 Mg, não propiciou redução da Pt nas camadas mais profundas, conforme observado por Streck et al. (2004) que, em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa, utilizou máquina de 10 Mg para simular compactações adicionais e encontrou diferenças significativas na Pt até a 0,30 m de profundidade. Segundo Salire et al. (1994), o fato é explicado pois a compactação abaixo da camada arável é função da carga total por eixo e a compactação em superfície é função da pressão de insuflagem dos pneus.

4.1.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RP)

A RP é um dos principais atributos físicos utilizados para a verificação do grau de compactação do solo que afeta direta e indiretamente o desenvolvimento das culturas. Apenas os níveis de compactação proporcionaram aumentos significativos ($p < 0,05$) nos valores de RP (Tabela 6).

Tabela 6. Teste de F para Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Teste de F	Camadas do solo (m)			
	0,00 – 0,10	0,10 – 0,20	0,20 – 0,30	0,30 – 0,40
IP	2,93 ^{ns}	4,24 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,06 ^{ns}
NC	12,95*	10,44*	6,81*	2,66 ^{ns}
Interação IP x NC	0,43 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,60 ^{ns}	1,12 ^{ns}
C.V. (%) – IP	25,06	26,60	46,38	29,66
C.V. (%) – NC	43,58	33,56	32,20	27,36

ns = não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%); IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

Para Taylor et al. (1966) e Silva et al. (1994) o valor de 2,0 MPa passa a ser restritivo para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas, já Sene et al. (1985) consideram como restritivos valores de RP maiores do que 6,0 MPa para solos arenosos e 2,5 MPa para solos argilosos. Valores superiores a 2,0 MPa foram encontrados em função dos implementos de preparo do solo utilizados neste trabalho (Figura 4).

Apesar de não terem sido observadas diferenças estatísticas, comportamentos contrastante foram observados nas camadas 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, em função dos implementos de preparo do solo. Na camada 0,00 – 0,10 m o IP₃ apresentou maior valor de RP que os demais implementos, ocorrendo o oposto na camada de 0,10 – 0,20. Possivelmente a ação das hastes do escarificador provocou rompimento da camada compactada reduzindo a RP. Resultados semelhantes foram encontrados por Mazurana et al. (2011) em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco argilo arenosa para as profundidade de 0,10 m e 0,20 m, onde foi verificado que a ação do escarificador munido de rolo destorroador reduziu a RP em 100 e 90%, respectivamente, quando comparado a sistema de semeadura direta. Collares

(2005) também constatou eficiência da escarificação em reduzir a compactação até 0,20 m de profundidade em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa.

Foi possível observar boa correlação entre a Ds e a RP nas camadas de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m em função dos níveis de compactação (Figura 4). Para Kaiser (2010), a resistência do solo à penetração apresenta uma relação direta com a densidade e inversa com a umidade do solo e são estes os fatores que controlam sua intensidade, em seu trabalho em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa, verificou melhor correlação entre US e RP. Rosa (2009) em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco argilo arenosa e Kamimura (2008) em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho textura arenosa observaram tendência linear de aumento da RP em função do aumento de Ds.

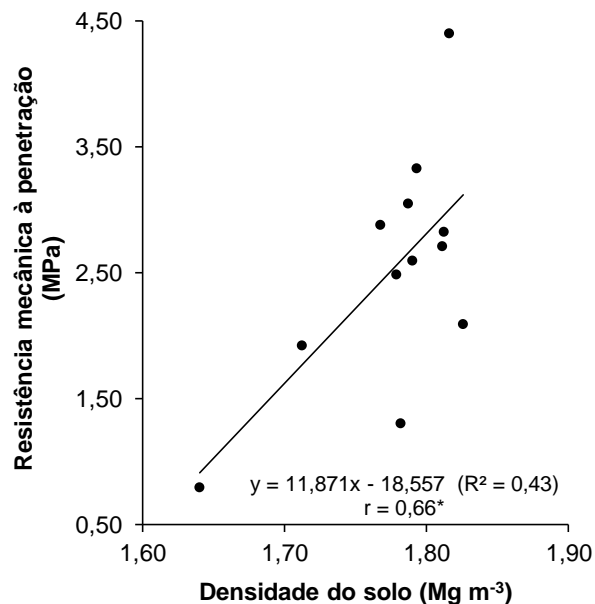


Figura 4. Relação entre a densidade do solo (Ds) e a resistência mecânica do solo à penetração (RP) do Argissolo Amarelo.

O tráfego de máquinas provocou aumento na RP até a profundidade de 0,30 m não sendo possível observar diferenças estatísticas entre os níveis de compactação abaixo desta (Figura 5), por esta razão, foram utilizados os valores de RP médios da camada de 0,00 – 0,30 m na discussão com os atributos relacionados com a cultura do milho. Resultados semelhantes foram encontrados por Beutler et al. (2009) em Argissolo Vermelho Amarelo arênico submetido a diferentes intensidades de tráfego, em que aumentos na RP foram observados até a camada de 0,25 m.

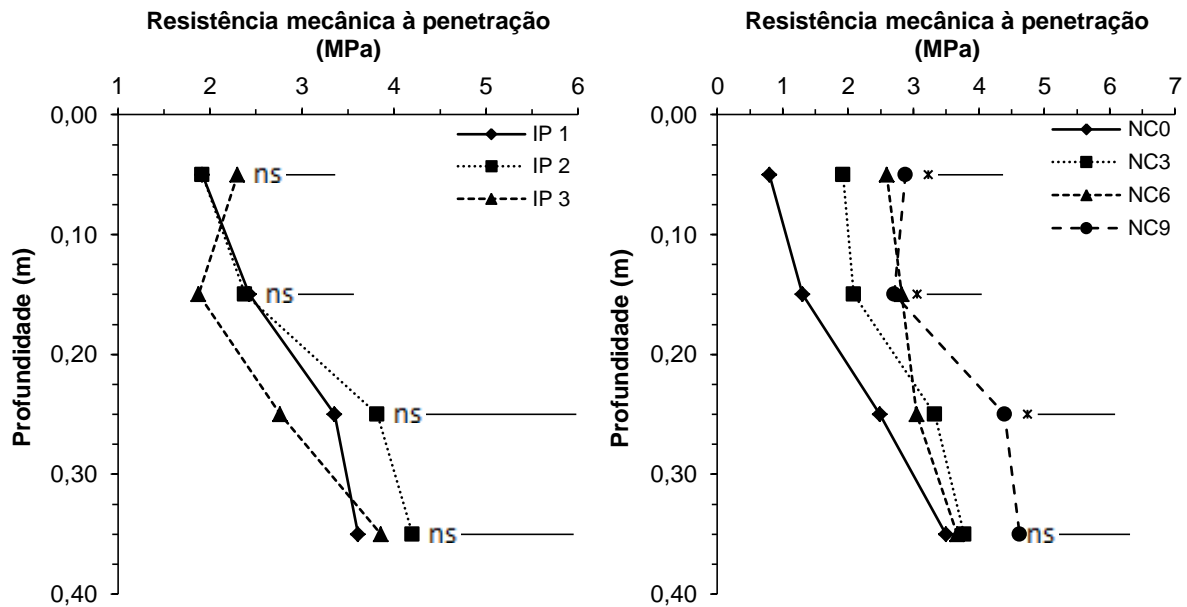


Figura 5. Resistência mecânica do solo à penetração em função dos implementos de preparo do solo (IP_1 = grade aradora; IP_2 = arado de aivecas e IP_3 = escarificador) e níveis de compactação (NC_0 = solo não trafegado; NC_3 = 3 passadas de trator de 3,5 Mg; NC_6 = 6 passadas de trator de 3,5 Mg e NC_9 = 9 passadas de trator de 3,5 Mg). ns = não significativo; * = significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Para a camada de 0,00 – 0,10 m o NC_0 proporcionou o menor valor de RP (0,79 MPa) sendo diferente estatisticamente dos demais, o NC_3 (1,92 MPa) apresentou média estatisticamente igual ao NC_6 (2,60 MPa) e ao NC_9 (2,88 MPa). Apenas o NC_0 e NC_3 apresentaram valores de RP menores que 2,0 MPa, sendo que o tráfego do trator proporcionou incremento de 143, 229 e 264% respectivamente para NC_3 , NC_6 , NC_9 na RP. Por meio da Figura 5 é possível observar que as maiores variações nos valores de RP foram encontradas na camada 0,00 – 0,10 m concordando com os resultados encontrados por Streck et al. (2004) em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa e por Bergamin et al. (2010) em Latossolo Vermelho textura muito argilosa. Segundo Botta et al. (2002) e Rosa (2009) elevados valores de RP na camada subsuperficial pode ser atribuídos à compactação gerada pelo tráfego e induzida pela repetição do número de passadas no mesmo local.

Na camada 0,10 – 0,20 m apenas no solo não trafegado (NC_0 = 1,30 MPa) foram observados valores de RP menores que 2,0 MPa não diferindo estatisticamente do tratamento submetido a 3 passadas de trator de 3,5 Mg (NC_3 = 2,09 MPa), e diferindo dos demais tratamentos (NC_6 = 2,82 MPa, NC_9 = 2,70 MPa). Para esta camada do solo o tráfego do trator proporcionou incremento na RP de 61,

117 e 108% respectivamente para 3, 6 e 9 passadas. Rosa (2009) em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco argilo arenosa, verificou que o tráfego (4 e 8 passadas de máquina com massa de 10 Mg) gerou maiores valores de RP na camada de 0,05 – 0,15 m independente do sistema de preparo utilizado.

Para as demais camadas estudadas todos os níveis de compactação impostos proporcionaram valores de RP superior a 2,0 MPa, inclusive quando o solo não foi trafegado. Isso conduz a duas possíveis hipóteses, a primeira de ordem pedôgenética, pois é característica dos Argissolos Amarelos o adensamento em profundidade em função do maior teor de argila (gradiente textural), e a segunda é de que os implementos utilizados no preparo da área, não trabalharam o solo abaixo da camada de 0,20 m. Esta área por ter estado em pousio por vários anos poderia ter como esta sua condição inicial. Para camada de 0,20 – 0,30 m o NC₀, NC₆ e NC₃ apresentaram médias (2,48, 3,05 e 3,33 MPa respectivamente) estatisticamente iguais, sendo que o NC₉ apresentou o maior valor de RP (4,40 MPa). Para esta camada o incremento na RP em função do tráfego do trator foi de 41, 34 e 77% respectivamente para 3, 6 e 9 passadas. Para a camada de 0,30 – 0,40 m não foram observadas diferenças estatísticas em função dos níveis de compactação impostos, sendo que o NC₉ proporcionou o maior valor de RP (4,62 MPa) e o NC₀ o menor (3,50 MPa). Fontanela (2012) também não observou diferenças significativas na RP abaixo da camada de 0,30 m em Argissolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa em função dos tratamentos utilizados. Para Landau et al. (2009) as raízes de milho se concentram nos primeiros 0,30 m sendo assim, os valores de RP encontrados em função dos níveis de compactação poderiam restringir ou mesmo impedir o crescimento do sistema radicular da cultura, Veen e Boone (1990) *apud* Albuquerque e Reinert (2001) relataram que as raízes de milho cessaram o crescimento quando a RP alcançou 4,7 MPa. Tavares Filho et al. (2001) em trabalho desenvolvido em Latossolo Roxo textura argilosa encontraram valores médios de RP na camada de 0,15 – 0,35 m de 3,91 e 4,09 MPa para o plantio direto e sistema convencional respectivamente, valores semelhantes aos observados neste trabalho, e muito superiores aos descritos na literatura como impeditivos, os autores puderam concluir que estes valores não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, porém influenciaram sua morfologia.

4.2 Características agronômicas da cultura

4.2.1 Alturas de planta (AP), Altura de inserção da primeira espiga (APE) e Diâmetro de colmo (DC).

Não houve interação significativa ($p < 0,05$) entre os implementos de preparo do solo e os níveis de compactação para AP, APE e DC, entretanto estes fatores foram influenciados pelos implementos de preparo do solo e pelos níveis de compactação separadamente. A Tabela 7 apresenta os resultados médios de AP, APE e DC em função dos implementos de preparo do solo.

Tabela 7. Teste de F e de médias para Altura de plantas (AP), Altura de inserção da primeira espiga (APE) e Diâmetro de colmo (DC) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Causas de Variação	Avaliações		
	AP (m)	APE (m)	DC (mm)
IP ₁	1,81 a	0,99 a	19,3 a
IP ₂	1,52 c	0,92 ab	20,7 a
IP ₃	1,69 b	0,87 b	19,6 a
Média	1,67	0,93	19,8
Teste de F			
IP	57,10*	12,59*	5,15*
NC	12,08*	7,32*	6,18*
Interação IP x NC	1,25 ^{ns}	1,99 ^{ns}	1,16 ^{ns}
C.V. (%) – IP	4,66	7,40	6,60
C.V. (%) – NC	8,82	7,68	10,61

Médias seguidas das mesmas letras nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. IP₁ = grade aradora; IP₂ = arado de aivecas; IP₃ = escarificador. ns = não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%); IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

O IP₁ proporcionou maior AP, sendo estatisticamente superior aos demais implementos de preparo do solo. O IP₃ apresentou média estatisticamente superior ao IP₂. Comportamento semelhante foi observado para APE, onde também o IP₁

proporcionou o maior valor, entretanto, este não diferiu estatisticamente do IP_2 , que não diferiu do IP_3 . Para o DC não foi possível verificar pelo teste de Tukey diferenças entre os implementos de preparo do solo. Provavelmente a alteração física proporcionada pelo IP_1 no solo favoreceu o desenvolvimento destas características da planta de milho. Carvalho et al. (2012) avaliaram o desempenho de híbridos de milho no nordeste brasileiro e, verificaram para o mesmo híbrido utilizado neste estudo, valor médio de AP de 2,05 m e APE de 1,09 m. Trein (1988) em estudo realizado em Argissolo Vermelho verificou maiores alturas de plantas de milho quando o solo foi preparado com arado de disco e grade niveladora.

Utilizando os valores médios de RP encontrados foi possível verificar que AP, APE e DC apresentaram comportamento linear decrescente a partir da RP de 1,53 MPa (Figura 6), resultando em reduções de 19, 14 e 15%, respectivamente para AP, APE e DC quando a RP alterou de 1,53 para 3,33 MPa. Os resultados encontrados neste estudo corroboram com Silva (1998) e Rossetti e Centurion (2013), que verificaram que o crescimento da parte aérea de plantas de milho respondeu negativamente ao aumento da RP e, com Freddi (2007) em trabalho semelhante desenvolvido em Latossolo Vermelho textura média. Este último encontrou para os mesmos parâmetros, valores linearmente decrescentes a partir da RP de 1,65 MPa. Ainda, Freddi (2007) encontrou em Latossolo Vermelho textura argilosa redução de 15, 18 e 10% na AP, APE e DC, respectivamente quando a RP aumentou de 0,32 para 1,83 MPa. Freddi et al. (2009) em trabalho semelhante em Latossolo Vermelho textura média encontrou redução linear na AP e DC quando a RP passou de 0,87 para 2,15 MPa de 8 e 13% respectivamente.

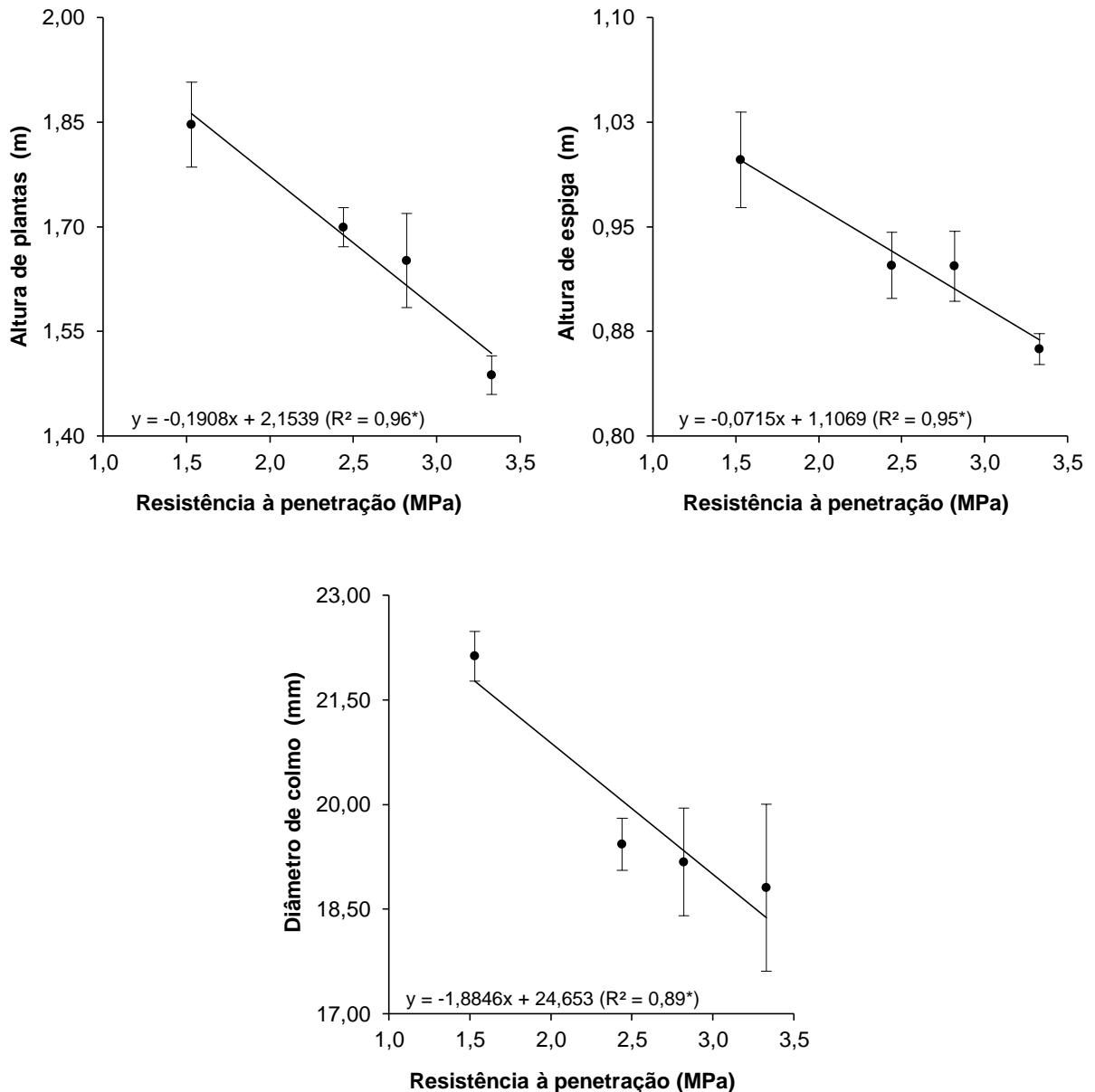


Figura 6. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a altura de plantas, altura de inserção da primeira espiga e diâmetro de colmo do milho.

Para Letey (1985), o aumento da RP causa o desenvolvimento reduzido do sistema radicular que, por meio de sinais hormonais enviados pelas raízes, a parte aérea reduz seu desenvolvimento, podendo assim reduzir a produtividade. Segundo Freddi (2007), plantas mais altas e com maiores alturas de inserção da primeira espiga, provavelmente, atingirão maiores produtividades, pois a redução da massa vegetativa ocasiona diminuição na capacidade fotossintética, afetando diretamente a produção de grãos.

Apesar de Sene et al. (1985) considerarem que, para solos arenosos, somente valores de RP acima de 6,0 MPa seriam críticos ao desenvolvimento das culturas, os resultados encontrados nesse trabalho mostram que para AP, APE e DC este valor pode estar superestimado, pois foi possível verificar redução a partir da RP de 1,53 MPa, este mais próximo ao limite estabelecido por Taylor et al. (1966) e Silva et al. (1994) de 2,0 MPa.

4.2.2 Número de grãos (NG), Fileiras da primeira espiga (FE), Comprimento da primeira espiga (CE) e Diâmetro da primeira espiga (DE).

Não houve interação significativa ($p < 0,05$) envolvendo os implementos de preparo do solo e os níveis de compactação para NG, FE, CE e DE sendo que, apenas, NG e FE foram influenciados pelos níveis de compactação (Tabela 8).

Tabela 8. Teste de F para Número de grãos (NG), Fileira da primeira espiga (FE), Comprimento da primeira espiga (CE) e Diâmetro da primeira espiga (DE) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Causas de Variação	Avaliações			
	NG	FE	CE	DE
Teste de F				
IP	0,12 ^{ns}	4,75 ^{ns}	1,99 ^{ns}	2,40 ^{ns}
NC	3,81*	6,22*	0,95 ^{ns}	1,71 ^{ns}
Interação IP x NC	0,88 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,16 ^{ns}
C.V. (%) – IP	24,35	5,65	9,06	5,20
C.V. (%) – NC	19,14	6,51	9,82	5,40

ns = não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%). IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

A ausência de significância para CE e DE pode indicar que estas são características intrínsecas ao genótipo utilizado e, geralmente, influenciadas por manejos de adubação (LOURENTE et al., 2007; LOPES et al., 2010) e pela população de plantas (VIEIRA et al., 2010; BRACHTVOGEL, 2008). Como os atributos AP, APE e DC foram negativamente afetados pela RP, seria esperado que CE e DE, de algum modo, também apresentassem comportamento similar, conforme

discussão de Freddi (2007). Além disso, NG e FE apresentaram, respectivamente, comportamento quadrático e linear decrescente a partir da RP de 1,53 MPa, provocando reduções nestes fatores, respectivamente, de 20 e 11% quando a RP passou de 1,53 para 3,33 MPa (Figura 7), novamente, corroborando com os resultados encontrados por Freddi (2007).

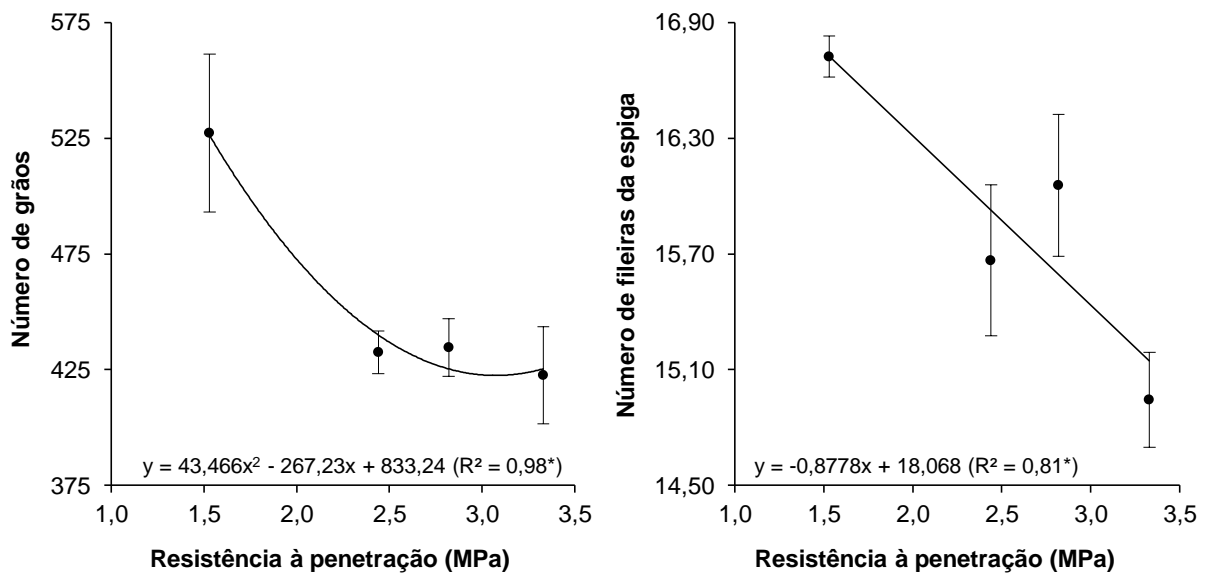


Figura 7. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e o número de grãos e fileiras da primeira espiga do milho.

Assim como observado para os outros parâmetros de crescimento da cultura, o aumento da RP propiciado pelo tráfego do trator, reduziu o NG e o FE, estes importantes componentes de produtividade da cultura do milho. Tal fato pode ser novamente explicado por Letey (1985), possivelmente o aumento da RP causou o desenvolvimento reduzido do sistema radicular que através de sinais hormonais enviados pelas raízes, a parte aérea reduz seu desenvolvimento, podendo assim reduzir a produtividade.

4.2.3 Matéria seca das plantas (MSP) e Matéria seca das raízes (MSR).

Não houve interação significativa ($p < 0,05$) envolvendo os implementos de preparo do solo e os níveis de compactação para MSP e MSR. Ambos os parâmetros foram apenas influenciados pelos níveis de compactação (Tabela 9).

Tabela 9. Teste de F para Matéria seca das plantas (MSP) e Matéria secas das raízes (MSR) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Causas de Variação	Avaliações	
	MSP	MSR
Teste de F		
IP	0,84 ^{ns}	1,85 ^{ns}
NC	14,65*	3,74*
Interação IP x NC	1,83 ^{ns}	0,52 ^{ns}
C.V. (%) – IP	20,18	29,57
C.V. (%) – NC	18,69	49,18

ns = não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%). IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

A MSP apresentou comportamento linear decrescente em função do aumento da RP a partir do valor de 1,53 MPa, sendo possível verificar redução de 39%, quando a RP passou de 1,53 para 3,33 MPa (Figura 8). Resultados semelhantes foram encontrados por Freddi (2007), que verificou redução linear de 24% na MSP da cultura do milho em Latossolo Vermelho textura argilosa, quando a RP passou de 0,32 para 1,83 MPa. Ainda Freddi et al. (2009), também verificaram redução linear de 26% na MSP da cultura do milho em Latossolo Vermelho textura média quando a RP passou de 0,87 para 2,15 MPa. Foloni et al. (2003), verificou redução de aproximadamente 20% no crescimento aéreo das plantas após 40 dias de cultivo sob 1,4 MPa de impedância mecânica em Latossolo Vermelho textura média. Novamente os resultados aqui apresentados discordam com o limite crítico estabelecido por Sene et al. (1985), de 6,0 MPa para solos arenosos.

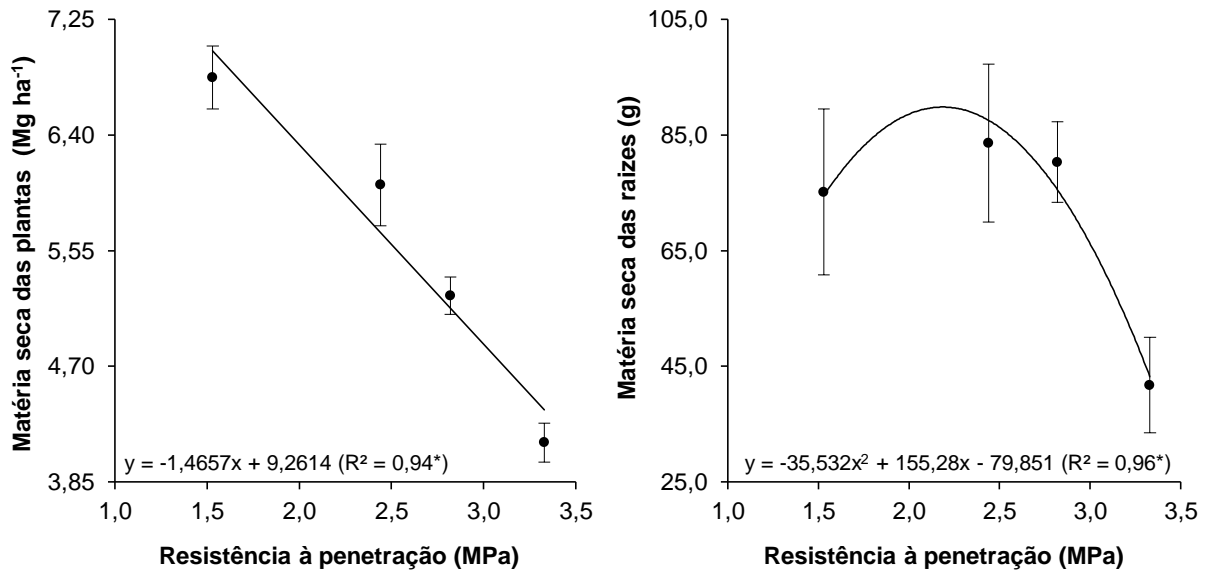


Figura 8. Regressões entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a matéria seca das plantas e raízes do milho.

A MSR apresentou comportamento quadrático em função do aumento da RP. Foi possível verificar que até 2,18 MPa (ponto de máxima da curva obtido através da derivação da equação quadrática) houve aumento da MSR e a partir deste valor, houve redução (Figura 8), valor muito inferior ao limite crítico estabelecido por Sene et al. (1985) de 6,0 MPa para solos arenosos e concordando com ao estabelecido por Taylor et al. (1966) e Silva et al. (1994) como crítico ao desenvolvimento radicular e da parte aérea. Resultados diferentes foram encontrados por Tavares Filho et al. (2001), onde este autores não observaram restrição ao desenvolvimento radicular da cultura do milho em Latossolo Roxo textura argilosa quando a RP foi 3,5 MPa.

Os resultados apresentados na Figura 8 discordam dos obtidos por Foloni et al. (2003), que não verificou alteração da MSR em função do aumento da RP, levando estes autores a concluir que a MSR não foi uma variável adequada para aferir a sensibilidade das plantas de milho à compactação do solo. Já Freddi (2007), em trabalho desenvolvido em Latossolo Vermelho textura média, verificou o mesmo comportamento quadrático, entretanto, encontraram redução na MSR a partir da RP de 1,66 MPa até a RP de 3,09 MPa. Para este autor, a partir de 3,09 MPa o sistema radicular respondeu à restrição imposta pelo solo com o aumento do diâmetro radicular. Além disso este autor observou aumento da MSR até a a RP de 5,69 MPa, que não foi observado no presente trabalho, onde houve redução de

aproximadamente 53% quando a RP passou de 2,18 para 3,33 MPa. Ainda para Freddi (2007) à MSR foi um indicador sensível a compactação do solo.

Beutler e Centurion (2004a), trabalhando com a cultura do arroz em Latossolo de textura média e argilosa avaliaram a MSR e observaram comportamento semelhante aos encontrados neste trabalho. Esta leve compactação promove um contato mais íntimo entre o solo, a solução e as raízes, com aumento de área do solo explorado pelas raízes fazendo com que os nutrientes atinjam mais rapidamente os pontos de absorção.

4.2.4 Massa de 1000 grãos (MG) e Produtividade (P).

Não houve interação significativa ($p < 0,05$) envolvendo os implementos de preparo do solo e os níveis de compactação para MG e P, sendo apenas a P, influenciada pelos níveis de compactação (Tabela 10).

Tabela 10. Teste de F para Massa de 1000 grãos (MG) e Produtividade (P) em função dos implementos de preparo do solo e dos níveis de compactação.

Causas de Variação	Avaliações	
	MG	P
Teste de F		
IP	1,17 ^{ns}	3,01 ^{ns}
NC	1,62 ^{ns}	5,09*
Interação IP x NC	1,19 ^{ns}	0,44 ^{ns}
C.V. (%) – IP	18,39	24,86
C.V. (%) – NC	15,32	17,77

ns = não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; C.V. = Coeficiente de variação (%). IP = Implementos de preparo do solo; NC = Níveis de compactação.

O resultados de P encontrados neste trabalho, foram superiores aos encontrados por Carvalho et al. (2012), para o mesmo híbrido em rede de ensaios na região nordeste, sendo que a máxima produtividade (14,78 Mg ha⁻¹) foi encontrada no solo não trafegado. Possivelmente, a disponibilidade não limitante de água durante todo o ciclo, favoreceu o desenvolvimento da cultura.

Foi possível verificar reduções de 15, 20 e 22% respectivamente, na produtividade da cultura do milho, quando comparado o solo não trafegado ao

submetido ao tráfego de 3, 6 e 9 passadas de trator de 3,5 Mg (Figura 9). O tráfego do trator aumentou a RP, reduzindo o desenvolvimento radicular e consequentemente a absorção de nutrientes, principalmente o fósforo e potássio que são transportados preferencialmente no solo por difusão. Beutler et al. (2009) verificaram situação semelhante em trabalho desenvolvido em Argissolo Vermelho Amarelo arênico onde o tráfego de máquinas (8 passadas de trator de 8 Mg), reduziu a produtividade do milho em 22% quando comparado ao solo não trafegado, Freddi (2007) em Latossolo Vermelho textura média verificou redução de 38% na produtividade do milho quando o solo foi submetido a 6 passadas de trator de 11 Mg quando comparado ao solo não trafegado.

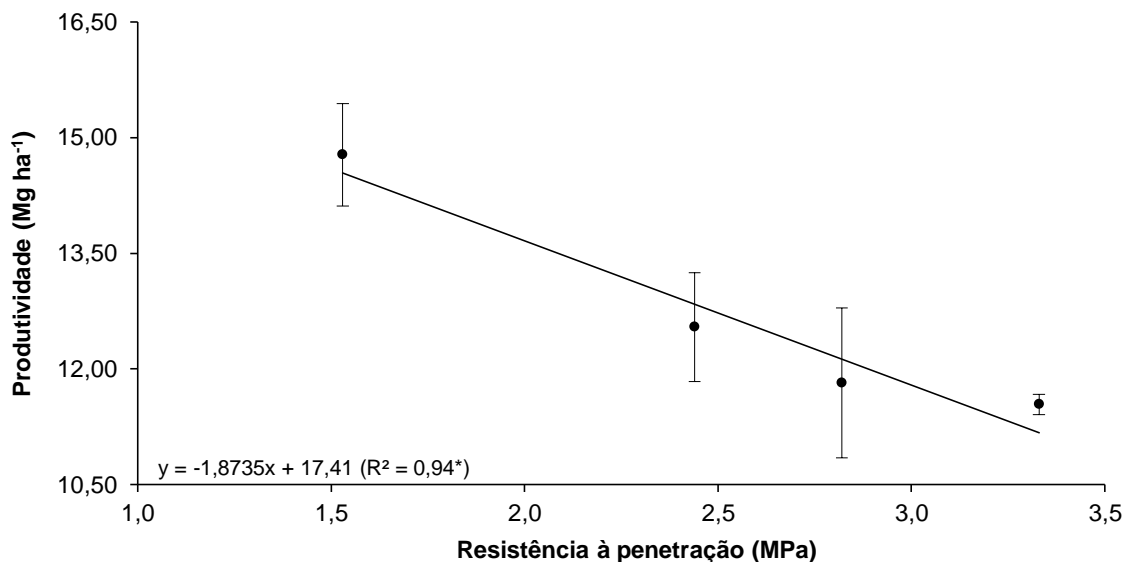


Figura 9. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração do Argissolo Amarelo e a produtividade do milho.

Por meio da Figura 9 é possível verificar que o aumento dos valores de RP a partir de 1,53 MPa reduziu linearmente a produtividade da cultura do milho. Este valor é inferior ao proposto por Taylor et al. (1966) e Silva et al. (1994) e muito inferior ao proposto por Sene et al. (1985), como limitante ao desenvolvimento das culturas em solos arenosos, entretanto valor próximo ao encontrado neste trabalho foi verificado por Freddi (2007), onde houve redução quadrática na produtividade da cultura do milho em Latossolo Vermelho textura média a partir da RP de 1,65 MPa. Valor ainda menor foi encontrado por Beutler et al. (2009) em Argissolo Vermelho Amarelo arênico, onde a partir da RP de 0,91 MPa houve redução na produtividade

do milho. Já Mahl et al. (2008), em trabalho desenvolvido em Nitossolo Vermelho não verificaram redução da produtividade do milho em valores de RP próximos a 3,0 MPa. Freddi et al. (2009) encontram em Latossolo Vermelho textura média, redução significativa na produtividade do milho quando a RP foi de 2,15 MPa.

Como é possível verificar a obtenção de um valor crítico de RP limitante ao desenvolvimento e produtividades das culturas torna-se bastante difícil, uma vez que, este atributo físico do solo é extremamente dependente do conteúdo de água, textura e condição estrutural do solo. Com o aumento da umidade a RP pode mudar rapidamente de uma provável condição limitante para outra não limitante (ROSSETTI e CENTURION, 2013). Além dos fatores intrínsecos ao solo, as respostas das culturas também são diferenciadas.

5. CONCLUSÃO

Nas condições em que este trabalho foi desenvolvido, conclui-se:

Os implementos de preparo do solo influenciaram a densidade e a porosidade total na camada de 0,00 – 0,10 m. A grade aradora propiciou valor de densidade do solo não crítico ao desenvolvimento das culturas, já a porosidade total apresentou maiores valores quando o solo foi preparado com o escarificador. Os implementos de preparo do solo não afetaram a resistência mecânica do solo à penetração.

Os implementos de preparo do solo afetaram a altura de plantas, a altura de inserção da primeira espiga e o diâmetro de colmo. Foram observados maiores valores de altura de plantas e altura de inserção da primeira espiga quando o solo foi preparado com a grade aradora.

Os níveis de compactação, propiciados pelo tráfego do trator, promoveram aumento da densidade do solo e da porosidade total na camada de 0,00 -0,10 m e aumento da resistência mecânica do solo à penetração até a profundidade 0,30 m.

O aumento da resistência mecânica do solo à penetração acima de 1,53 MPa, restringiu as seguintes características agronômicas da cultura do milho: altura de plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro de colmo, número de grãos, fileiras da primeira espiga, produtividade e matéria seca das plantas. Para a matéria seca das raízes foi observado aumento até a resistência mecânica do solo à penetração de 2,18 MPa e a partir deste redução.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 717-723, 2001.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.319-326, 1996.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C.; NOVOTNY, E. H. **Cultivo do milho: preparo convencional do solo**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 4p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 40).

AMARAL, F. C. S.; SILVA, E. F.; MELO, A. S. **Caracterização pedológica e estudos de infiltração da água no solo em perímetros irrigados no Vale do São Francisco**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2006. 104p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 97).

ANDRADE, C. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; BRITO, R. A. L.; RESENDE, M. **Viabilidade e manejo da irrigação da cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 85).

BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, E. F. Efeito de sistemas de preparo do solo no rendimento de grãos de trigo, soja e milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1991, Londrina. **Anais...** SBEA, 1992. p.1354-1360.

BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SASAKI, C. M. Mobilização do solo e crescimento inicial do eucalipto em função do tipo de haste sulcadora, profundidade de trabalho e características do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.588-605, 2003.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.3, p.299-305, 2010

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; ALVES, J. B.; WAGNER, G. P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum**, v.31, n.2, p.359-364, 2009.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.146-151, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C L.; SÃO JOÃO, A. C. G.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.787-794, 2006

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Resistência à penetração em latossolos: Valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, v.34, p.1793-1800, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.1, p.142-149, 2004b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. **Irriga**, v.9, p.181-192, 2004.

BOHM, W. Methods of studying root systems. **New York: Springer-Varlag**, 194p. 1979.

BOLLER, W.; KLEIN, V. A.; DALLMEYER, A. U. Semeadura de milho em solo sob preparo reduzido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.123-130, 1998.

BOTTA, G.; JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal Terramechanics**, v.39, n.1, p.47-54, 2002.

BOUKOUNGA, J. C. **Propriedade físico-mecânicas de um argissolo sob diferentes sistemas de manejo e preparos do solo.** 2009. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto.** 2004. 106p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco.** Recife: SUDENE, 1973. 354p.

BRACHTVOGEL, E. L. **Densidades e arranjos populacionais de milho e componentes agrônômicos.** 2008. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.5, p.789-96, 2005.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A. & VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas.** Campinas, SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Instituto Agrônomo de Campinas. Boletim Técnico, 106).

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

CARVALHO, H. W. L.; PACHECO, C. A. P.; CARDOSO, M. J.; ROCHA, L. M. P.; OLIVEIRA, I. R.; BARROS, I.; TABOSA, J. N.; LIRA, M. A.; OLIVEIRA, E. A.; MACEDO, J. J. G.; NASCIMENTO, M. M. A.; SIMPLÍCIO, J. B.; COUTINHO, G. V.; BRITO, A. R. M. B.; TAVARES, J. A.; TAVARES FILHO, J. J.; RODRIGUES, C. S.; CASTRO, C. R.; MENESES, M. C.; OLIVEIRA, T. R. A.; GOMES, M. C. M.; MENEZES, V. M. M.; SANTANA, A. F. **Desempenho de cultivares de milho no nordeste brasileiro: Safra 2010/2011.** Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 33p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Comunicado Técnico, 122).

CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J. F.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; CARVALHO, L. C. C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.229-237, 2007.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeito de sistemas de preparo de solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.263-266, 1985.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Sistema de preparo de solo de cerrado: efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.2, p.315-324, 1992.

CFSEMG. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais 5º Aproximação**. Viçosa, 1999. 359p.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A. D.; HAYES, H. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil Tillage Research**, v.89, p.13-21, 2006.

CHOUDHURY, E. N.; MELLO, C. A. de O.; MORGADO, L. B.; **Preparo do solo e adubação residual na cultura do milho em áreas irrigadas**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 1991. 21p. (Embrapa Semiárido. Boletim de Pesquisa, 40).

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUCK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.197-201, 1983.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.41, p.1663-1674, 2006.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, Janeiro 2014**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_01_10_15_07_19_boletim_graos_janeiro_2014.pdf>. Acesso em: 08 Fev. 2014.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1207-1216, 2011.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.289-298, 1999.

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

DE MARIA I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.703-709, 1999.

DIAS JÚNIOR M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras-MG. **Ciência Agrotécnica**, v.24, n.2, p.337-346, 2000.

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

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, A. R.; FONSECA, S.; LEITE, F. P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.805-810, 2004.

DORNELES, E. P. **Atributos químicos de argissolo e exportação de nutrientes por culturas sob sistemas de preparo e de adubação**. 2011. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 2011. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 370p.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1097-1104, 2003

FASINMIRIN, J. T.; REICHERT, J. M. Conservation tillage for cassava (*Manihot esculenta crantz*) production in the tropics. **Soil and Tillage Research**, v.113, n.1, p.1-10, 2011.

FEITOSA, J. R.; OLSZEVKI, N.; CORTEZ, J. W.; NAGAHAMA, H. J. Variáveis físicas de argissolo amarelo do semiárido nordestino em função das operações de preparo periódico. **Engenharia na Agricultura**, v.21, n.5, p.456-464, 2013.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows 4.0 In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais... UFSCar**, 2000. p.255-258.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.8, p.947-953, 2003.

FONTANELA, E. **Preparos e propriedades físicas de um solo arenoso para cana-de-açúcar e mandioca no rio grande do sul**. 2012. 158p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FREDDI, O, S. **Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho**. 2007. 105p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho: I - características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p. 793-803, 2009.

GAGGERO, M. R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GAMEIRO, C. A.; GABRIEL FILHO, A. Incorporação de restos vegetais, desenvolvimento e rendimento de grãos de milho (*Zea mays* L.) avaliados em dois tipos de solos preparados por cinco modelos de arados. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1999, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: RS: SBEA, 1999, CD-ROM.

GALETI, P.A. **Mecanização Agrícola**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 1988. 220p.

GILL, W. R.; VANDEN BERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, 1968, 511p.

GRIFFITH, D. R.; MANNERING, J. V.; GALLOWAY, H. M.; PARSONS, S. D.; RICHEY, C. B. Effect of eight tillage-planting systems on soil temperature, percent stand, plant growth and yield of corn on five Indiana Soils. **Agronomy Journal**. Madison, v.65, p.321-326, 1973.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.6, p.213-218, 2002.

YOKOYAMA, L. P.; SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Rentabilidade das culturas de milho, soja e trigo em diferentes sistemas de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.32, n.2, p.75-79, 2002.

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

IMHOFF, S. D. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos**. 2002. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba.

INOUE, G. H. Sistema de preparo do solo e o plantio direto no Brasil. **Agropecuária técnica**, v.24, n.1, p.1-11, 2003.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 150p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KAMIMURA, K. M. **Parâmetros de solo, máquina e planta em função de doses de resíduos vegetais e profundidades de deposição de fertilizantes em semeadura direta.** 2008. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo.** 1998. 150p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D.; RIBEIRO, C. M.; FERRARO, L. A. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agricola**, v.57, n.1, 2000.

LANÇAS, K. Subsolagem ou escarificação. **Cultivar Máquinas.** Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/site/content/artigos/artigos.php?id=416>>. Acesso em: 10 out. 2013.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. **Cultivo do milho: Clima e solo.** Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/climaesolo.htm>. Acesso em: 22 dez. 2013.

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

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada.** 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

LOPES, M. M. S.; ALVES, G. A. R.; OLIVEIRA NETO, C. F.; OLIVEIRA, N. S.; JACKELINE, A. M.; SANTOS, D. G. C.; OKUMURA, R. S.; LOBATO, A. K. S.; WILSON, J. M.; MAIA, S. Comprimento, diâmetro e matéria seca da espiga em milho sob influência de vários níveis de nitrogênio. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., 2010, Goiânia. **CD-ROM**. Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010. Disponível em: <http://www.abms.org.br/cn_milho/trabalhos/0188.pdf>. Acesso em: 09 Fev. 2014.

LOURENTE, E. R. P.; ONTOCELLI, R.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E.; RODRIGUES, E. T. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. **Acta Scientiarum**, v.29, n.1, p.55-61, 2007.

MAHL, D.; SILVA, R. B.; GAMERO, P. R. A.; SILVA, P. R. A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto e escarificado. **Acta Scientiarum**, v.30, n.5, p.741-747, 2008.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006, 10p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 76).

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; PAIVA, E. **Fisiologia da planta de milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 1994. 27p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 20).

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MULLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1197-1206, 2011.

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**, v.23, p.135-148, 1999.

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

MOURA, P. M.; BEZERRA, S. A.; RODRIGUES, J. J. V.; BARRETO, A. C. Efeito da compactação em dois solos de classes texturais diferentes na cultura do rabanete. **Revista Caatinga**, v.21, n.5, p.107-112, 2008.

OLIVEIRA, E. F. de; BAIRRÃO, J. F. M.; CARRARO, I. M. Efeito dos sistemas de preparo do solo sobre algumas características físicas e rendimentos de grãos de soja e milho. In: ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO ESTADO DO PARANÁ. **Resultados da pesquisa na safra de verão 1987/88**. Cascavel: OCEPAR, 1989. p.233-237.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho Argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.773-781, 2003.

RANEY, W. A.; ZINGG, A. W. **Principles of tillage**. In: USDA Yearbook of Agriculture, Washington, 1957, p.277-81.

PENEDO, E. D. **Atributos químicos de argissolo e exportação de nutrientes por culturas sob sistemas de preparo e de adubação**. 2011. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RADFORD, B. J.; BRIDGE, B. J.; DAVIS, R. J.; MacGARRY, D.; PILLAI, U. P.; RICKMAN, I. F.; WALSH, P. A.; YULE, D. F. Changes in properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil and Tillage Research**, v.54, p.155-170, 2000.

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

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação In: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816. 2008.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n.3, p.312-344, 2005.

ROSA, D. R. **Relação solo-máquina-planta num argissolo cultivado e sob campo nativo**. 2009. 109p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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**, v.18, n.3, p.491-497, 1994.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.5, p.472-479, 2013.

SÁ, J. C .M. Reciclagem de nutrientes dos resíduos culturais, e estratégia de fertilização para a produção de grãos no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO NA UFV. Viçosa, 1998. **Resumo das palestras**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. p.19-61.

SALIRE, E. V.; HAMMEN, J. E.; HARDCASTLE, J. H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, v.31, p.235-248, 1994.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, C. M.; VALLEJOS, M. F. J.; VIANA, J. H. M.; GALVÃO, J. C. C.; RIBEIRO, L. M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.765-769, 2001.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e produtividade das culturas**. 2003. 108p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v.39, n.1, p.58-64, 2009

SEIXAS, J. **Níveis de compactação na cultura do milho (*Zea mays*)**. 2001. 80p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SENE, M.; VEPRAAKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, n.2, p.422-427, 1985.

SILVA, A. P. **Qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas de milho**. 1998. 80f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

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

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, p.1-18, 2002.

SILVA, A. P. Física do solo – LSO 0310. In: BRADY, N. C.; WELL, R. R. **The nature and Properties of soils**. 13. Ed 2008

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; VILAS BOAS, J. E. B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de Latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.759-768, 2006.

SILVA, V. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, V.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.1, p.191-199, 2000a.

SILVA, V.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v.30, n.5, p.795-801, 2000b.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SOARES, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.399-406, 2004.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto – modelo IAA/Planalsucar – STOLF. **STAB**, v.1, p.18-23, 1983.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-235, 1991.

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.447-459, 2011.

STOLF, R.; SILVA, J.R.; GOMEZ, J.A.M. Grades agrícolas: 5- Evolução histórica de seus mancais. **ALCOOLbrás**, v.10, n.115, p.65–69, 2008.

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

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149p. Dissertação (Mestrado – Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.725-730, 2001.

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

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

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

TORRES, E.; ODILON, F. S.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 1993. 71p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 12).

TREIN, C. **Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo**. 1988. 111p. Dissertação (Mestrado – Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIANA, J. H. M.; CRUZ, J. C.; ALVARENGA R. C.; SANTANA, D. P. **Manejo do solo para a cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006, 14p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 77).

VIEIRA, M. A.; CAMARGO, M. K.; DAROS, E.; ZAGONEL, J.; KOEHLE, H. S. Cultivares de milho e população de plantas que afetam a produtividade de espigas verdes. **Acta Scientiarum**, v.32, n.1, p.81-86, 2010.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Fotografias do experimento, preparo do solo, níveis de compactação, coleta de amostras e fases da cultura.



Trator Valtra 785 TDA durante preparo do solo com Grade Aradora.



Grade Aradora ATCR.



Área experimental após o preparo com Grade Aradora.



Trator Valtra 785 TDA durante preparo do solo com Arado Aivecas.



Subsolador AST.



Trator Valtra 785 TDA durante Gradagem Niveladora.



Trator Valtra 785 TDA durante aplicação das compactações.



Estufa.



Amostras para determinação de Ds e Pt.



Cultura do Milho no estágio V1.



Cultura do Milho no estádio V4-V5.



Adubação de cobertura.



Cultura do Milho no estádio V10-
V12.



Diferenças de Altura de Plantas
provocadas pelos tratamentos.