

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

JOSÉ ALFREDO BAPTISTA DOS SANTOS

**QUALIDADE FÍSICA DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO
SUBMETIDO A DOSES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO**

**PONTA GROSSA
2015**

JOSÉ ALFREDO BAPTISTA DOS SANTOS

**QUALIDADE FÍSICA DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO
SUBMETIDO A DOSES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área de concentração: Agricultura, Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientadora: Profa. **Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola**

Co-orientador: Prof. **Dr. Eduardo Fávero Caires**

**PONTA GROSSA
2015**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

S237 Santos, José Alfredo Baptista dos
Qualidade física de um cambissolo
háplico alumínico submetido à doses e
formas de aplicação de calcário/ José
Alfredo Baptista dos Santos. Ponta Grossa,
2015.
96f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de
Concentração: Agricultura), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof^a Dr^a Neyde Fabíola
Balarezo Giarola.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero
Caires.

1.Calagem. 2.Resistência do solo a
penetração. 3.Penetração. 4.Qualidade
estrutural. 5.Agregação do solo.
I.Giarola, Neyde Fabíola Balarezo. II.
Caires, Eduardo Fávero. III. Universidade
Estadual de Ponta Grossa. Doutorado em
Agronomia. IV. T.

CDD: 631.41



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: **“Qualidade física de um cambissolo háplico aluminico submetido a doses e formas de aplicação de calcário”.**

Nome: José Alfredo Baptista dos Santos

Orientadora: Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

Dr. Dirk Claudio Ahrens

Dr.^a. Lúcia Beatriz Canalli

Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa

Data da Realização: 18 de dezembro de 2015.

A DEUS

Aos meus pais;

À minha esposa e filhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, pelo curso de Pós-Graduação;

Ao Departamento de Física de Solos da ESALQ pelas contribuições;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, pelas análises químicas realizadas;

Agradecimentos especiais à Claudio Kruppek e Madalena Kruppek, pela concessão da área, acolhimento, amizade e apoio na condução do experimento;

À Professora Neyde Fabíola Balarezo Giarola pelo estímulo, amizade e orientação no curso de disciplinas e desenvolvimento da pesquisa em campo;

Ao Prof. Alvaro Pires da Silva, pelas orientações e apoio, em laboratório e campo;

Ao Prof. Eduardo Fávero Caires, pelas orientações e análises realizadas;

Ao Professor Luis Cesar Cassol da UTFPR, pelas análises de solos realizadas;

A todos os professores da Pós-graduação, pela transferência de conhecimentos;

Aos técnicos do Departamento de Física de Solos da ESALQ, pela contribuição;

Aos alunos de iniciação científica do laboratório de física do solo da Profa Neyde: Jéssica Scorssim, Felipe Manfrom, Caetano Benassi, João Felipe Gomes, Carlos A. Moura, Gustavo Olzewski e Estevan, pela importante contribuição nas atividades de campo e laboratório;

Ao amigo Renato Lima, Doutorando da ESALQ, agradecimentos especiais, pela realização de análises estatísticas e ajuda na interpretação dos resultados;

Aos amigos do IAPAR pelas contribuições e discussões técnicas proporcionadas;

Agradecimentos especiais à Ariane de Paula, Lucia Helena Wiechetek e André C. Auler pela parceria nos trabalhos;

Aos colegas da Pós-graduação: Jéssica A Santos, Thays Schneider, Simone Miara, Daniel Potma, Clever Briedis, pelas contribuições e troca de informações;

Enfim, quero registrar minha gratidão a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto de pesquisa e de vida.

RESUMO

SANTOS, J. A. B. **Qualidade física de um Cambissolo Háplico alumínico submetido a doses e formas de aplicação de calcário**: 2015. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa.

As avaliações foram realizadas em uma pequena propriedade rural com gestão em sistema de economia familiar, cuja atividade principal é o cultivo de grãos, com produção animal para carne e leite destinados ao autoconsumo e venda do excedente. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de doses e formas de aplicação de calcário sobre um Cambissolo Háplico alumínico cultivado com grãos no município de Irati, região Sudeste do estado do Paraná. Instalou-se um experimento em delineamento de experimento em faixas com cinco repetições. A calagem foi realizada em três formas de aplicação; superficial ou sem incorporação do calcário (SI), incorporação com arado e grade niveladora (IAG), e incorporação com escarificador e grade niveladora (IEG). As doses de calcário adotadas para estudo foram: T0 – sem calcário (testemunha), T10 – 10 t ha⁻¹, T15 t ha⁻¹ e T20 t ha⁻¹. Foram avaliados os atributos físicos e químicos do solo em dois ciclos de cultivos. As avaliações e coletas para análises físicas foram realizadas ao longo do ciclo da cultura do milho (*Zea mays*), enquanto para as avaliações químicas as coletas foram realizadas após a colheita do milho. Nos dois ciclos de cultivos, foram avaliados o rendimento de biomassa seca das culturas de cobertura de inverno, biomassa da planta inteira do milho em maturidade fisiológica e rendimento de grãos da cultura do milho. Os atributos físicos e químicos do solo foram avaliados nas camadas de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade. As medições de resistência do solo a penetração (RP) e determinações do conteúdo volumétrico de água no solo (θ) foram realizadas a campo, com penetrômetro eletrônico e sensor de umidade, respectivamente. Através do intervalo de confiança das médias dos atributos, foram comparados os resultados de doses e formas de aplicação do calcário ($P \leq 0,15$). Para os atributos físicos, os resultados apontam significância quanto a formas de aplicação, enquanto para os atributos químicos observou-se significância quanto a doses e formas de aplicação. Com referência ao rendimento das culturas, no primeiro ciclo de cultivos foram observados melhores resultados em função de doses e formas de aplicação do calcário. No segundo ciclo de cultivos os resultados de biomassa de aveia apresentaram significância em função de doses e formas de aplicação, porém, os rendimentos de biomassa e grãos de milho foram severamente prejudicados por estiagem. Pelo intervalo de confiança os maiores valores de resistência do solo a penetração foram observados na forma de incorporação com arado e grade niveladora, enquanto a incorporação com escarificador e grade niveladora apresentou menores valores de densidade do solo, melhor saturação por bases e melhores rendimentos de biomassa e grãos.

Palavras-chave: calagem, resistência do solo a penetração, compactação, qualidade estrutural, agregação do solo.

ABSTRACT

SANTOS, J. A. B. **Soil physical quality of an Inceptisol under different doses and types of lime application:** 2015. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa.

The objective of this work was to evaluate the influence of doses and types of application of lime on an Inceptisol Haplustult aluminum cultivated with grains in the city of Irati, Southeast Region of the State of Paraná, Brazil. An experiment was carried out in factorial design 3X4 with 5 replications. The evaluations were performed in a small rural property in the household system, whose main activity is the cultivation of grains, with animal production for beef and milk intended for family consumption.

The plots consisted of the types of lime application (surface, plowing+harrowing and chisel plowing+ harrowing), and the sub-plots were the lime doses (0, 10, 15 and 20 Mg ha⁻¹). The evaluations and samplings for physical analyzes were carried out along the cycle of the corn crop (*Zea mays*) in two years, while collections for chemical evaluations were carried out after the harvest of the corn crop.

In both cycles of crops they have been evaluated winter crops dry biomass yields and grain and dry biomass yields for the summer crop. The physical and chemical soil attributes were evaluated in the layers of 0.0-0.10 and 0.10-0.20 m depths. The soil penetration resistance measurements and soil water volumetric content determinations were performed in the field using electronic penetrometer and moisture sensors, respectively. The results for the different doses and types of application of lime were compared by the confidence interval of the averages for the different attributes ($P \leq 0.15$). For the chemical attributes they have been observed significant differences regarding the types and doses of application of limestone, while for the physical attributes they were observed significant differences regarding only for the types of application of lime. With reference to the income of crops, in the first cycle they were observed better results in function of doses and types of application of lime. In the second cycle of crops the results of oat biomass exhibited significance in function of doses and forms of application; however, the incomes of biomass and grain maize were severely affected by drought. The largest values of soil resistance to penetration were observed in the incorporation of lime with plowing+harrowing, while the incorporation with chisel plowing+ harrowing have been presented lower values of soil bulk density, higher saturation of bases and better income of biomass and grain.

Keywords: liming, soil penetration resistance, compaction, soil structural quality, soil aggregation

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
2.3	HIPÓTESE.....	12
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1	A qualidade do solo.....	13
3.1.1	Bases para avaliação e monitoramento da qualidade do sol.....	13
3.1.2	Indicadores de qualidade do solo.....	14
3.1.2.1	Indicadores físicos de qualidade do solo.....	15
3.1.2.2	Indicadores químicos de qualidade do sol.....	18
3.2	A correção da acidez dos solos.....	19
3.2.1	O que e quais são os tipos de acidez.....	20
3.2.2	Como se faz a correção dos solos no Paraná.....	21
3.2.3	Efeito do calcário sobre os atributos químicos e físicos do solo.....	22
3.2.4	Benefício da calagem sobre o desenvolvimento e rendimento das plantas	25
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1	Localização e caracterização da área de estudo	26
4.2	Primeiro ciclo de cultivos.....	28
4.2.1	Tratamentos e delineamento experimental.....	32
4.2.2	Aplicação dos tratamentos	32
4.2.3	Condução do experimento no primeiro e segundo ciclo de cultivos	33
4.2.3.1	Implantação e condução das culturas de outono/inverno.....	33
4.2.3.2	Implantação e condução da cultura de primavera/verão.....	34
4.2.4	Avaliações.....	35
4.2.4.1	Indicadores de qualidade física do solo.....	35
4.2.4.2	Indicadores de rendimentos das plantas cultivadas.....	36
4.3	Segundo ciclo de cultivos.....	38
4.3.1	Avaliações.....	38
4.3.1.1	Indicadores de qualidade física do solo.....	38
4,3,1,2	Indicadores de qualidade química do solo.....	39
4.4	Análise dos dados.....	40
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	Primeiro ciclo de cultivos.....	40
5.1.1	Resistência do solo a penetração e conteúdo de água no solo.....	40
5.2	Segundo ciclo de cultivos.....	54
5.2.1	Relação entre a resistência do solo a penetração e conteúdo de água no solo...	54
5.2.2	Densidade do solo (Ds).....	66
5.2.3	Textura do solo.....	68
5.3	Atributos químicos do solo.....	69
5.4	Rendimento das culturas.....	76
5.4.1	Biomassa da aveia-preta + ervilhaca.....	76
5.4.2	Biomassa do milho.....	77
5.4.3	Rendimentos de grãos de milho.....	79
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
7.	CONCLUSÕES	82
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

Na região Sudeste do Paraná predominam pequenos agricultores familiares que empregam sistemas tradicionais de cultivo e o calcário agrícola para correção da acidez do solo, quando utilizado, tem ocorrência esporádica. Além disso, os agricultores aplicam quantidades abaixo da exigência definida pela análise química do solo. Nessa região, em torno de 70% dos solos cultivados são pouco desenvolvidos (Cambissolos e Neossolos), solos de baixa aptidão agrícola (CURCIO, 1994), com limitações para o uso agrícola, como pH muito baixo, elevados teores de alumínio trocável, baixa fertilidade natural, normalmente são solos rasos ou poucprofundos e muitas vezes apresentam adensamento subsuperficial (BOGNOLA et al., 2004).

Apesar das restrições químicas e físicas, os solos da região Sudeste do Paraná vêm sendo cultivados de forma intensiva com fumo, milho, feijão, soja, arroz e mandioca, lavouras que participam com 80% do valor bruto de produção da região (TORRENS, 2011), mas necessitam da correção da acidez para manter níveis adequados de rendimento (GUERREIRO, 1994; CASÃO JR., 2012). Por outro lado, a correção da acidez com calcário é contestada pelos agricultores, que afirmam que o uso frequente do corretivo promove o endurecimento do solo, dificultando as operações de preparo e semeadura e restrição ao desenvolvimento radicular e vegetativo das plantas (BENASSI et al., 2009), alegação que se tornou uma das barreiras para a difusão da prática da calagem dos solos pela assistência técnica.

No Estado do Paraná, pesquisas sobre a adição de calcário para correção da acidez dos solos têm sido desenvolvidas predominantemente em Latossolos e enfatizam as doses e os efeitos apenas sobre os atributos químicos dos solos (OLIVEIRA & PAVAN, 1996; CIOTTA et al., 2004; CAIRES et al., 2008). Os estudos sobre os efeitos que doses e formas de aplicação de calcário promovem sobre os atributos físicos de Cambissolos Háplicos Alumínicos da região Sudeste do Paraná são irrisórios e a pressão pela ampliação de áreas para o cultivo de grãos que vem ocorrendo nos últimos anos, justificam esta pesquisa.

O solo é o suporte que oferece condições para o desenvolvimento adequado das plantas, sem prejudicar a atividade da fauna. Sob esse aspecto, as condições físicas do solo são requerimentos indispensáveis e também por influenciar as reações químicas e biológicas. A resistência do solo à penetração, as características do solo em reter, a capacidade de drenagem e aeração determinam a disponibilidade de água e, portanto, de nutrientes dissolvidos, de oxigênio, de calor, além de constituir o suporte mecânico para as plantas em crescimento (ACHARAYA et al., 1998). Essas condições físicas que permitem e/ou promovem essas respostas definem a qualidade física do solo (TOPP et al., 1997).

O manejo altera os atributos físicos dos solos cultivados. A calagem, prática de manejo químico utilizado para a correção da acidez dos solos no Sul do Brasil (BAYER & MIELNICZUK, 1997; AMADO et al., 2000), também pode modificar as condições físicas dos solos (CASTRO FILHO & LONGAN, 1991). O calcário pode aumentar a capacidade de o solo se agregar, o que influencia outros atributos físicos do solo inter-relacionados, embora os mecanismos pelos quais esse processo ocorra não tenham sido devidamente esclarecidos até o presente momento (ALBUQUERQUE et al., 2003).

A literatura sugere que a agregação do solo promovida pelo calcário pode ocorrer, em princípio, por dois mecanismos contrastantes: 1) a partir do incremento do rendimento das culturas, que pode aumentar a adição de matéria orgânica ao solo via resíduos culturais. Várias formas de matéria orgânica (por exemplo, moléculas húmicas e polissacarídeos) estão intimamente envolvidas nas ligações dos agregados do solo e a estabilidade de agregados é estreitamente relacionada com seu teor de matéria orgânica no solo (HAYNES & BEARE, 1995); 2) por influenciar a composição química da solução de solo. O pH, a força iônica e a composição iônica da solução do solo podem influenciar a dispersão/floculação das partículas de argila e, assim, a agregação.

A forma como é feita a aplicação do calcário também pode influenciar os atributos físicos do solo (ALCARD, 1992). Os agricultores que utilizam o sistema plantio direto (SPD) para o cultivo de grãos aplicam o corretivo sobre a superfície do solo, com equipamentos específicos, sem promover revolvimento e a desagregação do solo. No entanto, existem evidências de que o calcário tem baixa mobilidade e não corrige a acidez em subsuperfície. Isto impede a penetração das raízes nas camadas mais profundas do solo e, por sua vez, a absorção de água e de nutrientes em função da presença de H^+ e Al^{3+} tóxico presentes. Outros agricultores incorporam parcialmente o calcário com o auxílio de escarificadores. Esses dois modos de aplicação do calcário procuram corrigir a acidez do solo promovendo mínimo impacto sobre a estrutura e a matéria orgânica do solo.

O município de Irati, mesorregião Sudeste do estado do Paraná, Sul do Brasil, apresenta a agricultura como o fator mais ponderável da sua economia. O território de Irati está quase todo distribuído em pequenas propriedades de gestão familiar e de produção diversificada, sendo milho, feijão, soja e trigo as culturas mais expressivas. Além dos grãos, a região também se destaca como produtora de fumo, erva-mate, batata-inglesa, alho e cebola.

Em Irati predominam Cambissolos e Neossolos em relevo ondulado e forte ondulado, de pH baixo, com elevados teores de alumínio trocável, baixa fertilidade natural, elevados teores de silte e, muitas vezes, adensamento subsuperficial (BOGNOLA et al., 2004). Mesmo

com essas limitações, esses solos são cultivados intensivamente desde a década de 1950, predominantemente no sistema de cultivo convencional (aração + gradagem), o que levou à degradação da estrutura natural, bem como a redução dos níveis de matéria orgânica. A aração contínua à mesma profundidade também conduziu à formação de camadas compactadas abaixo da profundidade de atuação dos implementos, o que impede a penetração mais profunda das raízes no solo e resulta em uma situação de alagamento temporário durante as chuvas mais intensas.

Apesar das restrições químicas e físicas dos solos, as práticas de manejo utilizadas para o cultivo de grãos estão aquém de outras regiões do Estado. Uma prática comum e já bem conhecida, como é o caso da correção da acidez dos solos com calcário, apresenta uso limitado porque é contestada pelos agricultores, que afirmam que o uso frequente do corretivo promove o aumento da resistência de torrões e restringe o crescimento radicular e vegetativo das plantas (BENASSI et al., 2009). Essa alegação se tornou uma barreira para a difusão da prática da calagem dos solos pela assistência técnica. Além disso, as pesquisas sobre a correção de solo têm sido desenvolvidas, predominantemente em Latossolos e enfatizam as doses de recomendação e os efeitos apenas sobre os atributos químicos dos solos (OLIVEIRA & PAVAN, 1996; CAIRES et al., 2000; CAIRES et al., 2003; CAIRES et al., 2004; CIOTTA et al., 2004; COSTA et al., 2004; CAIRES et al., 2006; CAIRES et al., 2008). Os estudos sobre os efeitos que os teores e as formas de aplicação de calcário promovem sobre os atributos físicos de Cambissolos Háplicos Alumínicos da região Sudeste do Paraná são irrisórios e a pressão pela ampliação de áreas para o cultivo de grãos que vem ocorrendo nos últimos anos, justificam esta pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de doses e formas de aplicação de calcário sobre a qualidade física de um Cambissolo Háplico alumínico cultivado com grãos, na região Sudeste do Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito de doses e formas de aplicação de calcário na dinâmica das curvas de resistência do solo à penetração de raízes ao longo do ciclo da cultura do milho;
- Identificar as doses de calcário que promovem melhoria conjunta da qualidade física e química do solo;
- Identificar as formas de aplicação de calcário menos impactantes sobre a qualidade física do solo.

2.3 HIPÓTESE

- Estabeleceu-se como hipótese que os Cambissolos Háplicos alumínicos da região Sudeste do Paraná, quando submetidos a doses e formas de aplicação de calcário para correção da acidez, sofrem alterações nos atributos físicos, de modo que a qualidade física do solo, especialmente da cama de semeadura, é reduzida em relação àqueles que não receberam o corretivo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A qualidade do solo

Várias definições de qualidade do solo são encontradas na literatura, dependendo da função à qual o solo é esperado servir (GREGORICH, 2002). Segundo a SSSA (1987), a qualidade do solo reflete atributos inerentes ao solo que são inferidos por meio das características do solo ou observações indiretas, por exemplo: compactação, erodibilidade e fertilidade do solo. Power & Myers (1989) definiram a qualidade do solo como a habilidade do solo em suportar cultivos sem afetar parâmetros como a agregação, conteúdo de matéria orgânica, profundidade efetiva, capacidade de retenção de água, taxa de infiltração, pH, disponibilidade de nutrientes, entre outros. Posteriormente, Larson & Pierce (1991) apresentaram uma definição funcional de qualidade do solo, como a capacidade de um solo de servir uma função dentro dos limites de um ecossistema e de interagir positivamente com o ambiente externo àquele ecossistema ou simplesmente um solo com aptidão para determinado uso. Gregorich (2002) definiu qualidade do solo como o grau de ajustamento de um solo a um uso específico – sua habilidade ou capacidade de servir uma função específica. Já Brady & Weil (2002) definiram qualidade do solo como uma medida da habilidade do solo de realizar funções ecológicas particulares, a qual reflete uma combinação das suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Segundo os mesmos autores, a qualidade do solo considera o grau de ajustamento do mesmo a qualquer função, ou seja, a capacidade do solo de desempenhar uma função dentro (e algumas vezes fora) dos limites de seu ecossistema para manter tanto a produtividade e a diversidade biológica, quanto à qualidade do ambiente, e simultaneamente promover a saúde das plantas e dos animais.

3.1.1 Bases para avaliação e monitoramento da qualidade do solo

Diante das múltiplas funções que o solo apresenta, três exigências básicas devem ser atendidas no processo de avaliação e monitoramento da sua qualidade: 1) definir adequadamente a função ou finalidade a que se destina a avaliação; 2) estabelecer, entre a multiplicidade de atributos físicos, químicos e biológicos do solo, aqueles que são pontos chave para cada função do solo e definir a forma como integrá-los; e 3) definir critérios específicos para a interpretação dos dados dos atributos selecionados, de forma a permitir estimativas confiáveis da qualidade do solo para cada função (DORAN & PARKIN, 1994). Como o sistema solo é muito dinâmico, é importante que, na avaliação da qualidade do solo

em relação à sustentabilidade ambiental, os indicadores sejam escolhidos dentre aqueles que mais respondem ao uso e manejo e que causam maior impacto (LARSON & PIERCE, 1994). Assim, um índice de qualidade do solo pode servir como indicador da capacidade do solo para a produção sustentável das culturas e animais. O monitoramento da qualidade do solo é importante para a detecção de problemas e correção de rumos (KARLEN & STOTT, 1994).

Uma característica indicadora da qualidade do solo, para ser de utilidade prática para diferentes profissionais, deve atender aos seguintes critérios: i) contemplar propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo; ii) ser acessível a muitos usuários, em termos de facilidade de medição, além de apresentar o caráter de reprodutibilidade; iii) ser aplicável em condições de campo, permitindo relacionar medidas obtidas em laboratório com o campo; iv) possuir critérios definidos para quantificar e interpretar seus valores; v) ser sensível às variações de manejo e de clima, para permitir intervenções visando melhorar a qualidade do solo, quando for o caso; vi) permitir avaliações de qualidade do solo de curto e de longo prazo; e, vii) quando possível, ser componente de bancos de dados já existentes (DORAN & PARKIN, 1994; KARLEN & STOTT, 1994; LARSON & PIERCE, 1994).

3.1.2 Indicadores de qualidade do solo

A habilidade ou capacidade de um solo desempenhar uma função desejada é frequentemente dependente de um ou mais dos vários processos dinâmicos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo (BRADY & WEIL, 2002). Nem sempre é possível medir as taxas desses processos, mas se podem medir os atributos específicos que são indicativos das mesmas. Pode-se, também, usar tais medições em modelos de simulação para prever futuras mudanças nas taxas dos processos e, decorrente disso, na qualidade do solo. Os atributos medidos para considerar a qualidade do solo são denominados de “indicadores”.

A escolha dos indicadores a serem utilizados em determinada situação fica, como já foi abordado, na dependência da finalidade da avaliação da qualidade do solo. Uma avaliação voltada para a produção das culturas pode incluir indicadores físicos e químicos diferentes de outra voltada para analisar a suscetibilidade à erosão, ou até incluir os mesmos indicadores, porém com diferentes importâncias relativas de cada um deles (KARLEN & STOTT, 1994).

A Tabela 1 inclui vários atributos e processos físicos, químicos e biológicos que podem ser utilizados como indicadores da qualidade do solo.

Tabela 1. Indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade do solo.

INDICADOR	LÓGICA DO USO
Físicos	
Textura	Retenção e transporte de água e de agroquímicos
Profundidade do solo e enraizamento	Estimativa do potencial de produtividade e de erosão, normalização das variações paisagísticas e geográficas
Infiltração e densidade do solo	Potencial de lixiviação, produtividade e erosão
Capacidade de retenção de água	Relacionado com a retenção de água, transporte e erosividade
Químicos	
Matéria orgânica total	Define o armazenamento de carbono, potencial de fertilidade e estabilidade estrutural
Matéria orgânica ativa	Define a estabilidade estrutural e o alimento da microbiota
pH	Define os limites da atividade química e biológica
Condutividade elétrica	Define os limites da atividade microbiana e das plantas
N, P e K extraíveis	Disponibilidade de nutrientes às plantas e potencial de perda de N, indicadores de produtividade e qualidade ambiental
Biológicos	
C e N da biomassa microbiana	Potencial catalítico microbiano e alerta prévio do efeito do manejo na matéria orgânica
N potencialmente mineralizável	Produtividade do solo e potencial de suprimento de N
Respiração específica	Atividade microbiana por unidade de biomassa da mesma
Número de micro-organismos	Influência potencial de organismos, tais como minhocas

Fonte: adaptado de Brady & Weil (2002).

3.1.2.1 Indicadores físicos de qualidade do solo

A produção das culturas e a funcionalidade do ecossistema são fortemente influenciadas pela qualidade física do solo, principalmente na zona radicular. O solo deve funcionar como base suficientemente forte para prover uma estrutura estável e suporte adequado para as plantas, mas não a ponto de inibir o desenvolvimento de raízes e atividades da fauna. Sob esse aspecto, as condições mecânicas do solo são os requerimentos adicionais para o crescimento das culturas e determinam o fornecimento ótimo de água, nutrientes dissolvidos, oxigênio e calor. Condições físicas do solo que permitem e/ou promovem essas respostas constituem boa qualidade física do solo (TOPP et al., 1997).

Em geral, estudos que avaliam a qualidade física dos solos se reportam as propriedades físicas com influência indireta sobre o desenvolvimento das plantas (CARDOSO, et al., 1992; MARUN, 1996). A textura e a densidade do solo são utilizadas, isoladamente, como indicadores da qualidade física do solo, mas Letey (1985) ressalta que, apesar dessas propriedades condicionarem as práticas de manejo na agricultura, elas não estão diretamente relacionadas com a produtividade das culturas. O mesmo autor indica que o potencial da água no solo, a taxa de difusão de oxigênio, a temperatura e a resistência

mecânica para o crescimento das raízes e da parte aérea sobre o solo, seriam indicadores mais adequados da qualidade física do solo para a produção das culturas, pois afetam diretamente o crescimento das plantas.

- Resistência do solo à penetração de raízes

Sob uma perspectiva ambiental, a resistência do solo indica o potencial do solo para: i) resistir a perdas de estrutura em função do cultivo, que leva à pulverização; pelo tráfego, que leva à compactação; e pelas chuvas (ou irrigação), que induzem à ruptura dos agregados; e ii) resistir à penetração pelas raízes das culturas e às escavações pela fauna do solo. Um solo com boa qualidade física deve ser forte o suficiente para manter sua estrutura e as plantas eretas, mas também brando o suficiente para permitir penetração extensiva das raízes, flora e fauna do solo. Os principais componentes da resistência do solo incluem a resistência à penetração de raízes e a resistência tênsil de agregados (TOPP et al., 1997).

A penetração das raízes no solo e o desenvolvimento da parte aérea de plantas são limitados pela resistência do solo. Um valor de 2,0 MPa tem sido associado como impeditivo para o crescimento das raízes e também da parte aérea das plantas (WEAICH et al., 1992; TARDIEU, 1994), mas vários trabalhos demonstraram que o valor limitante pode variar de acordo com a condição estrutural do solo (HAMBLIN, 1985; STIRZAKER, 1996).

Para a determinação da resistência à penetração, Benghough & Mullins (1990) ressaltam que os penetrômetros fornecem boas estimativas da resistência mecânica do solo à penetração das raízes, apesar das diferenças no processo de penetração no solo das raízes e do cone do penetrômetro. Embora sejam evidentes as vantagens do uso dos penetrômetros, a resistência varia diretamente com a densidade do solo e inversamente com o conteúdo de água do solo (BUSSCHER et al., 1997), dificultando a interpretação caso esses fatores não sejam levados em consideração.

Um modelo para avaliar a resistência do solo à penetração das raízes, como uma função não linear da umidade e densidade do solo, foi proposto por Busscher (1990) e utilizado por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998), obtendo excelentes resultados. A relação da resistência mecânica do solo com a umidade e densidade do solo, descrita como curva de resistência do solo pode ser utilizada para fazer inferências sobre as condições estruturais do solo em relação às resistências críticas para o crescimento das plantas. Deste ponto de vista, a avaliação da resistência do solo e a determinação da curva de resistência são importantes no estudo dos efeitos de sistemas de preparo do solo nas condições físicas do

solo, podendo ser utilizadas para orientar o manejo e o controle da qualidade física em solos cultivados.

- Conteúdo de água no solo

A água é o fator mais relevante para o desenvolvimento das plantas (LETEY, 1985; SILVA et al., 1994). A escassez de água pode reduzir ou mesmo inibir o crescimento radicular, com reflexos na nutrição das plantas. No entanto, seu excesso desloca o ar do espaço poroso e pode causar deficiência de O_2 , que também reduz o crescimento e pode acarretar na morte das raízes (LETEY, 1985; SILVA et al., 1994; LEÃO, 2002).

Além de constituir em um importante condutor de nutrientes e regulador do metabolismo das plantas, a água exerce grande influência em importantes atributos do solo, como a resistência do solo à penetração, resistência de agregados, densidade do solo e aeração (SMITH et al., 1997.; HOAD et al., 2001), sem mencionar a estrutura do solo que é responsável pela regulação dos compartimentos porosos do solo (HAMBLIM, 1985). Tão expressiva é a importância da água no solo para certos atributos físicos, que não é recomendado a determinação da resistência à penetração quando o solo apresentar conteúdo de água em valores próximos a capacidade de campo, por dificultar a obtenção de valores críticos para o desenvolvimento das plantas (BRAIDA et al., 2006; BRUNINI & CARDOSO, 1998). A grande importância da água como componente regulador da resistência do solo a penetração é destacada por diversos autores, tanto que a capacidade de campo (CC) é um parâmetro muito utilizado em estudos de hidrologia aplicada a solos tanto do ponto de vista da engenharia civil quanto agrônômica, como norteador do manejo a ser adotado (OTONI FILHO et al., 2014).

- Densidade do Solo

A diversidade dos componentes minerais e orgânicos, bem como a proporção entre estes existentes em um solo, num determinado momento, determinam a densidade do material do solo. A densidade do solo (D_s) consiste na relação entre a massa de uma amostra de solo seca a 105°C e a soma do volume ocupado pelas partículas (matriz sólida) e porosidade total, sendo expressa em g cm^{-3} ou kg m^{-3} , (EMBRAPA, 1997; SILVA et al., 2014).

A densidade do solo é considerada um indicador da qualidade do solo e também pode ser utilizada para determinar a quantidade de água e de nutrientes que existem no perfil do solo, com base no volume. Padrões críticos de densidade do solo são difíceis de serem definidos. Na literatura há uma série de trabalhos mostrando a alteração deste parâmetro para

diversos sistemas de manejo, tipos de solos, graus de umidade do solo, profundidades e culturas (EMBRAPA, 1993).

A Ds varia entre as diferentes classes de solos em função da sua textura, teores de matéria orgânica, estrutura e mineralogia, e do manejo aplicado ao solo (NEVES et al., 2007). No caso da textura, em condições naturais, solos mais arenosos podem apresentar valores mais elevados de densidade, pelo maior peso específico das partículas da fração areia (quartzo); já em solos argilosos, pela maior superfície específica (ASE) e porosidade intra-agregados, apresentam Ds menor (CÂMARA & KLEIN, 2005). Latossolos com textura argilosa ou muito argilosa com vegetação nativa apresentam Ds em torno de 1 g cm^{-3} , enquanto Latossolos de textura média possuem Ds em torno de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$.

Em um mesmo solo, a Ds geralmente aumenta em profundidade em função do adensamento ocorrido pela pressão exercida pelas camadas superiores sobre as subjacentes e dos mecanismos de eluviação de argila que concorrem para a diminuição da porosidade. A Ds também pode aumentar em profundidade pelo uso frequente de energia mecânica, sem controle de tráfego, em função da redução da porosidade do solo (macroporos e porosidade de aeração). Isto constitui impedimento mecânico (aumento da resistência do solo) para o crescimento de raízes e, conseqüentemente, do desenvolvimento das plantas, além de redução da condutividade hidráulica e indução do processo erosivo (SILVA et al., 20014). Por esse motivo, a densidade do solo é uma das medidas quantitativas da compactação do solo (REICHERT et al., 2007).

3.1.2.2 Indicadores químicos de qualidade do solo

Os indicadores químicos do solo são relevantes para estudos agronômicos e ambientais e, via de regra, estão agrupados em quatro classes: a) os que indicam os processos do solo: pH e carbono orgânico; b) os indicadores da capacidade do solo em resistir à troca de cátions: tipo de argila (1:1 ou 2:1), CTC, CTA, óxidos de ferro e óxidos de alumínio; c) os que indicam as necessidades nutricionais das plantas: N, P, K, Ca, Mg e elementos traços (micronutrientes); d) os que indicam contaminação ou poluição: metais pesados, nitrato, fosfato e agrotóxicos (GOMES & FILIZOLA, 2006). O pH (ácido, neutro ou alcalino), interfere na solubilidade de nutrientes no solo e na absorção dos mesmos pelas plantas.

A matéria orgânica do solo (MOS) é um importante componente na configuração da estrutura do solo, na disponibilidade de água para as plantas, e no seu poder de tamponamento pela presença de compostos às vezes tóxicos às plantas (TORMENA et al., 2004; CASTRO &

CRUSCIOL, 2013). A MOS é muito sensível ao manejo do solo, razão pela qual é utilizada como indicador para a determinação da qualidade do solo (DORAN & PARKIN, 1994). Estudos sobre a influência da matéria orgânica do solo (MOS) na qualidade física do solo, realizado por Tormena et al. (2008b) verificaram redução da matéria orgânica do solo pelo uso intensivo, quando comparado a áreas com mata nativa, onde a MOS permanece protegida. Avaliações de longo prazo apontam para o aumento da matéria orgânica na camada 0,0-0,10 m quando adotado o sistema plantio direto (ALMEIDA et al., 2008), pela concentração de raízes superficiais, deposição de resíduos e não mobilização (SILVA et al., 2005). Esse fato é resultante da melhoria das forças de ligação e arranjo entre partículas minerais (TRANNNIN et al., 2008), dependente da origem, estado de decomposição e química da MO, determinantes sobre a resistência do solo a penetração (BRAIDA et al., 2010).

A MOS pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto na densidade (ZHANG et al., 1997). A redução da densidade pelo aumento na porosidade pode reduzir a resistência à compressão e o aumento da resistência do solo à compressão pela maior elasticidade, resultante do acúmulo de MOS (BRAIDA et al., 2010). Cultivos com alta produção de matéria seca e baixa relação C/N tem maior acúmulo de MOS (ANDRADE et al., 2009). Costa et al. (2009) avaliaram manejo de pastagem e de sistemas de preparo do solo para o cultivo de espécies de verão, após nove anos, em Cambissolo Húmico. Observou-se que o cultivo de milho em SPD depois da dessecação da pastagem, apresentou maior teor de carbono orgânico, na camada de 0-0,05 m em comparação ao milho em cultivo convencional. Em experimentos em várias regiões, mostraram que SPD foram benéficos ao acúmulo de resíduos orgânicos no solo, pela não mobilização e prática de rotação de culturas que favoreceram o acúmulo de MOS (ARGENTON et al., 2005; CALEGARI et al., 2006; CARNEIRO et al., 2009; LEITE et al., 2010; COSTA et al., 2009; ANDRADE et al., 2009).

3.2 A correção da acidez dos solos

A acidez dos solos agrícolas paranaenses é corrigida, na maioria das regiões, é realizada com uso de calcário que tem ação direta nos atributos químicos do solo (MOREIRA et al., 2001; CAIRES et al., 2002), influenciando também em outros atributos, como a estrutura (BRONICK & LAL, 2005), pela maior produção de matéria seca e aporte de MOS. Esse corretivo aumenta os teores cálcio e magnésio, eleva o pH do meio (diminuição da acidez) e promove a precipitação do alumínio trocável. O Ca^{2+} e/ou Mg^{2+} adicionados são adsorvidos

nos sítios de troca anteriormente ocupados pelos íons H^+ e Al^{3+} , levando a um desequilíbrio das cargas superficiais dos colóides (ALBUQUERQUE et al., 2003).

Estudos apontam a calagem como a prática de manejo mais adequada para correção da acidez do solo, ajustando o pH do solo às exigências das espécies. Entretanto, a recomendação da aplicação de corretivo só deve ser realizada quando a análise química do solo revelar pH inferior ao exigido pela cultura, com adoção de doses compatíveis com a interpretação dos resultados dispostos na análise do solo e em função da forma de aplicação que será adotada (CAIRES et al., 2004).

O sucesso da correção da acidez dos solos também depende da forma de aplicação do calcário (ALCARD, 1992). No Paraná, agricultores que adotam o sistema plantio direto (SPD) para o cultivo de grãos não mobilizam o solo para incorporar calcário. Nessas áreas o calcário é parcialmente incorporado com escarificação ou é aplicado em superfície para não descaracterizar o sistema plantio direto (SPD). No entanto, existem evidências da baixa mobilidade do calcário no solo, sem correção da acidez em subsuperfície e a presença de Al tóxico dificulta a penetração das raízes e absorção de água e nutrientes em profundidade. Assim a neutralização fica dependente de algumas propriedades do solo, como dose aplicada, tempo após a aplicação, além das características físicas e químicas dos solos (AMARAL & ANGHINONI, 2001; GATIBONI et al., 2003; KAMINSKI et al., 2005).

3.2.1 Tipos de acidez do solo

Segundo Lopes (1991), os solos podem ter sua acidez de originados da pobreza em bases do material de origem ou devido a processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos (K, Ca, Mg, Na), etc. A acidez pode ainda ser ampliada através de cultivos e adubações que acelera o processo. Em todos os casos, a acidificação inicia ou é ampliada pela remoção de bases da superfície dos colóides do solo.

A acidificação em sistema plantio direto mostra-se mais intensa em camadas superficiais do solo (CIOTTA et al., 2004), com acidificação menos intensa em camada mais profunda. Isto ocorre devido a deposição de resíduos culturais e renovação radicular, além do intenso uso de fertilização nitrogenada e, liberação de íons H^+ que reduz os valores de pH. Esse processo altera a disponibilidade de nutrientes, a rizosfera e o rendimento das culturas (SORATTO & CRUSCIOL, 2008; CASTRO & CRUSCIOL, 2013, JORIS et al., 2013).

A acidificação é um processo que ocorre naturalmente devido a: i) substituição de cátions básicos (Ca, Mg, K e sódio – Na que ocupam a capacidade de troca catiônica (CTC)), por Al trocável e H^+ não dissociado, ii) reação de nitrificação do amônio de adubos nitrogenados ou pela mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), iii) pela absorção de cátions básicos pelas culturas e exportação dos mesmos pelas colheitas e iv) uso inadequado de manejo do solo promovendo a erosão, expondo horizontes subsuperficiais (B ou C), naturalmente mais ácidos (RAIJ, V. 2011; SOUZA et al., 2007).

A acidez pode ocorrer de três formas nos solos: (i) acidez ativa ou atual, conhecida por potencial de hidrogênio iônico (pH); (ii) acidez trocável, representada pela quantidade de alumínio (Al) trocável, cuja hidrólise fornece prótons (H^+) ao meio; e (iii) acidez potencial, que é a soma da acidez trocável e não trocável ($H + Al$) (SOUZA et al., 2007; SHAMRIKOVAA & SOKOLOVAB, 2013).

3.2.2 Correção da acidez dos solos no estado do Paraná

Os solos do estado do Paraná são predominantemente ácidos, com elevada concentração de íons de hidrogênio e/ou alumínio, que liberam elementos tóxicos e disponibilizam menos nutrientes para as plantas, proporcionando baixos rendimentos das culturas (OLMOS & CAMARGO, 1976).

Historicamente, os estudos sobre as etapas da correção dos solos envolviam formas de aplicação focadas especificamente na eficiência da reação dos corretivos, visando a pronta liberação de nutrientes para as plantas, sem atentar para alterações nos atributos físicos do solo. Dessa forma, a interpretação da análise química do solo e os cálculos sobre a necessidade de calcário sempre considerou a camada de 0,0 – 0,20 m de profundidade, visto ser tradição a incorporação do corretivo ao solo (LOPES, 1991).

Os insumos empregados na correção da acidez do solo são carbonatos de cálcio ($CaCO_3$ - calcita) e de magnésio ((Ca, Mg) CO_3 - dolomita), conhecidos como calcário (NOLLA & ANGHINONI, 2004), que aumentam o rendimento e a eficiência do fertilizante pelas plantas, disponibilizando nutrientes e reduzindo concentrações de elementos potencialmente tóxicos (CASTRO & CRUSCIOL, 2013).

Na agricultura contemporânea, estudos apontam formas distintas para as práticas de correção do solo e com foco na eficiência do corretivo, incremento nos rendimentos e melhoria nos atributos físicos e químicos do solo. Sabe-se que a calagem quando incorporada ao solo tem o efeito corretivo ampliado pelo contato das partículas com o solo, para sistema

convencional e preparo mínimo, enquanto em sistema plantio direto a reação e disponibilização de nutrientes ocorre de forma lenta (SOUZA et al., 2007; CAIRES et al., 2005).

Para efeitos de cálculo de calagem, atualmente o mais usual no Estado do Paraná é fórmula pela saturação por bases (V%), onde se busca a elevação do V% para o mais próximo de 70% que atende as exigências da maioria das espécies. Esse método passou a ser adotado inicialmente no Estado de São Paulo, e posteriormente Paraná, por apresentar maior embasamento teórico e ser mais flexível. Baseia-se na relação existente entre pH e saturação por bases. Na fórmula são considerados parâmetros referentes à solo, corretivo e cultura específica (LOPES, et al., 1991).

Contudo, forma de aplicação sem incorporação do calcário, com aplicação em superfície, é necessário fazer uma reavaliação, sugerindo a fragmentação da dose, que é dependente do tipo de solo, textura e sistema de exploração.

Em sistema plantio direto, além da correção realizada em superfície, sem promover a degradação do solo pelas práticas mecânicas, as plantas exercem papel importante, protegem o solo por sua lenta decomposição, que diminui a ciclagem de nutrientes, em relação as formas de aplicação que revolvem o solo (BOER et al., 2007). E através da melhoria no desenvolvimento vegetativo das espécies, fruto da disponibilização de nutrientes, atua positivamente na qualidade física do solo (CARVALHO et al., 2010).

Este fato sugere que pela reação mais lenta haja ajustes na dose e intervalos de reaplicação, visto que a dose calculada para o perfil de 0,0 a 0,20 m deve ser diferenciada quando a aplicação for apenas superficial (sem incorporação), para que tenhamos atendidos nossos objetivos (CAIRES et al., 1998; POTTKER & BEN, 1998).

3.2.3 Efeito do calcário sobre os atributos químicos e físicos do solo

Aproximadamente 30% das terras do planeta que não são cobertas por geleiras apresentam problemas relacionados a acidez do solo, com altas concentrações de íons de alumínio (Al) (maior que $3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), manganês (Mn) (maior que $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e alta acidez [$\text{pH} < 4,0$ (em solução de cloreto de cálcio – CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$) ou menor que 5,0 (em água), além de deficiência de nutrientes como fósforo (P) (menor que $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ – Mehlich-1), cálcio (Ca) (menor que $3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), magnésio (Mg) (menor que $4,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e potássio (K) (menor que $0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (VON UEXKULL & MUTERT, 1995).

Normalmente, os insumos utilizados para a correção dos solos são os calcários, compostos por carbonatos de cálcio (CaCO_3 – calcita) e magnésio $[(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$ – dolomita], (NOLLA & ANGHINONI, 2004). De modo geral, a utilização dos corretivos buscam melhorias no rendimento pelo aumento da eficiência no uso dos fertilizantes pelas plantas, através do incremento na disponibilização dos nutrientes e pela redução dos elementos tóxicos (SORATTO & CRUSCIOL, 2008; CASTRO & CRUSCIOL, 2013).

Os indicadores químicos são relevantes para estudos agrônômicos e ambientais, e estão agrupados em quatro classes: a) os que indicam os processos do solo. Ex: pH, Carbono Orgânico; b) os indicadores da capacidade do solo em resistir à troca de cátions. Ex: Tipo de argila (1:1 ou 2:1), CTC, CTA, Óxidos de Ferro; Óxidos de Alumínio; c) os que indicam necessidades nutricionais das plantas. Ex: N, P, K, Ca, Mg e elementos traços (micronutrientes); d) os que indicam contaminação ou poluição. Ex: Metais pesados, nitrato, fosfato, agrotóxicos (GOMES & FILIZOLA, 2006). O pH < que 7 (ácido), pH = 7 (neutro) ou pH > que 7 (alcalino), controla e interfere na solubilidade de nutrientes no solo, com fundamental importância na absorção dos nutrientes pelas plantas.

A correção da acidez é fundamental para construção da fertilidade do solo, dando sustentabilidade aos sistemas de produção. Todavia, a eficiência e o efeito residual do corretivo utilizado são dependentes do grau de perturbação do solo, que tem sido distinto nos sistemas conservacionistas (BOER et al., 2007). Outro fator para o sucesso da correção da acidez dos solos é sua dependência da forma de aplicação, que promove a distribuição e o melhor contato do corretivo com as partículas do solo, ampliando a eficiência e acelerando sua reação (ALCARD, 1992). No entanto, a mobilização do solo contribui para a degradação do solo, pela ruptura de suas estruturas (BERTOL et al., 2001; DEXTER et al., 2007).

Num primeiro momento o cálcio (Ca) e magnésio (Mg), constituintes do calcário que possuem dupla valência, quando aplicados ao solo para neutralizar o alumínio (Al) que é elemento de tripla valência, se não forem tomadas algumas precauções, pode atuar na predisposição do solo a processo erosivo. Isso ocorre, segundo a literatura, pela substituição de um componente trivalente por um bivalente, que reduz ligações entre partículas e favorece a dispersão do solo, reduzindo a agregação do solo que é atributo positivo a sua qualidade física (DALBIANCO et al., 2007).

A correção da acidez com calcário, em longo prazo, pode alterar as características físicas e químicas no solo, onde o cálcio é considerado de grande poder indireto de floculação. Em alguns tipos de solo, o carbonato de cálcio de imediato acelera a dispersão de argilas, uma vez que possui cargas superficiais negativas, contrabalanceadas pelos cátions trocáveis, e em

suspensão coloidal estável se repelem mutuamente (SORATTO & CRUSCIOL, 2008; CASTRO & CRUSCIOL, 2013). Em longo prazo, conforme Dalbianco et al. (2007), isso estimula a produção de biomassa e resíduos orgânicos, com maior aporte de matéria orgânica (ácidos húmicos e polissacarídeos), com aumento na atividade microbiana e cátions que são benéficos à agregação do solo (HAYNES & BEARE, 1995). O pH, a força iônica e a composição iônica do solo pode exercer influência sobre a dispersão ou floculação de argilas.

A gênese e a mineralogia dos solos também exercem influência em sua qualidade física e química. A calagem, através de processo físico-químico pela redução de cargas positiva e aumento das cargas negativas promove a dispersão do solo (BUTIERRES, 1980), ocorrência comum em solos caulíníticos que tem pH PCZ baixo (PRADO, 2003). Conforme Ferreira et al. (1999), solos gibbsíticos favorecem a macroporosidade, enquanto que os caulíníticos apresentam ação contrária.

Num primeiro momento a reação química da calagem na solução do solo promove a desestruturação dos agregados, pela substituição do Al^{3+} (trivalente) pelo Ca^{2+} (bivalente). Num segundo momento, a agregação pode ocorrer pela ampliação de resíduos orgânicos da maior produção de biomassa vegetal, que é resultante da melhoria da fertilidade do solo, estimulando a atividade microbiana e pela maior quantidade de cátions, em escala de tempo mais longa (DALBIANCO et al., 2007. Segundo Prado (2003),

Esta é a razão pela qual se busca sistemas de produção que atuam positivamente na qualidade do solo e do meio ambiente (DORAN & PARKIN, 1994). Um bom exemplo é o sistema plantio direto que reduz as perdas de carbono e aporta maior quantidade de matéria orgânica no solo, proporcionando maior estabilidade aos agregados (RIBON et al., 2014; CASTRO FILHO, et al., 1991).

O carbono orgânico mesmo não constituindo nutriente para a planta, quando em baixos teores pode comprometer o rendimento pelo seu efeito na estrutura do solo, na disponibilidade de água para as plantas, e no seu poder de tamponamento pela presença de compostos que podem ser tóxicos às plantas (CASTRO & CRUSCIOL, 2013). Destacamos também o carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico ativo (COA) ou carbono da biomassa, sendo que o carbono orgânico total tem cerca de 10 a 20% do seu teor composto por carbono de biomassa (GOMES & FILIZOLA, 2006).

3.2.4 Benefícios da calagem no desenvolvimento e rendimento das plantas cultivadas

Tendo-se ciência da importância do cálcio e do magnésio para a maioria das culturas, bem como os efeitos da toxicidade do alumínio para as plantas, o uso de calagem para a correção da acidez do solo, elevação pH, neutralização do Al e aumento da disponibilidade de Ca, Mg e outros nutrientes, constituindo na atualidade uma das mais importantes práticas para a melhoria dos rendimentos (RAIJ, V. 2011).

Entre as diversas importâncias do cálcio (Ca) para as plantas, sua deficiência causa paralisação do crescimento de ramos e raízes devido a morte dos ápices meristemáticos, prejudicando o crescimento da raiz. Sua deficiência reduz o desenvolvimento e a produtividade da planta. Para o magnésio (Mg), sua deficiência pode reduzir o desenvolvimento das plantas, com reflexos na produtividade (SILVA et al., 2010).

Com referência ao alumínio (Al), metal abundante nos solos brasileiros, tem sua solubilidade ampliada em condições de pH abaixo de 5,5 e acima de 7,5, propiciando toxicidade iônica pelo excesso de Al e as vezes de Mn, e promovendo assim, carência de Ca e Mg. A faixa de pH responsável pelo aumento da solubilidade do Al ($< 5,5$ e $> 7,5$), é a mesma faixa de pH onde o P tem sua maior adsorção aos óxidos, ficando indisponível para as plantas (MALAVOLTA, 1980).

Pelas inibições fisiológicas provocadas pela deficiência do Ca e Mg para as plantas e a toxicidade do Al e Mn para a maioria das culturas e a indisponibilidade de nutrientes pelo baixo pH do solo, a calagem incrementa tem importante função na produção de biomassa radicular e aérea, além de potenciais incrementos de matéria orgânica no solo (FLOSS, 2002; SOUZA et al., 2007; CASTRO & CRUSCIOL, 2013, JORIS et al., 2013).

Todo este conjunto de processos que interagem entre si, de forma direta ou indiretamente, assume grande importância para o equilíbrio químico e físico do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado ao longo de dois ciclos de cultivo. O primeiro ciclo compreendeu o período de maio de 2012 a abril de 2013; e, o segundo ciclo, de maio de 2013 a abril de 2014. A descrição das atividades desenvolvidas seguirá os períodos mencionados.

4.1 Localização e características da área de estudo

O experimento foi conduzido em pequena propriedade rural de gestão familiar, localizada no distrito de Cerro da Ponte Alta (Figura 1), município de Irati, região sudeste do estado do Paraná, Sul do Brasil.



Figura 1 – Localização da área do estudo, no Município de Irati, região Sudeste do estado do Paraná.

A área selecionada para a realização do estudo está situada a $25^{\circ} 28' 0,66''$ S e $50^{\circ} 54' 14,13''$ O, e a 796 metros de altitude (Figura 2).



Figura 2 - Vista aérea da propriedade rural e dos limites (em vermelho) da área experimental.

4.2 Primeiro ciclo de cultivos

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb (clima subtropical úmido), com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C, ocorrência de geadas frequentes (mesotérmico), verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (IAPAR, 2009). A precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 1.601 mm, sendo o mês de agosto o mais seco e o de janeiro o mais chuvoso (Figura 3).

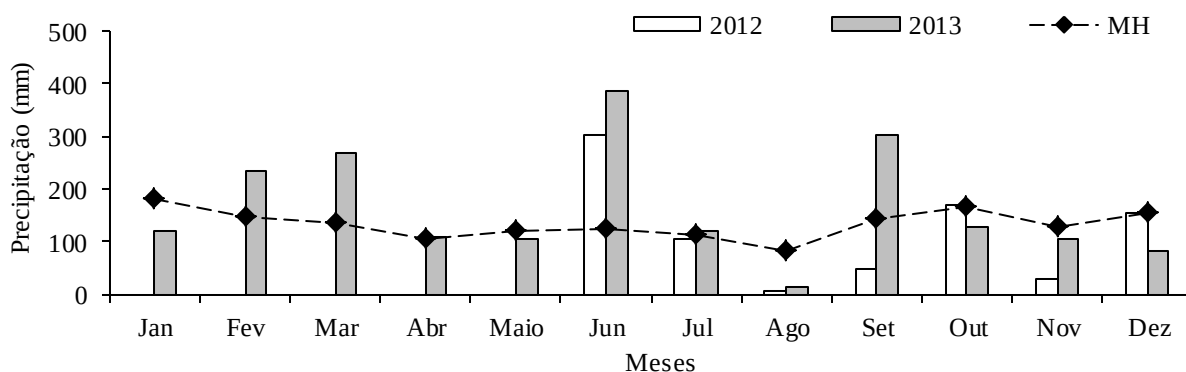


Figura 3 – Média histórica (MH)* de precipitação pluvial no período 1963-2013, e ocorrida entre maio de 2012 e dezembro de 2013. * Adaptado de Iapar (2014).

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as temperaturas máximas e mínimas e as precipitações pluviométricas ocorridas no primeiro e segundo ciclos de cultivos, respectivamente.

Nota-se na figura 4, que nos períodos entre 31 de julho e 30 de agosto de 2012 e entre 16 de abril e 08 de maio de 2013, não foram registradas ocorrências de chuvas. Na figura 5, no período que compreende 20 de julho e 14 de setembro de 2013, foram registradas apenas duas precipitações de baixa intensidade. Uma segunda estiagem observada ocorreu entre os dias 16 de janeiro e 15 de fevereiro de 2014, período em que foram observadas também as mais altas temperaturas do período (Figura 5).

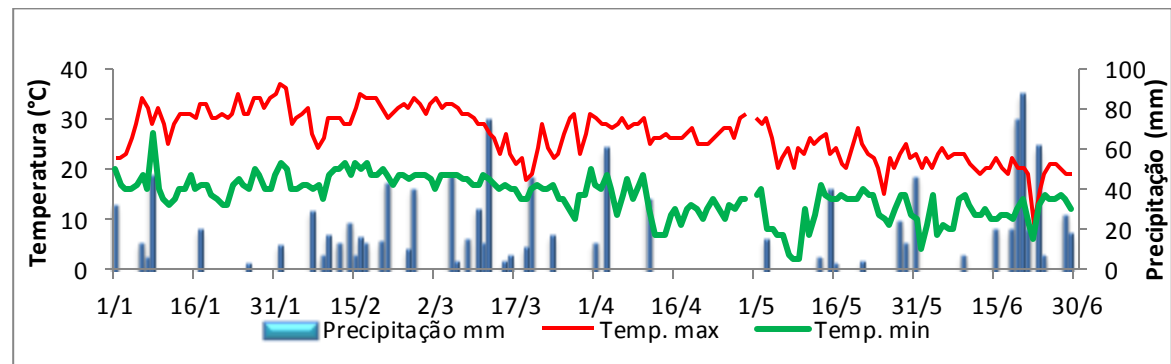
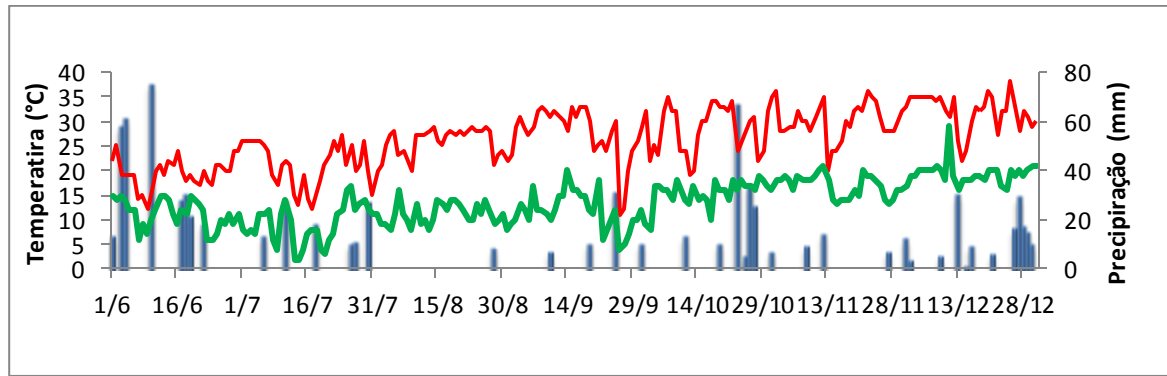


Figura 4 – Temperaturas (máximas e mínimas) e precipitações pluviométricas de junho a dezembro de 2012 e janeiro a junho de 2013 – primeiro ciclo de cultivos.

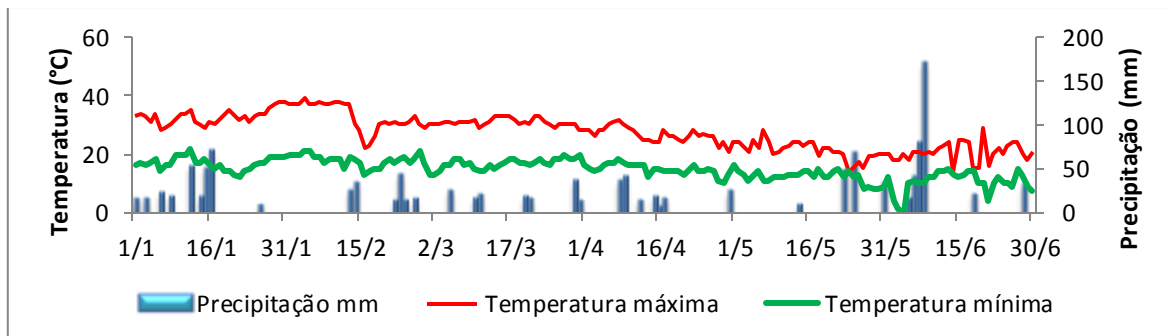
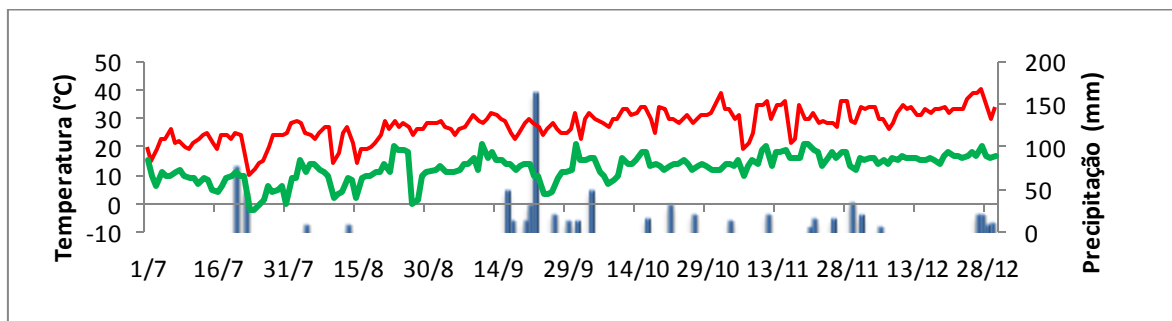


Figura 5 – Temperaturas (máximas e mínimas) e precipitações pluviométricas de julho a dezembro de 2013 e de janeiro a junho de 2014 – segundo ciclo de cultivos.

O experimento foi implantado em uma área de 0,2 hectare, sobre um Cambissolo Háplico aluminoso, textura argilo-siltosa. Esse solo teve sua gênese sobre rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos) da Formação Teresina (MINEROPAR, 2005). A mineralogia dos solos da região é composta, basicamente, por muscovita, quartzo e feldspato (minerais primários) e caulinita, illita, óxidos de ferro e de alumínio (gibbsita) (minerais secundários) (MARTINS, 2010).

A área vinha sendo utilizada com grama missioneira (*Axonopus pressus*) para o pastoreio de pequeno número reduzido de animais (equinos e bovinos), há mais de quarenta anos consecutivos. Esse tipo de exploração não exerceu pressão sobre a pastagem e o solo, o que foi confirmado pela avaliação visual da qualidade da estrutura do solo realizada preliminarmente, (dados não demonstrados), que permitiu classificar como Boa (Sq médio = 1,5) a qualidade da estrutura do solo da camada arável (BALL et al., 2007). Uma apresentação visual desta qualidade pode ser observada na figura 6. Também não havia qualquer registro de uso de corretivos ou fertilizantes inorgânicos.



Figura 6 – Estrutura do solo na fase inicial do experimento.

A área objeto do estudo teve sua conversão de mata nativa (floresta ombrófila mista) para pastagem com grama missioneira (*Axonopus catharinenses*) há mais de quarenta anos. Essa transformação ocorreu de forma gradativa, na medida em que os animais penetravam na mata para prover sua alimentação em períodos de escassez de forragem, promoviam o raleamento dos arbustos pelo pisoteio e assim ampliava-se a ocupação do sub-bosque por

espécies forrageiras adaptadas às adversidades regionais. Esta prática extensiva de manejo dos animais favoreceu a expansão da grama missioneira, trazida da região das missões e amplamente adaptada às condições de solo e clima da região Sudeste do Paraná.

Esse processo de expansão das forrageiras em sub-bosque foi favorecido devido a maioria das áreas da comunidade Cerro da Ponte Alta (local do experimento) ter sido parte de um sistema Faxinal, também conhecido regionalmente como criadouro comunitário. O sistema Faxinal, é definido como uma forma harmônica de utilização de áreas interligadas e cobertas por vegetações nativas que permitem o uso de criadouros extensivos e comuns, bem como extração de erva mate e de algumas espécies vegetais para consumo, como fonte de energia ou outras atividades de interesse comunitário (CHANG. 1988).

Este sistema de convívio social que teve sua formação a partir do século XVIII e perdeu importância principalmente com o surgimento da revolução verde no século XX. Dados levantados por Chang (1988) apontam que os Faxinais do Paraná já ocuparam lugar de destaque no Estado, chegando a ocupar um quinto do território Paranaense.

Desde a conversão da área para pastagem não houve registros de práticas de correção da acidez ou adubação química do solo. Além disso, o pastejo empregado sempre foi contínuo e com baixa taxa de lotação. O solo em estudo apresentava restrições químicas, observadas através de análise do solo, em amostra coletada e realizada no momento da seleção da área para a implantação do experimento (Tabela 2).

Tabela 2 – Atributos químicos e granulométricos da camada 0,0-0,20 m de profundidade do CAMBISSOLO HÁPLICO aluminoso antes da instalação do experimento (Maio de 2012).

pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC _(pH 7,0)
----- cmol _c dm ⁻³ -----						
3,7	17,6	5,3	1,0	0,6	0,46	19,66
P	CO	Areia	Silte	Argila	V	M
----- mg dm ⁻³ -----		----- g kg ⁻¹ -----		----- % -----		
2,7	28,3	40	467	493	10	72

pH= potencial hidrogeniônico em CaCl₂; H+Al= acidez potencial; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺= alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; CTC_(pH 7,0)= capacidade de troca de cátions potencial; P= fósforo disponível (Melich-1); CO= carbono orgânico (Walkley-Black); V e m= saturação por bases e por alumínio, respectivamente.

4.2.1 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos principais constaram de três formas de aplicação de calcário no solo (superficial, arado e escarificado), enquanto os secundários foram constituídos por quatro doses de corretivo. As tres formas de aplicação foram escolhidas porque representam as operações mais utilizadas pelos agricultores da região: i) sem incorporação do corretivo (**SI**), e ii) incorporação do corretivo com escarificador e grade niveladora (**IEG**). Utilizou-se calcário dolomítico com poder relativo de neutralização total de 77% (PRNT), nas doses: **T0** – sem calcário (testemunha); **T10** – calcário 10 Mg ha⁻¹; **T15** – calcário 15 Mg ha⁻¹; **T20** – Calcário 20 Mg ha⁻¹, calculadas para elevar a saturação por bases da camada de 0,0 - 0,20 m de profundidade, para 50%, 70% e 90% respectivamente, conforme interpretação da análise de fertilidade do solo preliminar da área. Nos tratamentos com incorporação, o corretivo foi aplicação em duas etapas: 50% da dose antes da escarificação e 50% depois da operação, antecedendo a gradagem de nivelamento do solo. Nos tratamentos sem incorporação (SI), o corretivo foi aplicado em dose única sobre a superfície do solo.

Após a implantação do experimento, nos cultivos de primavera/verão, apenas o manejo das plantas de cobertura de inverno e a semeadura foram realizadas mecanicamente, em sistema de semeadura direta (SSD). As semeaduras de inverno e as demais operações, (tratos culturais, fitossanitários e colheita), foram realizadas manualmente.

O delineamento experimental adotado, em função da mobilidade para realização das operações foi experimento em faixa com 5 repetições, em parcelas medindo 5,0 X 6,0 m, totalizando 30 m².

4.2.2 Aplicação dos tratamentos

A aplicação do calcário foi realizada manualmente e as doses foram dimensionadas com uso de balança de mesa. As doses foram pesadas e colocadas em baldes para favorecer a distribuição de forma mais uniforme sobre a superfície do solo (Figura 7). Para os tratamentos com doses mais elevadas (15 e 20 tha⁻¹), buscando-se melhor qualidade na distribuição, as porções foram fracionadas e a aplicação foi realizada em mais etapas, para melhorar a uniformidade na aplicação.



Figura 7 - Pesagem do calcário para constituição das doses a serem aplicadas.

Após a implantação do experimento, não houve mais uso de calagem e os cultivos de inverno e verão foram realizados em sistema plantio diretos, sendo a semeadura a única operação mecânica realizada, visando o controle de tráfego na área experimental.

4.2.3 Condução do experimento no primeiro e segundo ciclo de cultivos

4.2.3.1 Implantação e condução das culturas de outono/inverno

Depois da instalação do experimento (maio de 2012), com a aplicação das doses de calcário para cada tratamento e a realização das operações mecânicas foram semeadas as espécies de adubos verdes de inverno para a formação de biomassa e proteção vegetal do solo. Para isso, utilizou-se o cultivo consorciado de aveia preta (*Avena strigosa*) com ervilhaca peluda (*Vicia villosa*), na dose de $30 + 30 \text{ kg ha}^{-1}$, no outono/inverno. A semeadura foi manual em distribuição a lanço, apenas depositando as sementes sobre o solo. O cultivo de inverno não foi adubado, por se tratar-se apenas de produção de biomassa vegetal para a proteção do solo do impacto direto das chuvas e formação de biomassa para semeadura em plantio direto (SPD) na primavera/verão. As plantas daninhas foram erradicadas manualmente.

Quando a cobertura alcançou o estágio de florescimento pleno a grãos leitosos, realizou-se a dessecação da cobertura com herbicida sistêmico de amplo espectro (Glyphosate), na dosagem de $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$, conforme descrito por Rodrigues (1998). A

aplicação foi realizada com pulverizador de barras acoplado ao engate de três pontos do trator, com pontas 110.03 e vazão de calda de 250 L ha⁻¹, conforme tecnologia de aplicação sugerida por Zambolim et al. (2003).

4.2.3.2 Implantação e condução da cultura de primavera/verão

Entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro, semeou-se a cultura do milho (*Zea mays*) sobre a cobertura de inverno dessecada. Por se tratar de sistema de produção familiar e pela acidez do solo não ter sido realizada anteriormente, adotou-se milho variedade, cultivar IPR 164, que por ser obtido através de seleção massal é mais adaptado às adversidades, mais tolerante aos estresses bióticos e abióticos, que interferem no rendimento da cultura.

A semeadura do milho foi realizada com semeadora semimontada, acoplada ao engate de três pontos do trator, com distribuidor de sementes por discos horizontais e dosadores de adubo com rosca sem fim. Na adubação de base aplicou-se fertilizante da fórmula 08-28-16 (N – P₂O₅ – K₂O), na dose de 300 kg ha⁻¹. As doses de N, na semeadura e como adubação complementar, em cobertura, foram realizadas em conformidade com os resultados de análises químicas de rotina realizadas antes da implantação da cultura, considerando-se as exigências nutricionais das espécies cultivadas (Coelho et al., 2006).

As plantas daninhas na área experimental foram controladas com uso de herbicidas recomendados para as espécies inventariadas através de inspeções de campo, observando algumas características como seletividade para a cultura e registro específico do produto para a espécie cultivada, no Ministério da Agricultura Pecuária e do Abastecimento (MAPA). Como prática complementar de controle de invasoras não atingidas pelo controle químico, adotou-se o arranquio manual.

Semelhante ao manejo de plantas daninhas, o controle das pragas e doenças foram realizados com base em levantamento de campo (inspeção), e as aplicações de inseticidas ou fungicidas, foram realizadas com uso de equipamento costal manual, observando as orientações de tecnologia de aplicação sugerida por Zambolim et al. (2003).

4.2.4 Avaliações

4.2.4.1 Indicadores de qualidade física do solo

- Resistência do solo à penetração (RP) em função do conteúdo de água no solo (θ)

Durante o ciclo da cultura do milho, a partir do completo estabelecimento da população (emergência), foram realizadas determinações da resistência do solo à penetração (RP). O início das medições de resistência do solo a penetração e do conteúdo volumétrico de água no solo ocorreram 130 dias após a implantação do experimento. As determinações de RP seguiram o ciclo de precipitação pluviométrica ocorridas no local do experimento, para realizar leituras em diferentes condições de umidade do solo, com intuito de construir gradiente de umidade suficiente para a elaboração das curvas de resistência do solo ao longo do ciclo da cultura. Assim, as determinações foram realizadas em períodos de estresse hídrico (solo seco) e períodos com solo apresentando alto conteúdo de água, períodos posteriores a ocorrências pluviométricas.

A RP foi determinada a campo, com penetrômetro eletrônico modelo PLG 1020 da Falker Automação Agrícola, equipamento de tecnologia nacional com funcionamento normatizado pela ASABE (2009). As medições a campo ocorreram de forma automatizada, com o penetrômetro acoplado a um amostrador de solo eletromecânico desenvolvido por Figueiredo (2010), permitindo fazer medições com velocidade constante, equivalente a $5 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Utilizou-se a agulha com ponta cônica, área basal de $7,74 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ e ângulo de 30° , presa a uma haste cilíndrica de inox com 0,40 m de comprimento e $6 \times 10^{-3} \text{ m}$ de diâmetro.

Em cada parcela experimental foram efetuadas leituras de RP em dez (10) pontos distribuídos nas linhas (5) e entrelinhas (5) de semeadura do milho, nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade. Em seguida, os dados foram armazenados em computador, para posterior análise e obtenção das médias de RP por camada.

O conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) também foi determinado a campo, nos mesmos pontos da medida de RP. Para esta avaliação utilizou-se um sensor modelo Delta-T Devices (ML2x - ThetoProbe), que detecta o conteúdo volumétrico de água por meio de medições de mudanças na constante dielétrica aparente. Essas mudanças são convertidas em medidas de tensão elétrica que, dentro do intervalo de leitura do aparelho, proporcionais à umidade do solo. O conteúdo de água foi determinado para as mesmas camadas de solo onde determinou a RP.

A partir das medidas de resistência do solo em diferentes condições de umidade, foram geradas curvas de resistência do solo para os diferentes tratamentos avaliados. Essas curvas de resistência foram ajustadas em relação à umidade gravimétrica, utilizando-se o modelo proposto por Busscher et al. (1990): $RP = a\theta^b$

Onde: RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é a umidade do solo, a e b são parâmetros do ajuste do modelo.

4.2.4.2 Indicadores de rendimento das plantas cultivadas

- Biomassa de aveia preta consorciada com ervilhaca peluda

A produção de biomassa seca das plantas de cobertura de inverno foi mensurada através da coleta de cinco amostras ao acaso por parcela experimental, com uso de um quadro de madeira (Figura 8), medindo 0,50 x 0,50 m, equivalente a 0,25m² para cada ponto coletado (CRUZ et al., 2008; BORGES et al., 2013). As amostras foram embaladas em sacos de papel, identificadas e secas em estufa elétrica a 60 °C por um período de 72 horas, conforme metodologia descrita por Miyazawa et al., (1992). Após a secagem as amostras foram pesadas em balança eletrônica de precisão, para obtenção do rendimento de biomassa em kg ha⁻¹.



Figura 8 - Coleta de amostras para avaliação de biomassa seca das plantas de coberturas de inverno.

- Avaliação de biomassa de planta inteira do milho

Para determinar o rendimento de biomassa seca do milho (planta inteira), foram coletadas três amostras de um metro linear ao acaso para cada parcela experimental. De cada amostra, todas as plantas foram fragmentadas em pedaços pequenos, embaladas em pacotes de papel poroso, identificados e submetidos a secagem em estufa elétrica com circulação de

ar, a 60 °C por um período de 72 horas, conforme metodologia descrita por Miyazawa et al. (1992). Após a secagem as amostras foram pesadas em balança eletrônica de precisão para quantificação da matéria seca em kg ha⁻¹.

•População de plantas de milho

O percentual de emergência do milho (população inicial) foi obtido através da contagem do número de plântulas emergidas por metro linear, tão logo houve a estabilização da emergência das plântulas de milho. Para esta avaliação adotou-se duas linhas de cinco metros lineares, em pontos distribuídos aleatoriamente dentro das parcelas experimentais.

A população final da cultura foi avaliada quando a cultura completou seu ciclo produtivo, no estágio de maturidade fisiológica, o que foi feito através da contagem de duas linhas de cinco metros lineares ao acaso, para todas as parcelas experimentais.

•Rendimento de grãos de milho

Os rendimentos obtidos com os cultivos do milho foram avaliados através da colheita de duas linhas centrais de cada parcela experimental, descartando-se 0,5 m em cada extremidade para neutralizar o efeito bordadura. Dessa forma, foi colhida duas linhas com quatro metros lineares, na área central das repetições.

A colheita foi realizada manualmente, onde as espigas foram colhidas, despalhadas, debulhadas e limpas em peneira de arame e fluxo de ar natural. Após a limpeza, as sementes foram pesadas em balança eletrônica de precisão. Concomitantemente com a pesagem, determinou-se o teor de umidade do milho através de um aparelho determinador modelo universal, sendo o peso corrigido para umidade de 13%, valor que é aceito como padrão comercial para a maioria das espécies graníferas cultivadas, conforme sugerido por Fortiet al. (2010).

A fórmula matemática utilizada para a correção da umidade foi:

$$MS = MUc \cdot \frac{(100 - Uc)}{(100 - Ud)}$$

Onde: MS= massa seca; MUc = massa úmida de campo, Uc= umidade de campo, Ud=umidade desejada.

4.3 Segundo ciclo de cultivos

O segundo ciclo de cultivos e avaliações foi uma repetição do primeiro, e as avaliações realizadas foram às mesmas do primeiro ciclo de cultivo, com avaliações climáticas (precipitações pluviométricas e temperaturas máximas e mínimas), contagem de estande inicial e final da cultura do milho, determinações de resistência fdo solo a penetração, conteúdo volumétrico de água no solo, avaliações de biomassa seca das culturas de inverno e verão e rendimento de grãos do milho, seguindo os mesmos procedimentos metodológicos descritos para o primeiro ano. No entanto, na busca da obter maiores informações sobre as alterações do solo, incorporou-se algumas avaliações edafológicas para as quais apresentamos os procedimentos metodológicos na sequencia.

4.3.1 Avaliações

4.3.1.1 Indicadores de qualidade física do solo

•Densidade do solo

A densidade do solo é definida pela relação entre a massa de uma amostra de solo seca a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos seus poros. Para essa determinação de densidade do solo (Ds) foram coletadas amostras com Amostrador Uhland, ferramenta que é utilizada para coletar amostras indeformadas de solo superficial pouco compactado. O amostrador é composto por anel de alumínio com diâmetro e altura de 70 mm, acompanhado por anel adaptador fixado a um eixo em aço inox, deslizante para processar a penetração através do impacto de uma luva metálica deslizante sobre o eixo. Imediatamente após a coleta da estrutura indeformada nos anéis cilíndricos, realizou-se a padronização das amostras com uso de faca de serra, uniformizando-as nas dimensões do anel. Após a uniformização, as amostras foram removidas e acondicionadas em sacos plástico, lacradas com fitilho flexível e encaminhadas ao laboratório para processamento da secagem e posterior quantificação da densidade.

A coleta foi feita com um amostrador Uhland, realizada simultaneamente a realização da VESS, avaliação visual da qualidade estrutural (dados não apresentados), coletando-se as amostras na camada de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, em todos os pontos da realização da VESS.

As amostras foram secas em estufa elétrica com circulação de ar, com temperatura constante de 105 °C por um período de 24 horas ou até a estabilização da massa da amostra. Pelo volume de solo ser conhecido, pelo dimensionamento do cilindro, após determinação da massa da amostra, dimensionou-se a densidade do solo (D_s) (GROSSMAN E REINSCH, 2002), obtida pela equação.

$$D_s = \frac{M}{V}$$

•Textura do solo

As frações granulométricas das camadas do solo (argila, silte e areia) foram determinadas pelo método do densímetro, descrita por Grossman e Reinsch (2002). O método se baseia no princípio de que a matéria em suspensão (silte e argila) confere certa densidade ao líquido. Realizou-se também a determinação da média de cada fração (areia, silte, argila) e a classe textural correspondente às amostras coletadas nas camadas determinadas em função da qualidade estrutural, observada através de análise visual, pelo método VESS.

4.3.1.2 Indicadores de qualidade química do solo

Neste segundo ciclo de cultivos, após a colheita da cultura do milho, amostras foram coletadas em cada parcela experimental, varias porções que constituíram amostras compostas de solo. A coleta foi realizada em conformidade com as camadas identificadas pela técnica de avaliação visual da qualidade estrutural (VESS), correspondendo a camada superficial (C1) e camada subsuperficial (C2).

A determinação dos atributos químicos do solo (fertilidade) seguiram a metodologia sugerida por Pavan et al. (1992). Inicialmente, as amostras deformadas de solo foram secas a 40 °C por 24 a 48 h, trituradas em moinho de martelo, passadas em peneira de 2,0 mm, constituindo a amostra de terra fina seca ao ar (TFSA). Uma alíquota de 10 cm³ foi utilizada para determinação de Ca, Mg e Al, sendo o Ca e Mg pela solução de KCl 1M, para determinação por espectrometria de absorção atômica, enquanto o Al foi determinado pela solução de NaOH 0,02 M. o pH foi determinado em KCl. A acidez potencial (H+Al) foi determinada por uma solução tamponada a pH 7,0 (SMP). Para a determinação de P e K (em 5 cm³ de amostra de solo), foi utilizada solução Mehlich 1; e, em alíquota de 1 cm³, para determinação do carbono orgânico por Walkley-Black via combustão úmida. Outra alíquota

de 1cm³ de solo foi utilizada para a determinação do pH por solução CaCl₂ 0,01M. O índice de saturação por bases (V%) foi estimado pelo cálculo: SB/CTCx100.

O carbono orgânico do solo foi determinado pelo método Walkey-Black, metodologia descrita em Raij et al. (2001). Para análise do carbono utilizou-se amostras de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), resultante das amostras compostas coletadas nas camadas identificadas por ocasião da realização da análise visual da qualidade estrutural. De cada tratamento foram coletadas oito amostras (repetições), as quais foram divididas em duas camadas para serem analisadas e representar cada minitrincheira, constituindo ao todo cento e noventa duas amostras.

4.4 Análise dos dados

Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva e avaliação do intervalo de confiança das médias (15 %) para comparação dos tratamentos pelo programa “R”

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Primeiro ciclo de cultivos

5.1.1 Resistência do solo a penetração e conteúdo de água no solo

Na Tabela 2 estão dispostos os resultados da análise estatística descritiva para resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo, para as camadas 0,0 a 0,10m e 0,10 a 0,20m de profundidade, considerando as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro ciclo de cultivos.

Nas avaliações realizadas no primeiro ciclo de cultivos, para camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, entre doses e formas de aplicação do calcário, observou-se uma amplitude dos valores de θ em 0,18 m³ m⁻³, com medições oscilando entre 0,14 m³ m⁻³ e 0,32 m³ m⁻³. Para RP com a influência de θ , os maiores valores de RP não correspondem necessariamente aos pontos que apresentaram os menores valores de θ . Assis et al (2009), obtiveram RP mais altas próximo ao limite de contração do solo, e que o menor θ promove maior valor de RP (CUNHA et al., 2002). Nesta profundidade há uma grande contribuição da rizosfera e matéria orgânica na redução da RP.

As doses e formas de aplicação de calcário proporcionaram amplitude de RP de 1,72 MPa, na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, com medições entre 0,53 a 2,35 MPa. Os valores médios foram de 1,0 a 1,6 MPa.

As maiores RP ocorreram nos tratamentos SI, seguido pelo IEG, com os menores valores observados nos tratamentos IAG. As menores médias menores ocorridas nos tratamentos IAG pode estar relacionadas ao curto período de tempo decorrido entre a implantação do experimento e a realização das avaliações. Para Bertol et al. (2004), a degradação física do solo causada pelo preparo mecânico, altera a qualidade física do solo, enquanto que em solos não mobilizados a qualidade estrutural é mantida, pela conservação dos agregados maiores (SIX et al., 2004), proteção física para estrutura do solo (CASTRO FILHO et al., 1998). Os resultados observados nos tratamentos IAG sugerem ter sido influenciados pela mobilização na implantação do experimento, corroborando com as informações de Six et al. (2004) e Castro Filho et al. (1998).

O desvio padrão (Dp) apresentou variação entre 0,14 e 0,39, enquanto o coeficiente de variação (CV) teve variação de 13,56% a 27,69%, considerado bom para experimento em condições de campo. Trabalho de Imhoff et al. (2000), apresentou CV de 71,43%, enquanto Dalben & Osaki (2008), estudando a relação entre RP, Ds, θ e granulometria, obtiveram 9,05% e 15,53% para Dp e CV respectivamente.

Tabela 2- Análise estatística descritiva referente a resistência do solo a penetração (MPa) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, do primeiro ciclo de cultivos.

Resistência do solo a penetração RP													Resistência do solo a penetração RP											
Camada 0,0 – 0,10 m													Camada 0,10 – 0,20 m											
	Superficial				Arado				Escarificado				Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose												Dose											
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	2,02	2,36	1,84	1,94	1,21	1,31	1,03	1,34	1,50	1,51	1,31	1,22	3,56	3,14	3,04	2,98	2,54	2,43	2,32	2,45	2,72	2,54	2,46	2,64
Média	1,50	1,48	1,49	1,60	0,86	0,82	0,73	0,98	1,08	1,07	1,00	1,04	2,55	2,68	2,58	2,62	2,15	2,15	2,10	2,09	2,29	2,25	2,21	2,20
Mínimo	1,06	1,01	1,08	1,27	0,60	0,54	0,56	0,53	0,74	0,75	0,62	0,83	2,19	2,03	2,36	2,49	1,70	1,83	1,77	1,83	1,84	1,93	1,90	1,85
Dp	0,28	0,39	0,25	0,22	0,18	0,23	0,15	0,27	0,25	0,22	0,19	0,14	0,42	0,40	0,23	1,62	0,27	0,17	0,20	0,23	0,28	0,22	0,20	0,23
CV%	18,55	2,10	16,93	1,56	21,09	27,69	19,96	27,33	22,68	20,95	18,61	13,69	16,61	15,11	7,89	6,19	12,48	7,85	9,50	11,15	12,04	9,84	8,80	10,60
Conteúdo volumétrico de água no solo (θ)													Conteúdo volumétrico de água no solo (θ)											
Máximo	0,30	0,32	0,30	0,30	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,27	0,26	0,27	0,36	0,34	0,34	0,40	0,34	0,31	0,31	0,33	0,34	0,33	0,32	0,40
Média	0,26	0,28	0,27	0,26	0,20	0,19	0,20	0,21	0,21	0,23	0,24	0,24	0,32	0,31	0,32	0,31	0,31	0,29	0,28	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31
Mínimo	0,23	0,24	0,24	0,21	0,14	0,17	0,17	0,18	0,16	0,18	0,20	0,21	0,26	0,25	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,29	0,24	0,27	0,26	0,27
Dp	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
CV%	8,59	9,56	8,86	8,86	10,98	10,18	10,21	8,78	10,40	11,92	7,55	8,34	10,37	10,37	6,08	12,10	7,72	5,53	6,34	4,25	10,30	7,20	6,80	10,86

Dose em $t\ ha^{-1}$, desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV), conteúdo de água no solo (θ) em $m^3\ m^{-3}$.

Medições de umidade volumétrica (θ) na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para doses e formas de aplicação de calcário, apresentaram valores entre 0,14 m³ m⁻³ a 0,32, m³ m⁻³, com médias de 0,19 a 0,28 m³ m⁻³. Novamente os maiores valores de θ não correspondem aos pontos de maiores RP (Tabela 2), contrariando a maioria dos resultados disponíveis na literatura. Os valores do desvio padrão (Dp) foram baixos, variando entre 0,02 e 0,03, enquanto o CV variou de 7,55% a 11,92%.

Na camada de 0,10 – 0,20 m de profundidade, para RP as medições foram realizadas com valores de θ entre 0,24 m³ m⁻³ e 0,40 m³ m⁻³, e novamente os menores valores de θ não apresentaram os maiores valores de RP. As determinações de RP apresentaram variações entre 1,70 MPa e 3,56 MPa, com médias variáveis entre 2,10 MPa e 2,68 MPa. Esses valores médios de RP, independente dos valores de θ , foram superiores ao limitante para o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das espécies cultivadas, 2,0 MPa conforme Tormena et al., (1998). Seguindo a mesma tendência observada nas avaliações realizadas na camada 0,0 – 0,10 m, as maiores RP encontradas na camada 0,10 – 0,20m foram observadas nos tratamentos SI, enquanto os IAG e IEG apresentaram valores semelhantes entre si.

Esse resultado, onde os tratamentos SI tiveram maiores valores de RP que IAG e IEG pode se justificar pelo efeito da mobilização na implantação do experimento, onde os tratamentos IAG e IEG passaram pela desagregação da estrutura do solo, com alteração no estado de equilíbrio de sua estrutura, mais acentuada em sistema convencional de cultivo (DEXTER et al., 2007; BERTOL et al., 2004; TORMENA et al., 2002; BERTOL et al., 2001; KARLEN et al., 1997).

Semelhante aos resultados da primeira camada (0,0 a 0,10m), na camada 0,10 – 0,20m de profundidade foram observadas variações de 0,17 a 0,42 para Dp e de 6,19% a 16,61% para coeficiente de variação. Este resultado pode ser considerado como bom, principalmente por se tratar de experimento realizado em ambiente aberto, sem controle de variáveis. Isso sugere tratar-se de relação com o grande número de pontos avaliados, se comparado aos resultados de Dalben & Osaki (2008), que apresentaram Dp de 9,05 e CV de 15,53% em estudos sobre os atributos físicos do solo, também em condições de campo.

Quanto ao conteúdo volumétrico de água (θ) na camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, valores entre 0,24 m³ m⁻³ e 0,40 m³ m⁻³ foram obtidos, com médias variáveis de 0,28 m³ m⁻³ a 0,32 m³ m⁻³. Os tratamentos SI foram superiores, porém com menor destaque, enquanto IAG e IEG tiveram resultados semelhantes. Segundo Silva & Mielniczuck (1997), a mobilização mecânica rompe a estrutura do solo e a infiltração e a drenagem são favorecidas pela desestabiliza o solo (KAY & DEXTER, 1992), que altera a dinâmica da água

(BRONICK e LAL, 2005), deixando o solo vulnerável à alterações físicas (BERTOL et al., 2001; HANZA & MEDEIROS, 2005).

Os valores de Dp de 0,01a 0,04 e CV entre 4,25 e 12,10% foram considerados como valores adequados em função das condições de campo não permitir o controle das variáveis, principalmente se compararmos com resultados de experimentos semelhantes, onde Silveira et al., (2010) apresentaram CV de 120,48%, Lima et al., (2006) obteram CV de 49,2 a 55,2% e Imhoff et al (2002) obteram Dp de 1,42 e CV de 71,43%.

A Figura 9 apresenta o intervalo de confiança das médias de resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, em função das diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro ciclo de cultivos.

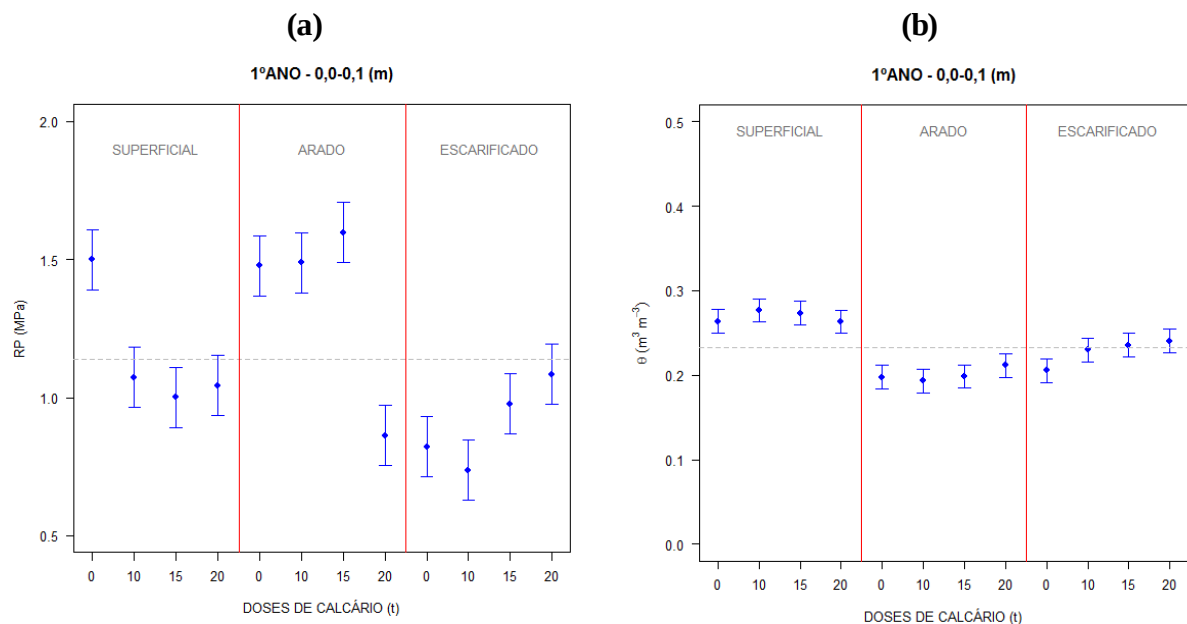


Figura 9 – Intervalos de confiança para médias de resistência do solo à penetração (RP, em MPa) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ , $m^3 m^{-3}$) (b) para a camada 0,0 a 0,10 m de profundidade, no primeiro ciclo de cultivos, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário.

Os resultados de RP para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade (figura 9 a), os valores de RP apresentaram variações em função de doses e formas de aplicação do calcário. Para doses aplicadas, destacaram como mais elevados valores de RP os tratamentos: T0 (SI); T0, T10 e T15 (IAG), com diferenças significativas em relação aos demais tratamentos. A RP médio foi de 1,2 MPa, e apenas os T0, T10, T15 IAG apresentaram valores superiores a linha média de RP. Com valores de RP iguais a linha de médias pelo intervalo de confiança,

destacam-se os tratamentos T10 e T20 (SI); T20 (IEG), enquanto T15 (SI), T20 (IAG) e T10, T15, T20 (IEG) apresentaram valores abaixo da linha média.

No entanto, os tratamentos com os maiores valores de RP e acima da linha média, mantiveram-se dentro de valores aceitáveis para o desenvolvimento radicular da maioria das espécies cultivadas, que segundo Tormena et al (1998), de forma consensual teve o limite estabelecido em 2,0 MPa. Esses valores obtidos e considerados aceitáveis podem ter sua justificativa na boa qualidade estrutural do solo, atributo observado na ocasião da escolha da área para instalação do experimento. Qualidade que sugere ser reflexo da influência positiva da cobertura vegetal de grama missioneira (*Oxonopus pressus*), pelo vasto conteúdo radicular, agregador e formador de carbono no solo, pelas plantas estabelecidas e pelo manejo de baixo impacto adotado nas últimas décadas.

Valores mais expressivos de RP observados nos tratamentos IAG pode ser resultante da quebra de estruturas pela mobilização para incorporação do calcário, auxiliado pela dispersão da substituição do Al pelo Ca e Mg, e pela percolação da água que promove a dispersão e o rearranjo das partículas unitárias, obstruindo os poros e endurecendo o solo (KOCHHANN et al., 2000).

Com referência ao conteúdo volumétrico de água, disposto na Figura 9 (b), a linha média apresentada foi de $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, apenas os valores obtidos nos tratamentos SI superaram essa linha média, com valores significativos em relação aos tratamentos IAG e IEG que apresentaram valores abaixo da média. Apenas os tratamentos T10, T15 e T20 IEG tiveram valores acima da média. Destaca-se que os tratamentos com os menores valores de θ apresentaram os maiores valores de RP (tratamentos IAG). Esse resultado corrobora com Benedtti et al., (2010) e Assis et al., (2009), que citam os baixos valores de θ pela ocorrência de altas RP. O maior valor de θ nos tratamentos SI pode ter influência do manejo com histórico de mais de 40 anos sem mobilização, maior consolidação, maior micro e macroporosidade, resultante da proteção vegetal permanente (CUNHA et al., 2002).

A Figura 10 apresenta o intervalo de confiança das médias de resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para a camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, em função das diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro ciclo de cultivos.

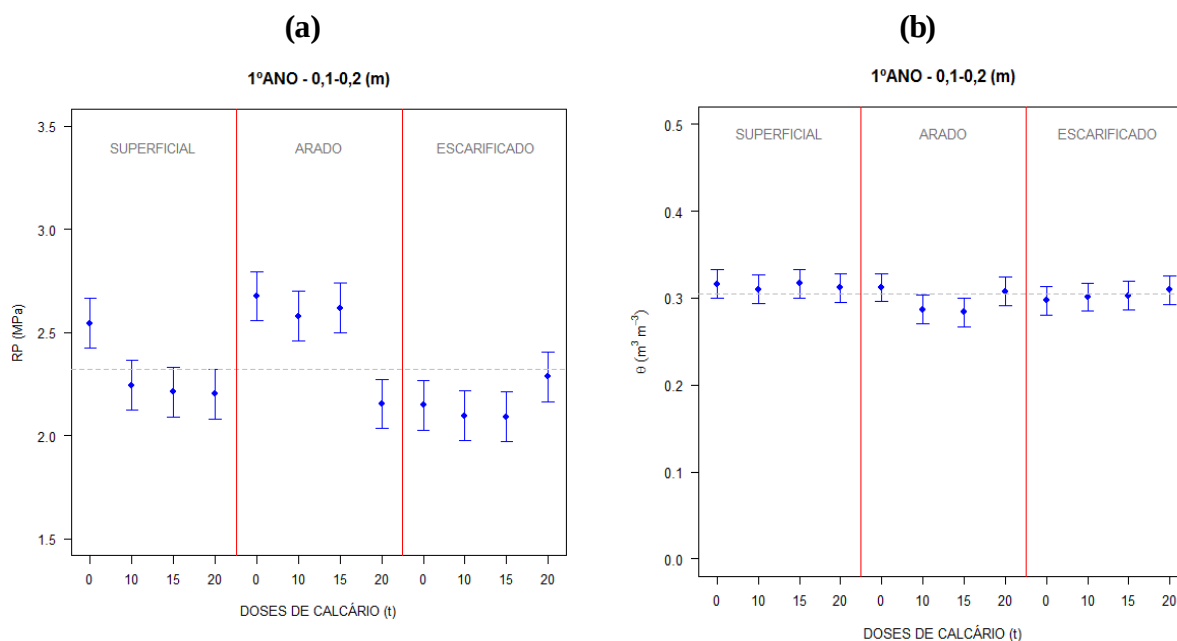


Figura 10 - Intervalos de confiança para médias de resistência do solo à penetração (RP, em MPa) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (b) para a camada 0,10 a 0,20 m de profundidade, no primeiro ciclo de cultivos, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário.

Sobre os valores de RP da camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, observa-se valores mais altos que na camada 0,0 – 0,10 m, para as formas e doses de calcário aplicado. Para formas de aplicação de calcário, os resultados apresentados são graficamente semelhantes a Figura 9 (a), mas com valores de RP mais elevados. Destaca-se médias de RP de 2,3 MPa, superiores ao valor limite para o crescimento de raízes, que segundo Tormena et al., (1998), 2,0 MPa. Os valores máximos observados ficaram em torno de 2,8 MPa.

Autores como Arshad et al. (1996) sugerem valores mais flexíveis como limitantes ao crescimento de raízes, entre 1,5 a 4,0 MPa, para Latossolo Roxo, mas com respeito as particularidades fisiológicas de cada espécie, quanto à biologia, química e física (FLOSS, 2002). Autores como Assis et al. (2009) destacam que em solos com umidade elevada não há impedimento para o crescimento de raízes, sendo que valores altos de RP são encontrados próximos aos valores de contração do solo, pois alta umidade reduz a força de coesão e atrito interno (CUNHA et al., 2002). Para Camargo & Alleoni (2006), fatores pedogenéticos podem adensar o solo em subsuperfície, e as partículas mais finas tem seu transporte favorecido, podendo preencher espaços vazios (poros) de camadas mais profundas e refletir na RP.

Sobre o conteúdo de água (θ), Figura 10 (b), observou-se valores médios em torno de $0,31 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, com pequena amplitude. Os valores máximos e mínimos variaram entre $0,30$ e $0,33 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, mesmo assim os valores de RP foram elevados, sugerindo tratar-se de relações

com a textura do solo e sua mineralogia. A pequena variação de θ pode ter relação com a proteção natural da camada superficial e resíduos mantidos sobre o solo durante todo o período (SALTON & MIELNICZUK, 1995).

Foram observados comportamentos semelhantes entre as curvas, para todos os tratamentos (Figura 11a), indicando que os valores para todas as doses apresentaram comportamento de ajuste ao modelo proposto por Busscher. Para resistência do solo à penetração (RP), o modelo de Busscher é destacado em diversos trabalhos por apresentar o melhor grau de correção, em função de levar em consideração de forma conjunta à influência da umidade na RP.

Na Figura 11 (a,b,c,d,e,f) estão apresentadas as curvas de ajuste para resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, obtidas em avaliações realizadas ao longo do primeiro ciclo de cultivos, para doses e formas de aplicação de calcário (SI, IAG e IEG).

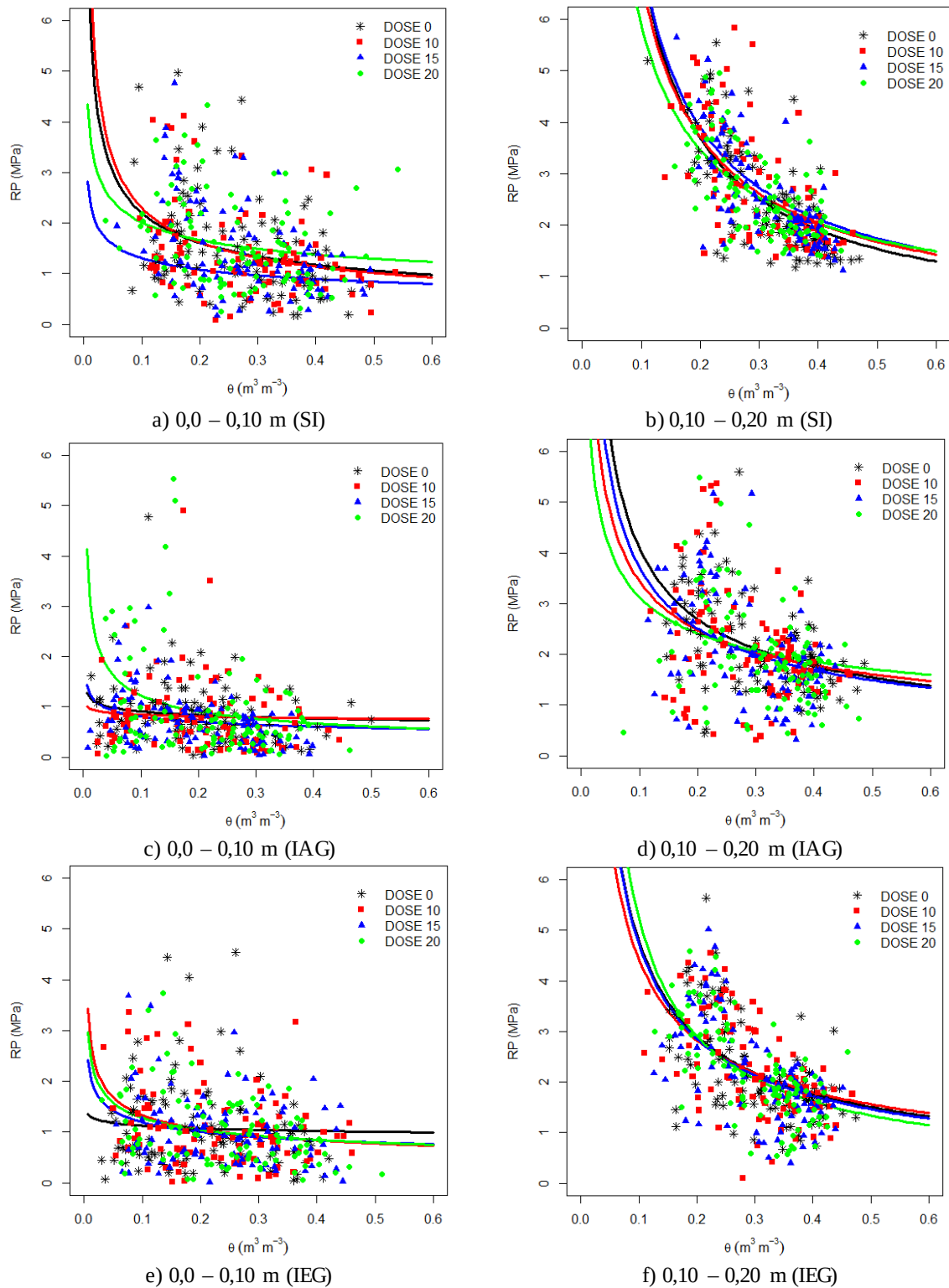


Figura 11 – Curvas de resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, no primeiro ciclo de cultivo, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário. (SI) - sem incorporação, (IAG) – incorporado com arado e grade e (IEG) – incorporado com escarificador e grade.

Para a camada de 0,0 – 0,10 m de profundidade observou-se a elevação da RP de forma mais acentuada para as menores doses de calcário (T0 e T10) (Figura 11a), com a redução do conteúdo volumétrico de água no solo, com ângulo de inflexão em $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. No entanto, para os demais tratamentos que também apresentaram reação semelhante, o ângulo de inflexão foi observado com menor conteúdo volumétrico de água, em torno de $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O tratamento T15 apresentou menor amplitude de elevação da RP em função da alteração no conteúdo de água, apresentando menor sensibilidade às alterações de θ , com menores RP em relação aos demais tratamentos. Para o T20, observou-se maior RP com valor médio de θ , embora com alterações pouco expressivas. Em conteúdo volumétrico de água (θ) inferior a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, o valor de RP foi maior que 2,0 MPa, considerado por Tormena et al. (1998), como valor crítico para o bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Pode-se ainda observar Figura 11^a pela reação dos valores de RP, que as menores doses aplicadas de calcário (T0, T10) apresentaram maior sensibilidade à redução do conteúdo volumétrico de água quando comparado com as demais doses na mesma forma de aplicação.

A redução no conteúdo de água no solo promoveu a elevação dos valores de RP para todos os tratamentos, no entanto, nas doses menores foi observada elevação de forma mais acentuada, destacando os tratamentos T0 e T10 da figura 11^a. Entre os tratamentos, o T15 apresentou a menor elevação de RP para conteúdo volumétrico de água de θ $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O T20 apresentou valores intermediários de RP. Apenas para conteúdo de água no solo inferior a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, foi possível observar valores de RP superiores ao valor crítico para o crescimento de raízes, 2,0 MPa segundo Tormena et al. (1998).

De maneira geral, os resultados observados na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade sugerem ter sido influenciado pelos conteúdos de matéria orgânica e massa radicular expressiva da grama missioneira. A constatação da quantidade de raízes produzida pela gramínea foi observada por ocasião da escolha da área experimental, juntamente com a avaliação da qualidade estrutural, considerada boa, adequada à instalação do experimento.

As Figuras 11c e 11e, em se tratando de curvas de ajuste de RP versus conteúdo volumétrico de água no solo (θ) observou-se semelhanças, com valores baixos em quase todas as faixas de conteúdo de água no solo, apresentando valores superiores a 2,0 MPa apenas em condições de conteúdo volumétrico de água no solo inferior a $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Contudo, na Figura 11 c, observa-se que o tratamento T20 destacou-se ao apresentar os maiores valores de RP em condições de solo com baixo conteúdo volumétrico de água, mostrando ângulo de inflexão em torno de $0,08 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, de forma mais abrupta que os demais tratamentos,

mostrando-se maior sensibilidade à redução de θ que os demais tratamentos. Os tratamentos T0 e T10 apresentados na Figura 11c não apresentaram comportamento ajustável ao modelo proposto por Busscher, portanto não sendo envolvidos nas discussões.

Observando a Figura 11 e, percebe-se que os tratamentos com doses de calcário (T10, T15 e T20) apresentam valores mais altos de RP em condições de baixo conteúdo de água no solo, embora com pequena sensibilidade. Observa-se ainda que o tratamento T0 não apresentou comportamento de ajuste ao modelo proposto por Busscher.

Os resultados considerados adequados de RP apresentados nas Figuras 11c e 11e sugerem tratar-se de influência da rizosfera abundante, elevado teor de carbono (Tabela 10) e a boa qualidade estrutural do solo. Segundo Lal (2000), a qualidade física do solo é importante para troca gasosas, suprimento de água e atividades biológicas, dependentes da Ds, RP, porosidade e estabilidade de agregados (ARAÚJO et al., 2012), influenciadas pelo manejo (KARLEN et al., 1997).

Com base nos resultados dispostos nas Figuras 11 a, 11 c e 11 e, observa-se a estabilização da RP em valores não limitantes numa maior amplitude de conteúdo de água no solo, onde o coeficiente angular para a camada 0,0-0,10 m de profundidade a relação RP x θ apresenta uma menor resposta a variação do conteúdo de água no solo, com alteração abrupta em condições de umidade volumétrica muito baixa.

Com referência a RP versus θ apresentado na Figura 11 b, para a camada 0,10-0,20m de profundidade, observou-se elevação abrupta na medida em que o solo tem seu conteúdo volumétrico de água reduzido. Esse resultado mostra que nesta profundidade a RP apresenta mais sensibilidade a redução de θ do que a camada superficial, sugerindo ser resultante da diminuição do teor de matéria orgânica e massa radicular. A redução do volume de raízes e da matéria orgânica em maiores profundidade é fato comprovado por diversos pesquisadores (FERREIRA et al., 2011; BERTOL El al., 2001; TIEDALL & OADES, 1980).

Com conteúdo de água próximo a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, os valores de RP se aproximaram de 2,0 MPa, sugerindo que esse tipo de solo apresenta valores próximos ao limitante para raízes, mesmo em condições de umidade alta, possivelmente pela textura. Pelas condições apresentadas para esta profundidade, e pelo estabelecimento de 2,0 MPa como limitante (TORMENA et al., 1998), fica uma pequena faixa de umidade viável à exploração vegetal, considerando a literatura como soberana. Contudo, trabalho de Tormena et al. (1998) aponta faixa mais flexível de RP como limitante ao crescimento de raízes, sugerindo entre 1,5 a 3,0 MPa.

A medida sobre a Figura 11 b, com conteúdo de água no solo abaixo de $0,35 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, a RP passa de 2,0 MPa, e em condições de estresse hídrico acentuado, com θ inferior a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ o valor de RP ultrapassou 6,0 MPa, superando inclusive a fragmentação de RP para solo argilos proposto por Sene et al. (1985). Os mesmos autores propõem uma fragmentação nos valores de RP tidos como limitantes, sugerindo como valores de RP restritivos quando forem superiores a 2,5 MPa para solos argilosos e acima de 6,0 a 7,0 MPa para solos arenosos, sugerindo que a classe textural tem grande importância na definição de faixa limitante de RP para o desenvolvimento radicular.

Para as curvas de ajuste apresentadas nas Figuras 11d e 11f para a camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, os resultados foram semelhantes. Nos dois casos os pontos de medições de RP foram registrados até o conteúdo de água de $0,45 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, onde ocorreram os menores valores de RP, 1,8 MPa para a Figura 11 d e 1,5 MPa para Figura 11 f. Contudo, observa-se que para as curvas da Figura 11 d observou-se um pouco menos sensibilidade a redução do conteúdo de água no solo, do que pode para as curvas apresentadas na Figura 11 f. Nos dois casos (Figura 11 d e 11f), os valores de RP apontaram 2,0 MPa com conteúdo volumétrico de água no solo próximo a $0,35 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, condição esta, considerada de alta umidade.

Os maiores coeficientes angulares observados, com base nos resultados dispostos na Figura 11 d e 11 f, ocorreram quando o conteúdo volumétrico de água se aproximou de $0,25 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $0,20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ respectivamente.

Diferente do observado para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, os valores obtidos de RP com o maior valor de θ são próximos ao citado como crítico para o crescimento de raízes. Esses resultados de certa forma se assemelham aos obtidos por Dalben & Osaki (2008), que para Cambissolo Háplico coberto por floresta nativa, apresentou maior densidade do solo (DS) em profundidades maiores, sugerindo ter ligação com a classe do solo, pela semelhança dos resultados.

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 11b, 11d e 11f, os mesmos apresentaram comportamento ajustável ao modelo matemático proposto por Busscher, e o modelo exponencial proporcionou aferição adequada em relação aos valores de θ versus RP (SILVEIRA et al., 2010).

Para todas as curvas apresentadas dispostas nas Figuras (11a, 11b, 11c, 11d, 11e e 11f), observou-se uma grande dispersão entre os valores de RP tanto para doses quanto para formas de aplicação do calcário, sugerindo ter relação com as condições adversas encontradas em pesquisa de campo.

De maneira geral, para as curvas dos resultados da camada 0,10-0,20 m de profundidade (Figuras 11 b, 11 d e 11 f), apresentam uma sensibilidade de resposta da RP na medida em que o solo tem redução no conteúdo de água. Esse resultado diferente do observado nas curvas da camada 0,0-0,10 m de profundidade, reforçam a contribuição do conteúdo de matéria orgânica na superfície (BERTOL et al., 2001) e da massa de raiz produzida pelas diferentes espécies vegetais (FLOSS, 2002).

Na Tabela 3 estão dispostos os resultados da análise estatística dos parâmetros de ajuste dos modelos “a” e “b” referente à resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo de água no solo (θ), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20m de profundidade, para o primeiro ciclo de cultivos.

Com base nas análises entre os parâmetros “a” e “b” dos ajustes de RP para os tratamentos envolvendo doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro ciclo de avaliações, para a camada 0,0 – 0,10m de profundidade foram observadas distorções entre os valores de R^2 . Os valores variáveis de R^2 obtidos não apresentaram uma sequência lógica, dificultando o entendimento dos fatores que levaram a tais ocorrências. Os baixos R^2 , comparados à resultados disponíveis na literatura, podem ser considerados como insatisfatórios, compreensíveis por se tratar de experimento a campo, com variáveis naturais não controláveis. Apesar do elevado número de repetições utilizadas por tratamento, as variações ocorrem em todo o experimento, tanto para doses quanto para as formas de aplicação de calcário.

Tabela 3 – Parâmetros de ajustes “a” e “b” da resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo de água no solo (θ), para camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20m de profundidade, no primeiro ciclo de cultivos, para diferentes doses e formas de aplicação de calcário.

ANO 1					
0,0 – 0,10 m			0,10 – 0,20 m		
Método	Dose	Modelo Ajustado	R^2	Modelo Ajustado	R^2
Superficial	T0	RP = 0.7768*** $\theta^{-0.4520**}$	0.1069	RP = 0.7934*** $\theta^{-0.9558***}$	0.5106
	T10	RP = 0.7141*** $\theta^{-0.5084**}$	0.0894	RP = 0.9194*** $\theta^{-0.8674***}$	0.4026
	T15	RP = 0.6955*** $\theta^{-0.5392***}$	0.1831	RP = 0.9494*** $\theta^{-0.8774***}$	0.4010
	T20	RP = 1.0727*** $\theta^{-0.2736**}$	0.0657	RP = 1.0070*** $\theta^{-0.7671***}$	0.3718
Aração	T0	RP = 0.6891*** $\theta^{-0.1210}$	0.0176	RP = 1.0123*** $\theta^{-0.6074***}$	0.2202
	T10	RP = 0.7362*** $\theta^{-0.0598}$	0.0027	RP = 1.1545*** $\theta^{-0.4742**}$	0.0986
	T15	RP = 0.5045*** $\theta^{-0.2050*}$	0.0709	RP = 1.0028*** $\theta^{-0.5690***}$	0.1834
	T20	RP = 0.4531*** $\theta^{-0.4326**}$	0.0702	RP = 1.3175*** $\theta^{-0.3754*}$	0.0737
Escarificação	T0	RP = 0.9589*** $\theta^{-0.0694}$	0.0034	RP = 0.9160*** $\theta^{-0.7186***}$	0.2902
	T10	RP = 0.6145*** $\theta^{-0.3363**}$	0.0838	RP = 0.9959*** $\theta^{-0.6480***}$	0.2742
	T15	RP = 0.6699*** $\theta^{-0.2514**}$	0.0400	RP = 0.8819*** $\theta^{-0.7303***}$	0.3124
	T20	RP = 0.6451*** $\theta^{-0.2983**}$	0.0836	RP = 0.7420*** $\theta^{-0.8495***}$	0.4472

Nível de significância: *** significante a 0,001, ** significante a 0,01, * significante a 0,05, () não significante.

Para os parâmetros “a” da camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, a maioria apresentou nível de significância 0,001, exceto o tratamento T20 IAG que teve nível de significância de 0,01. Entretanto, para os parâmetros “b” da mesma camada, os níveis de significância mostraram-se mais dispersos; os tratamentos T15 SI apresentaram significância a 0,001, os tratamentos T0, T10, T20 (SI); T20 (IAG); T10, T15 e T20 (IEG), todos apresentaram nível de significância de 0,01 e apenas o tratamento T15 (IAG) apresentou significância a 0,05. Para o parâmetro “b”, os tratamentos T0 e T10 (IAG) e T0 (IEG) não se ajustaram ao modelo proposto por Busscher.

Com referência as avaliações realizadas na camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, os valores de R^2 apresentaram-se pouco melhores que os obtidos na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, porém, sem apresentar uma sequência lógica para as variáveis dos valores de R^2 . Isso sugere que os menores valores de R^2 observados nos tratamentos onde o corretivo foi incorporado com aração e gradagem, tenha relação com o rompimento da estrutura do solo pelos implementos mecânicos, onde solo mobilizado apresenta menor resposta de RP em função do conteúdo de água no solo. Com relação ao parâmetro “a” para camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, todos os tratamentos (doses e formas) apresentaram nível de significância 0,001. No entanto, para o parâmetro “b” apresentou variações nos níveis de significância, os tratamentos T0, T10, T15 e T20 (SI); T0 e T15 (IAG); T0, T10, T15 e T20 (IEG) apresentaram significância a 0,001; nos tratamentos T10 (IAG) observou-se significância 0,01, enquanto para o tratamento T20 (IAG) o nível de significância foi de 0,05.

Contudo, todos os tratamentos apresentaram comportamento ajustável ao modelo proposto por Busscher.

Os valores baixos de R^2 , principalmente os observados na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade pode ter influenciados de fatores externos, refletindo a realidade de experimentos conduzidos a campo, se comparado aos resultados de curvas de resistência a penetração de Giarola (2002) que apresentou R^2 na ordem de 0,97 e 0,66 respectivamente.

Na Tabela 4 constam os resultados do teste de tukey para os parâmetros “a” e “b” dos modelos ajustados das curvas de resistência do solo a penetração (RP), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, no primeiro ciclo de cultivo, das diferentes doses e formas de aplicação do calcário.

Tabela 4 – Teste de médias para os parâmetros “a” e “b”, dos modelos ajustados das curvas de resistência do solo a penetração, para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade do primeiro ciclo de cultivo.

Tratamento		Ano 1				Ano 1			
		Parâmetros “a”				Parâmetros “b”			
Forma	Dose	0,0-0,10 m		0,10-0,20 m		0,0-0,10 m		0,10-0,20 m	
		Média		Média		Média		Média	
Superficial	T0	0,776	A	0,793	A	0,452	A	0,959	A
“	T10	0,714	A	0,920	A	0,508	A	0,867	A
“	T15	0,695	A	0,950	A	0,508	A	0,877	A
“	T20	1,073	A	1,007	A	0,539	A	0,767	A
Arado	T0	0,689	A	1,012	A	0,121	A	0,607	A
“	T10	0,736	A	1,155	A	0,060	A	0,474	A
“	T15	0,505	A	1,003	A	0,205	A	0,569	A
“	T20	0,453	A	1,317	A	0,433	A	0,375	A
Escarificado	T0	0,959	A	0,916	A	0,069	A	0,718	A
“	T10	0,615	A	0,996	A	0,336	A	0,648	A
“	T15	0,670	A	0,882	A	0,251	A	0,730	A
“	T20	0,645	A	0,742	A	0,298	A	0,849	A

Médias seguidas de mesma letra não apresenta diferença estatística significativa entre formas e doses de aplicação de calcário, pelo teste de Tukey < 0,05.

Com base nos resultados obtidos para a camada de 0,0 a 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, para o primeiro ciclo de avaliações não foram observadas diferenças significativas pela análise estatística.

5.2 Segundo ciclo de cultivos

5.2.1 Relação entre resistência do solo à penetração e conteúdo de água no solo

Na tabela 5 estão dispostos os resultados da análise estatística descritiva referente a resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas 0,0 a 0,10m e 0,10 a 0,20m de profundidade, considerando doses e formas de aplicação de calcário, no segundo ciclo de cultivos.

Com referência as avaliações realizadas ao longo do segundo ciclo de cultivos, na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para doses e formas de aplicação de calcário observou-se uma amplitude do conteúdo volumétrico de água no solo (θ) de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com medições de RP variando entre $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Isso reflete as condições de campo que foram realizadas as avaliações, atendendo as expectativas da pesquisa. Os valores de RP das avaliações do segundo ciclo de cultivos, considerando a influência de θ , apresenta certo contraste nos resultados, visto que os maiores valores de RP não corresponderam necessariamente aos pontos de menor θ . Resultado que contraria as informações de Assis et al (2009), que citam a ocorrência de maiores RP próximos ao limite de contração do solo, e a

maior resistência a deformação ou penetração de raízes ocorre em solos com menores θ (CUNHA et al., 2002; IMHOFF et al., 2000; CAUSARANO, 1993).

Os valores de RP para camada 0,0 – 0,10 m de profundidade apresentaram variação entre 0,42 a 2,10 MPa, com valores médios de 0,90 a 1,24 MPa. Apesar da amplitude da RP, as médias não ficaram muito acima do valor crítico para o crescimento de raízes. Apenas alguns dos valores máximos apresentaram problemas ao desenvolvimento de plantas.

Valores de RP inferiores a 2,0 MPa não limitam o crescimento de raízes das plantas (IMHOFF et al., 2002; TORMENA et al., 1998). Alguns pesquisadores sugeriram valores mais flexíveis de RP como impeditivos, como Tormena e Ruloff (1996) com 1,5 a 3,0 MPa, Canarache (1990) sugere RP superior a 2,5 MPa. No entanto, Sene et al. (1985) propoe a fragmentação dos valores em função da textura, a partir de 2,5 MPa para solos argilosos e acima de 6,0 a 7,0 MPa para solos arenosos. Porém permanece o consenso de 2,0 MPa como limite máximo, a partir do qual o crescimento radicular é limitado (TORMENA et al., 1998).

Os valores de RP nos tratamentos IAG foram menores que as demais formas de aplicação do calcário, e pode ser efeito remanescente da mobilização para a implantação, apesar do tempo transcorrido. Contudo, por ser a camada superficial, mais influenciada pelo manejo (SILVA & MIELNICZUK, 1997), a duração dessa condição favorável, se deve ao rígido controle de tráfego na área, com entrada de máquinas apenas para a semeadura de verão. Os tratamentos SI e IEG que apresentaram valores de RP mais elevados, podem estar relacionados com a não mobilização do SI e ao preparo mínimo do IEG, que para Six et al. (2004) amplia agregados maiores e melhora a estrutura do solo (CASTRO FILHO et al., 1998).

Sobre os valores de θ para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, os valores das diferentes formas de aplicação de calcário foram similares, apenas algumas doses tiveram valores menores. Como observado nos tratamentos T0 SI e IEG que apresentaram os menores valores de θ .

Para reduzir os efeitos de condições adversas do campo, um número elevado de pontos foi avaliado. Assim, o desvio padrão (Dp) e o coeficiente de variação (CV) apresentaram valores adequados, Dp 0,21 a 0,39 e CV entre 16,56% e 34,83%, onde apenas o valor máximo do CV foi pouco alto, comparados a trabalhos similares de Silveira et al., (2010), com CV de 49,2 a 55,2%, e Dp de 1,42, enquanto Imhoff et al., (2000) obtiveram 71,43% de CV, todos superiores aos obtidos no experimento em estudo.

Tabela 5- Análise estatística descritiva referentes à resistência do solo a penetração (MPa) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, do segundo ciclo de cultivos.

Resistência do solo a penetração (RP)													Resistência do solo a penetração (RP)											
Camada 0,0 – 0,10 m													Camada 0,10 – 0,20 m											
Superficial				Arado				Escarificado					Superficial				Arado				Escarificado			
Dose													Dose											
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	1.28	1,39	1.59	1,97	1,42	1,27	1,18	1,55	1,55	2,10	1,49	1,32	2,64	2,55	2,60	2,58	2,73	2,94	2,77	2,93	2,65	2,63	2,48	2,66
Média	0,91	1,05	1.24	1,22	0,90	0,97	0,95	0,98	1,17	1,22	1,16	1,05	2,14	2,21	2,26	2,26	2,25	2,23	2,06	2,21	2,36	2,28	2,20	2,19
Mínimo	0,51	0,50	0,78	0,80	0,55	0,58	0,42	0,48	0,71	0,67	0,61	0,70	1,87	1,59	1,86	1,95	1,77	1,67	1,66	1,59	2,05	1,58	1,49	1,77
Dp	0,26	0,25	0,21	0,39	0,30	0,22	0,27	0,33	0,29	0,43	0,25	0,21	0,29	0,28	0,24	0,21	0,31	0,36	0,35	0,45	0,21	0,30	0,30	0,31
CV%	28,36	23,80	16,56	31,72	32,82	23,07	28,58	34,19	25,14	34,83	21,40	19,68	13,59	12,86	10,80	9,36	13,92	16,11	17,04	20,33	8,73	13,10	13,44	14,16
Conteúdo volumétrico de água no sol (θ)													Conteúdo volumétrico de água no solo (θ)											
Máximo	0,26	0,26	0,26	0,27	0,23	0,27	0,24	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	0,30	0,32	0,31	0,31	0,31	0,32	0,31
Média	0,21	0,22	0,23	0,23	0,18	0,24	0,21	0,22	0,19	0,23	0,22	0,21	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,28	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29	0,29
Mínimo	0,16	0,19	0,20	0,19	0,16	0,18	0,18	0,19	0,15	0,20	0,18	0,19	0,24	0,28	0,28	0,28	0,26	0,27	0,27	0,28	0,25	0,25	0,27	0,26
Dp	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
CV%	17,6 4	1.17	10,13	12,34	11,41	6,17	8,95	9,23	13,55	8,06	8,90	8,65	10,14	5,21	3,39	3,76	5,17	3,93	4,80	2,84	7,66	6,62	6,04	5,21

Dose em t ha^{-1} , desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV), conteúdo de água no solo (θ) em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

Na camada de 0,10 – 0,20 m de profundidade, durante o período de medições da RP, os valores de θ apresentaram amplitude de $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com menor valor de $0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e máximo de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Porém, os maiores valores de RP não foram obtidos necessariamente aos pontos de menor θ , diferindo de Cunha et al. (2002).

Para camada 0,10 – 0,20 m, os valores de RP apresentaram amplitude de 1,45 MPa, com valor mínimo de 1,49 MPa e máximo de 2,94 MPa, enquanto as médias variaram entre 2,06 MPa e 2,36 MPa. Apesar da média de θ ter sido superior a camada 0,0 – 0,10 m, os valores de RP também foram superiores a primeira camada (0,0 – 0,10m), contrastando o proposto por Silveira et al., (2010) e Causarano (1993) que quanto maior o θ menor a RP. Observação que se estende aos valores médios que se apresentaram altos, acima do limite sugerido por Tormena et al. (1998).

Ao analisar os resultados da Tabela 5, sobre o conteúdo de água no solo (θ), para a camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, quanto as formas de aplicação de calcário foi possível observar alterações de valores, onde os tratamentos SI apresentaram valores superiores as demais formas de aplicação, enquanto os tratamentos IAG e IEG, com valores menores que os SI, foram iguais entre si.

Apesar do tempo decorrido entre a instalação do experimento, com alguns tratamentos adotando práticas mecânicas desagregadoras de solo, mesmo com o início das medições do segundo ciclo de cultivos ter ocorrido 17 meses após a aplicação dos tratamentos, os menores valores nos tratamentos IAG e IEG pode ter influência do revolvimento do solo na implantação do experimento. A mobilização do solo rompe as estruturas e altera a infiltração e drenagem da água no solo (BAYER & MIELNICZUK, 1997; BRONICK e LAL, 2005), propiciando alterações físicas (BERTOL et al., 2001; HANZA & MEDEIROS, 2005).

Na mesma sequência observada nas descrições anteriores, o desvio padrão (Dp) e coeficiente de variação (CV) apresentaram resultados entre 0,21 e 0,45 para Dp e 8,73% a 20,33% para CV, valores adequados para trabalho em condições adversas. A uniformidade de valores pode ter relação com a profundidade avaliada que é menos influenciada pelo manejo (HANZA & MEDEIROS, 2005).

A Figura 12 apresenta o intervalo de confiança das médias de resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ) para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no segundo ciclo de cultivos.

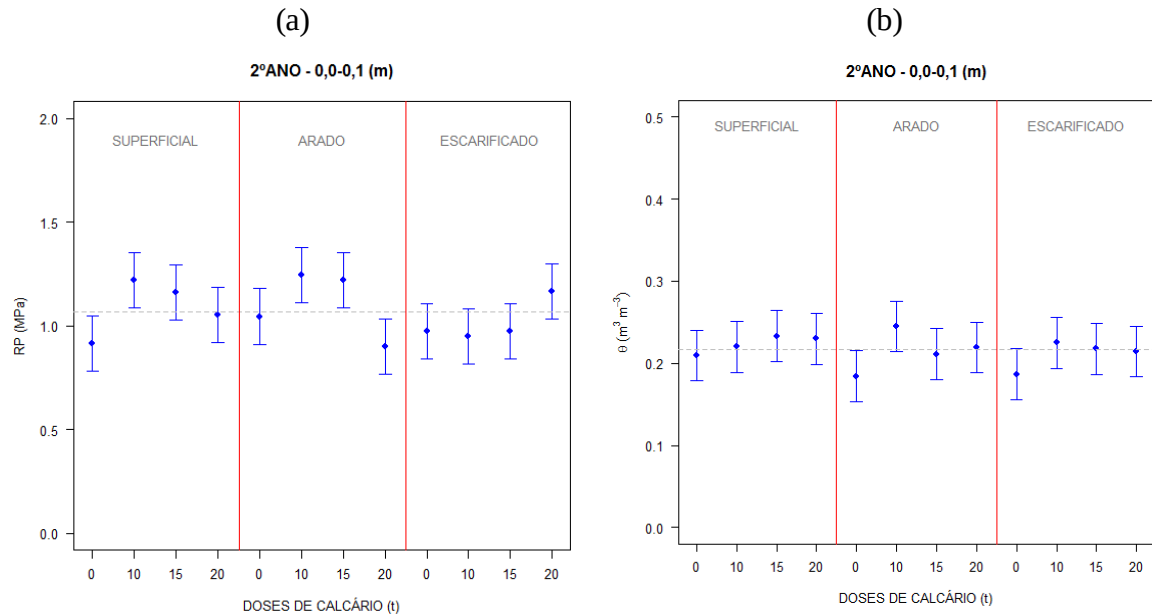


Figura 12 - Intervalos de confiança para as médias de resistência do solo à penetração (RP, em MPa) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ , m³ m⁻³) (b) para a camada 0,0 a 0,10 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário.

Nos resultados do segundo ciclo de cultivos da Figura 12, (intervalo de confiança para RP), para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, as medições de RP ocorreram em condições de umidade entre 0,16 a 0,26 m³ m⁻³, onde o valor médio apresentado foi 0,22 m³ m⁻³, realidade habitual em condições de campo.

As avaliações para 0,0 – 0,10m apontam valores de RP variáveis entre 0,7 e 1,4 MPa, com média de 1,1 MPa, e mesmo as maiores RP são menores que o valor crítico para o crescimento de raízes. Observa-se ainda que os tratamentos T10 (SI), T10 e T15 (IAG), tiveram valores acima da média, e apenas os tratamentos T0 SI e T20 IAG apresentaram RP abaixo da média. A qualidade observada pela RP pode ser devido ao rígido controle de tráfego de máquinas na área experimental, com entrada apenas para a semeadura da cultura de verão. O valor de RP ficou abaixo do limitante para o crescimento de raízes, de 2,0 MPa segundo Tormena et al., (1998), entre 1,5 e 4,0 MPa sugerida por Tormena & Ruloff (1996), e faixa ainda mais elástica sugerida por Arshad et al. (1996) quando se tratar de Latossolo roxo.

Referente ao conteúdo de água no solo (θ) do segundo ciclo de cultivos, para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para doses e formas de aplicação de calcário, os valores foram semelhantes. Observando o gráfico de intervalo de confiança (Figura 12b), os valores de θ variaram entre 0,16 a 0,26 m³ m⁻³, com média de 0,22 m³ m⁻³. Apenas os tratamentos T0 (IAG) e T0 (IEG) apresentaram valores abaixo da linha média dos tratamentos.

Nas avaliações de RP realizadas no segundo ano de cultivos, observou-se que o tratamento T0 (SI) apresentou valores inferiores aos obtidos no primeiro ano de avaliações,

enquanto as demais doses do SI apresentaram RP levemente superiores. Para os tratamentos IAG, no segundo ciclo de avaliações, todos os tratamentos apresentaram valores de RP inferior aos obtidos no primeiro ciclo. No entanto, nos tratamentos IEG, os valores de RP não apresentaram variações expressivas em relação ao primeiro ciclo de cultivo.

A Figura 13 apresenta o intervalo de confiança das médias de resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ) para a camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no segundo ciclo de cultivos.

As avaliações de RP em 0,10 – 0,20 m de profundidade, a maioria ocorreram com θ entre $0,28 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a $0,32 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, variação esta, pequena se comparada às demais avaliações. Apesar das avaliações terem sido realizadas com maior conteúdo volumétrico de água no solo, próximo a capacidade de campo para Cambissolo Háplico ($0,35 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), as RP observadas foram elevadas, considerando o valor crítico ao desenvolvimento de raízes.

Os valores da Figura 13 a, apresentam variação pequena entre os tratamentos, tanto para doses quanto para formas de aplicação, com a linha média de 2,2 MPa, e valores entre 1,9 MPa e 2,5 MPa. Apenas o tratamento T10 IEG apresentou valor RP abaixo da linha de médias, mas sem diferença significativa entre os tratamentos. Mesmo a RP não apresentando valores discrepantes entre tratamentos, no geral os valores foram superiores ao limite crítico de 2,0 MPa.

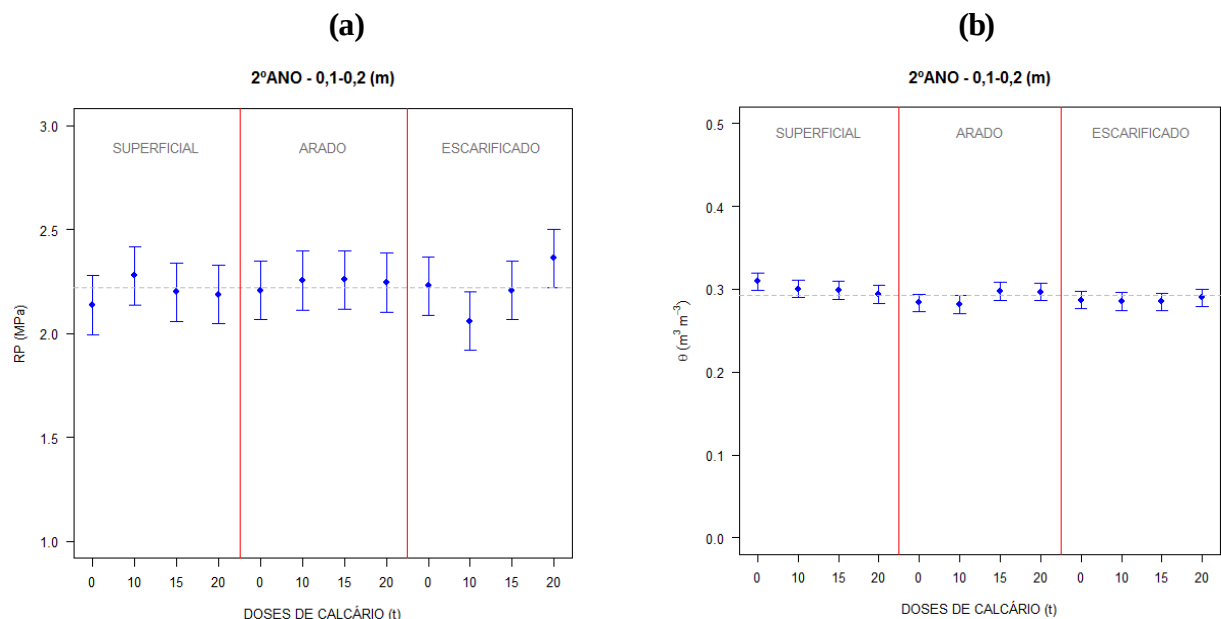


Figura 13 - Intervalos de confiança para as médias de resistência do solo à penetração (RP, em MPa) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (b) para a camada 0,10 a 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário.

A uniformidade dos resultados observados na figura 13^a apresenta certa semelhança, em termos de médias de valores, aos dados observados no primeiro ano de avaliação (figura 10). Contudo, no segundo ano observa-se maior uniformidade entre os tratamentos, com menor amplitude de valores. Esse resultado pode ser justificado pela ausência de tráfego após a instalação da cultura, e pela proteção do solo por restos culturais (ARAÚJO et al., 2012), enquanto os altos valores de RP mesmo com umidade elevada, pode ser pelo endurecimento do solo pelo rearranjo de partículas, influenciada pelo tamanho e distribuição de poros e ligantes entre partículas do solo (TORMENA et al., 2008). Segundo Moraes et al. (2013), o tempo de cultivo e o manejo pode aumentar a RP do solo.

Sobre os valores de conteúdo volumétrico de água no solo (θ) observados no segundo ciclo de cultivos, para a camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, os resultados foram uniformes para doses e formas de aplicação de calcário, mas com valores próximos a capacidade de campo, $0,35 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ segundo Auler (2014).

Nas Figuras 14a, 14b, 14c, 14d, 14e e 14f estão dispostos os resultados referentes as curvas de resistência do solo a penetração (RP) e o conteúdo de água no solo (θ), para as camadas 0,0 a 0,10m, 0,10 a 0,20m de profundidade, obtidas ao longo do segundo ciclo de cultivos, para doses e formas de aplicação de calcário (SI, IAG e IEG).

Para a camada 0,0-0,10 m de profundidade (Figuras 14 a, 14 c e 14 e), o maior conteúdo de água no solo em que foram realizadas as medições de RP apontaram valores próximos a $0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para todos os tratamentos (doses e formas de aplicação de calcário), da mesma forma, o menor conteúdo de água observado foi em torno de $0,03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para todos os tratamentos. O baixo conteúdo de água observado foi em função de ocorrência de estiagem e altas temperaturas em determinados períodos (Figura 5).

De modo geral, observa-se na camada 0,0-0,10 m de profundidade (Figura 14 a, 14b e 14 c), as medições de RP se estabilizaram uma faixa ampla de conteúdo de água, pela menor sensibilidade apresentada às alterações no conteúdo de água.

Para as curvas expostas na Figura 14a, observa-se que em condição de alto conteúdo de água existe uma igualdade de valores de RP. Contudo, quando o conteúdo de água baixa para próximo a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, torna perceptível o maior valor de RP para os tratamentos com calcário, em especial T15 e T20, com menores RP para o tratamento T10. O tratamento T0 não participa da discussão por não ter apresentado comportamento ajustável ao modelo proposto por Busscher.

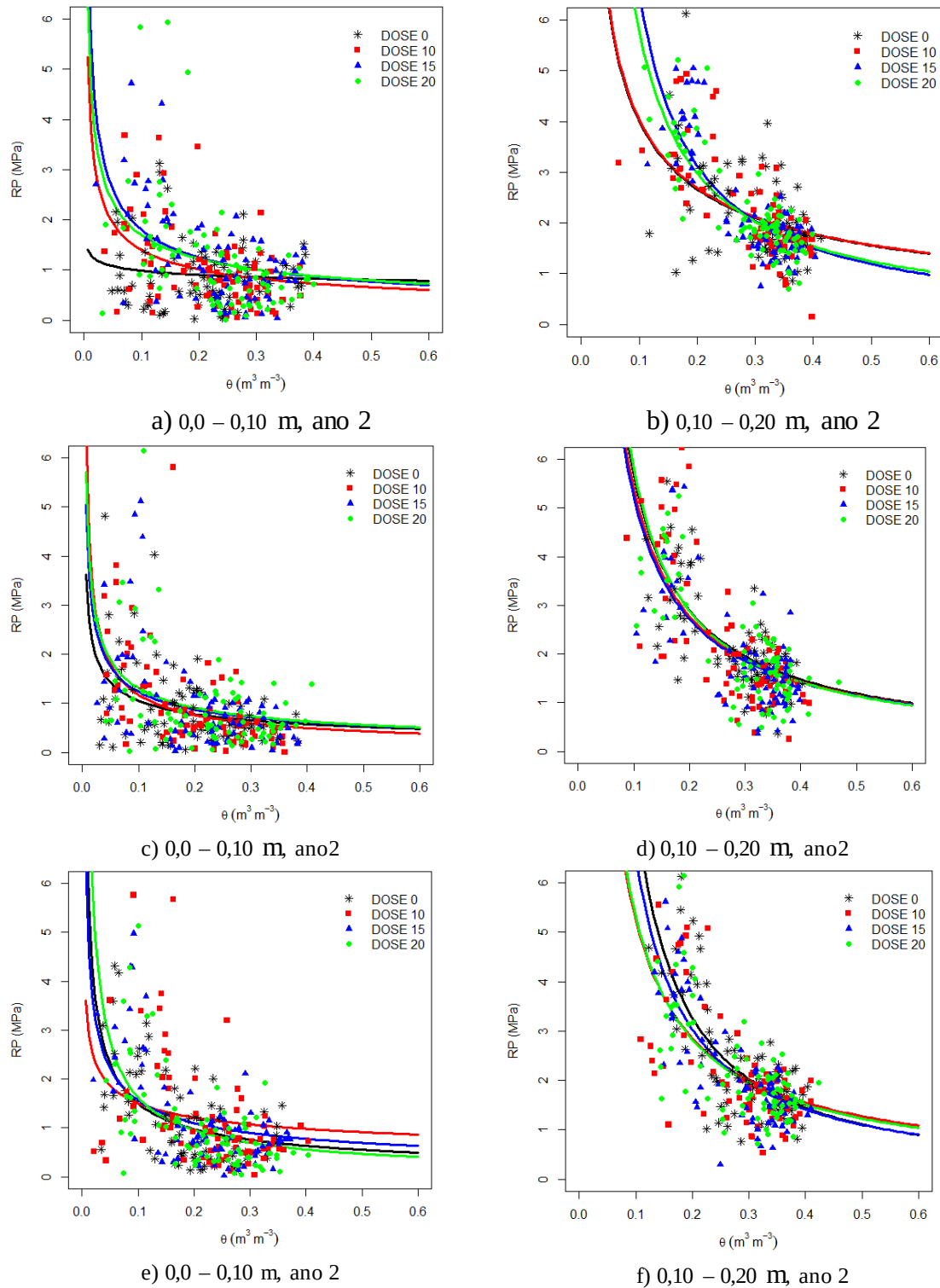


Figura 14 – Curvas de resistência do solo a penetração (RP) e conteúdo volumétrico de água no solo (θ), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário. (SI) - sem incorporação, (IAG) – incorporado com arado e grade e (IEG) – incorporado com escarificador e grade.

Observa-se na Figura 14a, que quando o conteúdo de água no solo está em torno de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ocorre o coeficiente angular, com elevação abrupta dos valores de RP, contudo,

apenas quando esse conteúdo cai para valores próximos a $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ de água, a RP ultrapassa 2,0 MPa, valor limitante ao desenvolvimento radicular.

As curvas apresentadas nas figuras 14c e 14e, camada 0,0-0,10 m de profundidade apresenta semelhanças, nos dois casos observa-se uma faixa ampla de umidade com pequena sensibilidade da RP em função do conteúdo de água. Nos dois casos, o coeficiente angular onde ocorre elevação abrupta da RP pela redução do conteúdo de água no solo ocorre em torno de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

As curvas das duas figuras se dá pelo conteúdo de água em que a RP aponta 2,0 MPa. As curvas da figura 14c praticamente não alcançaram este valor, enquanto as curvas da figura 14e apresentam esta condição ao diminuir o conteúdo de água para valores próximos a $0,08 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Valores superiores a 2,0 MPa, consensualmente é considerado limitante ao crescimento de raízes (TORMENA et al., 1998).

Por outro lado, na figura 14c observa-se melhor comportamento de ajuste ao modelo proposto por Busscher, em comparação as curvas das figuras 14a e 14e. Sugere-se que este fato tenha relação com a forma de aplicação do calcário (IAG), onde o solo é mobilizado na totalidade do perfil (BISCAIA, 1978) e pelo rearranjo que proporciona condição de igualdade no perfil mobilizado, pela desagregação e alterações causadas aos atributos físicos do solo (CASSOL & ANGHINONI, 1995; KLEPER & ANGHINONI, 1995).

Pelas medições de RP observadas apresentarem faixa aceitável de valores, sugere-se relação positiva da matéria orgânica do solo e do vasto componente radicular das espécies vegetais nativas que protegeram o solo por décadas, e pelo manejo de baixo impacto realizado nos últimos anos (MACHADO et al., 2004). A matéria orgânica reduz o encrostamento do solo, melhora a infiltração e estabilidade de agregados (BRAIDA et al., 2006).

Com referência as curvas de ajuste dispostas nas Figuras 14 b, 14 d e 14 f, da camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, observou-se diferenças significativas em relação a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade. Os valores de RP observados foram mais elevados, embora a faixa de umidade que foram realizadas as medições de RP tiveram amplitude menor que a da camada 0,0-0,10 m de profundidade. A variação observada variou entre $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a $0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ de conteúdo de água no solo.

As curvas de ajuste apresentadas na figura 14b, para os tratamentos T0 e T10 observou-se menor sensibilidade a alterações de conteúdo de água que os tratamentos T15 e T20. Enquanto para os tratamentos T15 e T20 observou-se que o coeficiente angular ocorreu em torno de $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, e para os tratamentos T0 e T10 isso ocorre com conteúdo de água em

torno de $0,20 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O ponto de intercessão ocorreu com aproximadamente $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, apresentando 2,2 MPa, superior ao limitante (TORMENA et al., 1998).

Com referência as curvas de ajuste dispostas na Figura 14d, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, ambas apresentaram bom ajuste ao modelo proposto por Busscher. A faixa de conteúdo de água no solo em que foram realizadas as medições de RP foi de $10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a $0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, apresentando 1,5 MPa na maior umidade e 2,0 MPa para conteúdo de $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. De maneira geral, todos os tratamentos apresentaram coeficiente angular em torno de $0,25 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, e todos apresentaram boa sensibilidade da RP em função da redução do conteúdo de água no solo.

Repetindo os resultados da camada 0,0-0,10 m de profundidade, as curvas apresentaram ótimo comportamento de ajuste nos tratamentos IAG, superiores as demais formas de aplicação na mesma profundidade. Este resultado pode ser em função da uniformização do perfil do solo pela mobilização para incorporação do calcário, profundidade em que o componente orgânico é menos expressivo, justificando a uniformidade das curvas.

Para as curvas de ajuste dispostas na figura 14f, os valores de RP foram medidos na faixa de conteúdo volumétrico de água no solo entre $10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a $0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Em termos de RP, com o máximo conteúdo de água observou-se 1,0 MPa, alcançando 2,0 MPa com conteúdo volumétrico de água (θ) de $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Para todos os tratamentos o coeficiente angular foi observado conteúdo de água no solo em torno de $0,25 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

De maneira geral, para todos os tratamentos, na camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, na medida em que o solo perdeu água observou-se o aumento dos valores de RP. Todas as curvas de ajustes apresentaram sensibilidade a redução do conteúdo de água no solo. Segundo Silveira et al., (2010), o conteúdo de água no solo tem relação inversa na determinação da RP, onde o menor θ proporciona maior RP (CAUSARANO, 1993), e quanto mais seco o solo maior será a RP (PEDROTTI et al. 2001).

A matéria orgânica é mais abundante em superfície (FERREIRA et al., 2011), com ação na qualidade física do solo pela agregação (CASTRO FILHO, et al., 1991). Textura, densidade, matéria orgânica e umidade podem alterar a RP (PEDROTTI et al., 2001; BUSSCHER et al., 1997).

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados das análises estatísticas dos parâmetros de ajuste “a” e “b” dos modelos de RP e θ , do segundo ciclo de avaliações, para as camadas 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m de profundidade.

Para as análises das diferenças entre os parâmetros “a” e “b” dos ajustes de RP nos diferentes tratamentos (doses e formas de aplicação), no segundo ciclo de cultivos, para a camada 0,0 – 0,10m de profundidade foram observadas distorções entre os valores de R^2 . Os valores variáveis de R^2 não apresentaram uma sequência lógica, dificultando o entendimento dos fatores que levaram a tal ocorrência.

Os baixos valores de R^2 observados na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, comparados a outros resultados, se justificam pelo experimento ter sido conduzido em condições de campo. Apesar do elevado número de repetições utilizadas nas avaliações as variações ocorrerem em todo o experimento, para doses e formas de aplicação de calcário.

Para os parâmetros “a” da camada 0,0 – 0,10 m, parte dos tratamentos apresentaram nível de significância 0,001 (T0, T10, T15 SI; T20 IAG e T0, T10, T15, T20 IEG), enquanto os tratamentos T20 (SI) e T0, T10, T15 (IAG), apresentaram significância de 0,01.

Para os parâmetros “b” da camada 0,0 – 0,10 m, o tratamento T10 (IEG) apresentou nível de significância 0,05, o tratamento T20 (SI) apresentou nível 0,01 de significância e o tratamento T0 não apresentou comportamento ajustável ao modelo de Busscher.

Tabela 6 – Parâmetros de ajustes “a” e “b” da resistência do solo à penetração (RP) e conteúdo de água no solo (θ), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, para as diferentes doses e formas de aplicação.

ANO 2					
		0,0 – 0,10 m		0,10 – 0,20 m	
Método	Dose	Modelo Ajustado	R^2	Modelo Ajustado	R^2
Superficial	T0	RP = 0,7366*** $\theta^{-0,1266}$	0,0098	RP = 1,0340*** $\theta^{-0,5887***}$	0,2185
	T10	RP = 0,4752*** $\theta^{-0,4693***}$	0,1593	RP = 1,0405*** $\theta^{-0,5897***}$	0,3970
	T15	RP = 0,5345*** $\theta^{-0,5285***}$	0,2050	RP = 0,5702*** $\theta^{-1,0586***}$	0,6329
	T20	RP = 0,5711** $\theta^{-0,4727**}$	0,1248	RP = 0,6407*** $\theta^{-0,9547***}$	0,6891
Aração	T0	RP = 0,3846** $\theta^{-0,4382***}$	0,1371	RP = 0,6044*** $\theta^{-0,9741***}$	0,5038
	T10	RP = 0,2808** $\theta^{-0,6208***}$	0,2245	RP = 0,5950*** $\theta^{-0,9584***}$	0,5008
	T15	RP = 0,3898** $\theta^{-0,501***}$	0,1696	RP = 0,5947*** $\theta^{-0,9446***}$	0,4249
	T20	RP = 0,3918*** $\theta^{-0,5238***}$	0,1671	RP = 0,5625*** $\theta^{-1,0153***}$	0,5166
Escarificação	T0	RP = 0,3589*** $\theta^{-0,6208***}$	0,3311	RP = 0,4908*** $\theta^{-1,1777***}$	0,5720
	T10	RP = 0,7370*** $\theta^{-0,3102*}$	0,0751	RP = 0,6928*** $\theta^{-0,8797***}$	0,3798
	T15	RP = 0,4884*** $\theta^{-0,5054***}$	0,3280	RP = 0,5135*** $\theta^{-1,1030***}$	0,4213
	T20	RP = 0,2752*** $\theta^{-0,7711***}$	0,3196	RP = 0,6531*** $\theta^{-0,9114***}$	0,4255

Nível de significância: *** significante a 0,001, ** significante a 0,01, * significante a 0,05, () não significante.

Para os resultados observados na camada 0,10 – 0,20 m de profundidade, os valores de R^2 foram melhores que os obtidos na camada 0,0 – 0,10 m, mas também não apresentaram uma sequência lógica para os valores de R^2 . Neste caso, valores de R^2 superiores a 0,50 foram observados nos tratamentos T15 e T20 (SI), T0, T10 e T20 (IAG), e T10 (IEG).

Sobre os resultados da camada de 0,10 – 0,20 m de profundidade, os parâmetros “a” de todos os tratamentos (doses e formas de aplicação) apresentaram nível de significância 0,001. Resultado que foi seguido pelos parâmetros “b”, também com nível de significância

0,001 para todos os tratamentos (doses e formas de aplicação de calcário). Todos os tratamentos apresentaram comportamento ajustável ao modelo proposto por Busscher.

Os valores baixos e variáveis de R^2 , principalmente na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade podem ser influenciados por variáveis não controláveis, refletindo a realidade de experimentos de campo. Por outro lado, também pode ser que a relação $RP \times \theta$ não expressa sua total influência na presença de matéria orgânica e plantas com sistema radicular bem desenvolvido.

Na Tabela 7 constam os resultados do teste de médias para os parâmetros “a” e “b” dos modelos ajustados das curvas de resistência do solo à penetração (RP), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo, para as diferentes doses e formas de aplicação do calcário.

Nas análises dos resultados do segundo ciclo de cultivos, na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para parâmetros “a”, não foram observadas diferenças estatísticas significativas. Entretanto, para os resultados da camada 0,10 a 0,20m de profundidade diferenças estatísticas significativas foram observadas. Os tratamentos T0 e T10 (SI) apresentaram médias superiores aos demais tratamentos, para doses e formas de aplicação.

Tabela 7 – Teste de médias para os parâmetros “a” e “b”, dos modelos ajustados das curvas de resistência do solo a penetração, para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade do segundo ciclo de cultivo.

Tratamento		Ano 2				Ano 2			
Forma	Dose	Parâmetros “a”				Parâmetros “b”			
		0,0–,10m		0,10-0,20m		0,0-0,10m		0,10-0,20m	
		Média		Média		Média		Média	
Superficial	0	0,737	A	1,034	A	0,127	A	0,589	B
“	10	0,475	A	1,041	A	0,469	A	0,590	B
“	15	0,535	A	0,570	B	0,529	A	1,059	A
“	20	0,571	A	0,641	B	0,473	A	0,955	A
Arado	0	0,385	A	0,604	B	0,438	A	0,974	A
“	10	0,281	A	0,595	B	0,621	A	0,958	A
“	15	0,390	A	0,595	B	0,501	A	0,945	A
“	20	0,392	A	0,563	B	0,524	A	1,015	A
Escarificado	0	0,359	A	0,491	B	0,621	A	1,178	A
“	10	0,737	A	0,693	B	0,310	A	0,880	A
“	15	0,488	A	0,514	B	0,501	A	1,103	A
“	20	0,488	A	0,653	B	0,771	A	0,911	A

Médias seguidas de mesma letra não apresenta diferença estatística significativa entre formas e doses de aplicação de calcário, pelo teste de Tukey < 0,05. C1= 0,0 – 0,10 m e C2= 0,10 – 0,20 m de profundidade.

Para os parâmetros “b”, na camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, não foram observadas diferenças significativas pela análise estatística, contudo, para camada 0,10 – 0,20 m, os resultados das análises para parâmetros “b” de profundidade, apresentaram diferenças

pela análise estatística. Os tratamentos T0 e T10 (SI) apresentaram valores significativamente menores que os demais tratamentos.

Há uma contraposição de valores entre os parâmetros avaliados, onde os tratamentos com significância estatística, com valores de “a” elevados, apresentaram os menores valores em “b”.

5.2.2 Densidade do solo (Ds)

Na Tabela 8 estão dispostos os resultados da análise estatística descritiva para os valores de densidade do solo (Ds), para as camadas 0,0 a 0,10m e 0,10 a 0,20m de profundidade, considerando doses e formas de aplicação de calcário, em amostragem realizada ao final do segundo ciclo de cultivos.

Os valores de densidade do solo dispostos na tabela 8, para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, analisando os diversos tratamentos (doses e formas de aplicação de calcário), apresentou variação de valores entre 0,79 e 1,17 g cm⁻³, com média dos tratamentos entre 0,95 a 1,12 g cm⁻³.

Pelas informações disponíveis na literatura esses valores estão dentro da normalidade. Segundo Klein (2008), os solos agrícolas de modo geral, apresentam variação de Ds entre 0,9 e 1,8 g cm⁻³, dependendo da textura e matéria orgânica, e quanto maior a Ds menor a porosidade, com reflexo na qualidade estrutural (ASSIS & LANÇAS, 2005). É grande a influência do manejo na alteração da Ds, sobretudo em camadas superficiais do solo (DALBEN & OSAKI., 2008; ASSIS & LANÇAS., 2005; RIGATTO et al., 2005).

De modo geral os poros tem grande importância no dimensionamento da densidade do solo, e a redução da porosidade aumenta os pontos de contato entre as partícula, com alteração nos valores de RP, mesmo apresentando Ds iguais. Em condições de poros conectados, a entrada da haste do penetrômetro é facilitada, com menor força de atrito entre haste e solo, e o mesmo ocorre com as raízes.

Os resultados da camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, aponta desvio padrão (Dp) entre 0,04 e 0,10, enquanto que o coeficiente de variação (CV) os valores foram de 3,82% a 12,26%. Contudo, observou-se valores distintos em função da forma de aplicação do calcário, com Dp maiores para os tratamentos SI e IAG em relação aos IEG. Os valores apresentados (Dp e CV), comparados a literatura, são considerados dentro da normalidade.

Tabela 8. Análise estatística descritiva referente a densidade do solo (Ds), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo.

DS												
Camada 0,0 – 0,10 m												
	Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose				Dose				Dose			
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	1,15	1,10	1,13	1,17	1,11	1,08	1,11	1,12	1,03	0,99	1,06	1,04
Média	1,05	1,01	1,07	1,12	1,03	1,02	1,04	1,03	0,96	0,92	0,97	0,95
Mínimo	0,98	0,81	1,00	1,05	0,96	0,94	0,95	0,95	0,84	0,79	0,81	0,85
Dp	0,05	0,10	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05	0,07	0,06	0,08	0,07
CV%	4,80	12,26	5,30	3,82	5,93	6,12	5,59	5,52	7,97	8,04	10,46	7,66
Camada 0,10 – 0,20m												
Máximo	1,19	1,16	1,16	1,19	1,15	1,16	1,16	1,15	1,12	1,10	1,19	1,09
Média	1,12	1,12	1,11	1,13	1,11	1,13	1,09	1,06	1,08	1,04	1,07	1,02
Mínimo	0,99	1,09	1,05	1,08	1,091	1,09	1,02	0,98	1,04	0,99	0,99	0,90
Dp	0,06	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05	0,06	0,03	0,03	0,06	0,06
CV%	5,55	2,17	3,62	2,48	1,60	2,02	4,19	5,97	2,41	2,96	5,16	6,16

Desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV), Ds em g cm^{-3}

Os valores de Ds do segundo ciclo de cultivos, para doses e formas de aplicação, variaram entre 0,9 e 1,19 g cm^{-3} , enquanto os valores médios ficaram entre 1,02 a 1,13 g cm^{-3} , ambos adequados, se comparados a 0,9 e 1,8 g cm^{-3} , tidos como valores de referência para solos de uso agrícola (KLEIN, 2008). Analisando valores de desvio padrão (Dp) observou-se variação de 0,02 a 0,06, enquanto o coeficiente de variação (CV) foi de 1,60% a 6,16%, ambos satisfatórios pelos baixos valores, comparados à literatura.

Para formas de aplicação de calcário, os tratamentos SI e IAG apresentaram os valores maiores para Ds que os tratamentos IEG. Os resultados confirmam a eficiência da descompactação mecânica na implantação do experimento. Resultado que se justifica pelo rigoroso controle de tráfego de máquinas na área experimental, com entrada apenas para a semeadura de verão.

Segundo Kay & Dexter (1992), determinadas práticas mecânicas alteram a estabilidade de agregados e prejudica a qualidade física solo (DEMARCHI et al., 2011; CASTRO FILHO et al., 1991). Esse resultado corrobora com Drescher et al. (2011), que citam em até dois anos a duração dos efeitos da descompactação mecânica, controlando tráfego de máquinas e umidade de entrada.

5.2.3 Textura do solo

Na tabela 9 estão dispostos os resultados da análise estatística descritiva para o conteúdo de areia, silte e argila, para a camada 0,0 a 0,20m de profundidade, considerando doses e formas de aplicação de calcário, em amostras coletadas no final do segundo ciclo de cultivos.

Pela textura observa-se predominância de argila, seguida pelo silte e uma menor composição de areia, e dessa porção, a maior parcela é composta por areia fina e muito fina. Os valores para conteúdos de areia, para os tratamentos doses e formas de aplicação, apresentaram valores entre 52 e 150 g kg⁻¹, com média variável entre 71 e 112 g kg⁻¹. Apesar das diferenças entre tratamentos, o valor da diferença é insignificante para promover alterações físicas impactantes do solo, cerca de 10 g kg⁻¹. O desvio padrão (Dp), observado apontam uma variação entre 15,49 a 32,47, enquanto que o coeficiente de variação (CV) teve números variáveis de 16,28% a 62,40%.

Os teores de silte observados, para doses e formas de aplicação de calcário, não foram apresentaram diferenças significativas, com valores entre 303 a 435 g kg⁻¹, enquanto os valores médios foram de 373 a 399 g kg⁻¹. Para desvio padrão (Dp) observou-se variação entre 11,13 e 39,38, enquanto que o coeficiente de variação (CV) apresentou valores entre 2,99% e 12,98%.

Para os teores de argila, considerando as variáveis entre doses e forma de aplicação de calcário, foram obtidos valores entre 459 e 625 g kg⁻¹, com valor médio entre 502 e 532 g kg⁻¹, sem apresentar diferenças significativas para as diversas formas e doses aplicadas de calcário.

A não existência de diferença significativa no conteúdo de argila, para dose e formas de aplicação, está em conformidade com os resultados descritos por Streck et al (2008), que citam a argila, componente mineral do solo pouco influenciado pelo manejo a curto prazo. Trabalhos disponíveis na literatura apontam uma pequena influência do manejo no conteúdo de argila (Motta et al., 2015).

Tabela 9. Análise estatística descritiva referente a densidade ao conteúdo de areia, silte e argila, para camada de 0,0 - 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo.

Areia em g kg ⁻¹												
	Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose				Dose				Dose			
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	123	145	132	147	122	137	150	142	108	129	122	114
Média	83	99	101	99	90	95	108	112	71	84	89	94
Mínimo	55	52	72	70	69	70	82	95	55	59	65	64
Dp	23,67	32,47	22,02	28,87	22,27	24,88	25,22	15,49	16,54	21,25	21,67	16,19
CV%	43,38	62,40	30,73	41,25	32,31	35,53	30,65	16,28	29,82	36,31	33,33	25,25
Silte em g kg ⁻¹												
Máximo	435	426	429	410	408	413	402	412	420	411	429	429
Média	398	389	387	379	387	382	373	385	397	389	388	399
Mínimo	362	352	360	358	373	369	344	368	354	360	303	379
Dp	25,33	24,95	25,37	17,82	11,13	16,24	21,75	13,43	20,45	14,76	39,38	17,73
CV%	7,00	7,09	7,04	4,98	2,99	4,40	6,33	3,64	5,78	4,10	12,98	4,67
Argila em g kg ⁻¹												
Máximo	538	546	543	544	551	546	540	525	578	553	625	532
Média	519	511	512	522	524	523	519	502	532	527	523	507
Mínimo	506	459	468	494	493	494	499	487	506	497	501	484
Dp	10,11	25,86	23,00	17,00	22,00	20,96	13,19	16,16	22,80	17,07	41,49	13,58
CV%	2,00	5,64	4,92	3,44	4,47	4,25	2,64	3,32	4,51	3,43	8,29	2,81

Desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV).

5.3. Atributos químicos do solo

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para os teores de carbono orgânico e alumínio trocável para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, em amostras coletadas ao final do segundo ciclo de cultivos.

Para o conteúdo de carbono da camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, para doses e formas de aplicação de calcário, ao final do segundo ciclo de cultivos, o conteúdo variou entre 20,0 e 44,0 g dm⁻³ (mínimo e máximo valor obtido), enquanto os valores médios variaram entre 25,6 e 33,6 g dm⁻³. Os valores de desvio padrão (Dp) ficaram entre 1,8 a 6,15 e o coeficiente de variação CV foi de 6,4 a 23,7%, considerados adequados se comparado aos trabalhos disponíveis na literatura, em função das variáveis.

Tabela 10 - Análise estatística descritiva para os teores de carbono © e alumínio (Al), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo.

Carbono em g dm ⁻³												
Camada 0,0 – 0,10 m												
	Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose				Dose				Dose			
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	39,0	34,0	42,0	40,0	36,0	34,0	29,0	30,0	44,0	39,0	39,0	42,0
Média	31,9	30,4	33,1	31,0	30,0	27,5	25,6	26,7	33,2	33,2	33,6	33,1
Mínimo	27,0	29,0	27,0	25,0	26,0	20,0	22,0	23,0	26,0	29,0	27,0	26,0
Dp	5,03	1,8	5,2	5,0	3,7	4,0	2,50	2,4	5,9	4,0	4,4	6,15
CV%	18,6	6,4	19,1	19,8	14,1	20,0	11,4	10,3	22,9	13,9	16,2	23,7
Camada 0,10 – 0,20 m												
Máximo	43,0	24,0	26,0	23,0	27,0	32,0	19,0	31,0	24,0	24,0	26,0	27,0
Média	25,7	20,1	21,6	19,5	23,0	19,5	17,5	22,4	19,9	19,2	20,7	20,2
Mínimo	17,0	17,0	17,0	16,0	19,0	14,0	17,0	15,0	17,0	17,0	17,0	16,0
Dp	8,63	2,52	2,50	2,06	2,45	5,12	0,71	4,87	2,37	2,28	2,63	3,31
CV%	33,5	12,5	11,5	10,6	10,6	26,3	4,0	21,8	11,9	11,8	12,7	16,3
Alumínio em cmol _c dm ⁻³												
Camada 0,0 – 0,10 m												
Máximo	5,60	4,40	3,00	0,90	4,80	1,20	0,40	0,70	4,10	1,30	0,50	0,0
Média	4,60	1,40	0,40	0,10	4,10	0,50	0,20	0,10	3,40	0,30	0,10	0,0
Mínimo	1,40	0,0	0,0	0,0	3,70	0,0	0,0	0,0	2,40	0,0	0,0	0,0
Dp	1,37	1,66	1,04	0,31	0,37	0,46	0,16	0,25	0,51	0,46	0,17	0,0
CV%	30,02	123,69	254,07	282,84	9,03	95,86	112,68	203,96	15,22	156,34	282,84	0,0
Camada 0,10 – 0,20 m												
Máximo	7,50	6,60	7,40	6,70	7,00	6,90	6,20	6,10	6,10	5,80	5,50	6,50
Média	6,10	5,70	5,60	4,90	5,60	3,80	3,20	1,8	5,70	4,90	2,50	2,90
Mínimo	1,60	4,40	4,20	3,50	4,30	0,60	0,0	0,0	5,10	4,00	0,0	0,0
Dp	1,93	0,85	1,11	1,25	0,94	2,12	2,35	2,45	0,34	0,69	1,98	2,44
CV%	31,68	15,04	20,06	25,77	16,90	56,31	73,73	140,30	6,03	14,27	78,63	85,02

Desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV).

Diferenças significativas de valores foram observadas para formas de aplicação de calcário, onde os tratamentos SI e IEG apresentaram os maiores conteúdos de carbono. Como descrito anteriormente, o resultado se justifica pela maior mobilização do solo proporcionar maior perda de carbono para atmosfera (LAL, 2003; BAYER; MIELNICZUK, 1999; BAYER & MIELNICZUK, 1997).

Sobre os teores de alumínio trocável na camada 0,0 – 0,10m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, em função das doses e formas de aplicação de calcário, observou-se resultado variável entre 0,0 e 5,60 cmol_c cm⁻³, com média entre 0,0 e 4,60 cmol_c cm⁻³. A ampla diferença é decorrente das doses e formas de calcário aplicado, os menores teores de Al

foram verificados nos tratamentos IEG, em relação aos demais. Ainda sobre as doses aplicadas, observa-se que os maiores valores de Al ocorreram nos tratamentos com doses menores de calcário (T0 SI, IAG e IEG), enquanto as maiores doses de calcário apresentaram menores teores de Al (T20 SI, IEG e IAG).

Calagem superficial após três anos tem efeito limitado a 0 – 0,05 m de profundidade, segundo Caires et al. (2008), em solo descoberto, enquanto com resíduos de aveia preta e nabo forrageiro a eficiência alcança é ampliada para 0,0–0,20 m (FRANCHINI et al., 2001). Para Miyazawa (2002), em solos sem resíduos vegetais o calcário tem ação limitada a 0,0 a 0,10 m de profundidade.

Os resultados apresentaram desvio padrão entre 0,0 a 3,7, enquanto o coeficiente de variação registrou variação de 0,0 a 282,84%. Com base na literatura pode-se afirmar que os valores de Dp são adequados. No entanto, no caso do CV a variação é discrepante, destacando as condições adversas encontradas a campo e a real diferença de reação do calcário nas diferentes doses aplicadas.

Para a camada de 0,10 – 0,20 de profundidade, entre doses e formas de aplicação do calcário, observa-se que os teores de Al tiveram amplitude grande, variando entre 0,0 e 7,50, com valores médios entre 1,8 e 6,10. São valores elevados que refletem as condições de um solo sem histórico de correção da acidez e com Al elevado. Os resultados apontam que para formas de aplicação sem incorporação do calcário, os valores de Al foram os maiores observados, enquanto os incorporados tiveram diferenças menores.

Para as doses aplicadas de calcário, para as maiores doses foram observados os menores teores de Al (T15 e T20), no entanto a melhor eficiência foi observada nos tratamentos com incorporação. Esse resultado justifica-se pela correção ser dependente da dose e forma de aplicação (CRUSSIOL et al., 2014; ALCARD, 1992), mais eficiente quando incorpora-se o corretivo (KAMINSKI et al., 2005). Em superfície o manejo apresenta maior influência no processo (PREDEBON, et al., 2010; LLANILLO et al., 2006).

Para camada a 0,10-0,20 m de profundidade, o desvio padrão (Dp) ficou entre 0,34 e 2,45, e o coeficiente de variação entre 6,03% e 85,02%. Para CV o valor é demasiado, porém, reflete a realidade de experimento de calagem em solo sem histórico de correção, e com uso de diversas doses, tendo testemunha com dose zero.

Apesar das diferenças no conteúdo de Al entre os tratamentos, motivados pelas doses e formas de aplicação do calcário, não foram observados indícios de relação direta do Al com a resistência do solo a penetração de forma direta.

Na tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos para os teores de cálcio (Ca) e magnésio trocável (Mg), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, em amostras coletadas ao final do segundo ciclo de cultivos.

Os resultados para Mg na tabela 11, para a camada 0,0 – 0,10 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivos, observa-se que os valores máximos oscilaram entre 1,90 a 12,60 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os valores médios obtidos apontam para conteúdos variáveis entre 1,50 a 9,60 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquanto o desvio padrão (Dp) observado foi de 0,33 a 3,48, e coeficiente de variação (CV) entre 11,50 e 67,77%.

Foi perceptível o maior conteúdo de Ca nos tratamentos IEG, enquanto os SI e IAG apresentaram valores semelhantes. Para doses de calcário, houve destaque dos tratamentos T15 e T20 sobre os demais, para todas as formas de aplicação, com maiores teores de cálcio no solo. Os tratamentos T10 tiveram valores intermediários e o T0 apresentou valores menores de Ca. Esses resultados estão dentro do esperado, pois o calcário é fonte de cálcio e magnésio, e as variações de conteúdo no solo são dependentes das doses e formas de aplicação do calcário.

Para a camada 0,10 – 0,20 m, os valores de Ca variaram entre 0,40 a 8,0, e valores mínimos entre 1,0 a 3,70 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O desvio padrão (Dp) variou entre 0,23 e 2,67, enquanto o CV apresentou amplitude maior, com valores entre 24,79 e 114,42%.

Foram observadas diferenças significativas entre formas de aplicação e doses de calcário aplicado, onde os tratamentos SI apresentaram menores teores de Ca, enquanto os tratamentos IAG e IEG apresentaram maiores teores e iguais entre si. Para doses, observou-se que as mais altas (T15 e T20 IAG e IEG) apresentaram maiores conteúdos, enquanto doses menores apresentaram menores conteúdos de Ca (T0 IAG e IEG). Em profundidade (0,10 – 0,20 m), os tratamentos SI foram menos eficientes quanto aos teores de Ca no solo.

Esse resultado destaca a eficiência da forma de aplicação, onde a incorporação mostra ser importante, embora a escarificação também tenha apresentado eficiência, corroborando com Ribas et al. (2014), que citam a aração ou escarificação seguidas de gradagem, como eficaz para a rápida disponibilização de Ca e Mg para o solo.

Para valores de Mg (Tabela 10), na camada 0,0 – 0,10 m do segundo ciclo de cultivos observam-se oscilações entre os valores mínimos e máximos, entre 0,80 a 8,40 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e com médias entre 1,30 a 7,20 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O desvio padrão (Dp) teve variação entre 0,47 e 1,97, e o coeficiente de variação (CV) entre 9,46 a 48,81%.

Tabela 11 - Análise estatística descritiva para os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo.

Cálcio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$												
Camada 0,0 – 0,10 m												
	Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose				Dose				Dose			
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	3,80	8,70	11,70	12,60	1,90	7,40	7,80	9,10	2,40	8,10	10,00	11,10
Média	1,50	5,70	6,80	7,90	1,30	5,90	6,60	7,40	1,80	6,50	8,60	9,60
Mínimo	0,80	2,00	1,00	4,70	0,80	4,80	5,80	5,90	1,30	4,80	5,80	7,60
Dp	0,99	2,66	3,48	2,34	0,33	1,01	0,61	1,29	0,36	1,44	1,25	1,10
CV%	67,77	46,05	50,98	29,78	2,25	17,21	9,21	17,56	20,15	22,05	14,56	11,50
Camada 0,10 – 0,20 m												
Máximo	4,00	1,90	2,10	2,20	1,50	5,60	6,50	8,00	1,30	2,10	7,30	7,20
Média	1,10	1,20	1,10	1,40	0,90	2,80	3,30	5,10	1,00	1,60	3,50	3,70
Mínimo	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	1,00	1,10	1,00	0,60	1,10	0,90	0,90
Dp	1,21	0,46	0,60	0,63	0,38	1,68	2,05	2,67	0,23	0,40	2,11	2,41
CV%	114,42	40,52	54,54	44,84	44,36	59,42	62,92	52,23	24,79	25,73	60,55	65,14
Magnésio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$												
Camada 0,0 – 0,10 m												
Máximo	2,70	7,10	6,80	8,10	2,50	5,90	6,10	7,40	3,40	7,10	8,40	8,20
Média	1,30	4,10	5,60	5,70	1,60	4,10	5,10	5,60	2,20	4,80	7,10	7,20
Mínimo	0,80	1,80	2,70	3,20	0,90	2,20	3,70	4,60	1,20	3,40	4,00	6,40
Dp	0,63	1,97	1,29	1,63	0,47	1,17	0,77	0,94	0,70	1,33	1,36	0,67
CV%	48,09	48,81	23,16	28,86	28,81	28,97	15,26	16,88	32,79	27,51	19,32	9,46
Camada 0,10 – 0,20 m												
Máximo	3,00	1,90	2,20	2,50	2,00	3,70	4,70	7,10	2,30	2,40	5,70	5,90
Média	0,80	1,10	1,50	1,70	1,20	2,20	2,90	4,30	1,30	1,70	3,40	3,30
Mínimo	0,30	0,60	1,00	1,10	0,70	1,10	1,30	1,60	0,80	1,30	1,70	1,20
Dp	0,93	0,39	0,49	0,45	0,44	0,80	1,31	2,03	0,46	0,47	1,22	1,53
CV%	117,26	34,83	33,04	26,38	37,89	36,60	44,68	47,13	36,52	27,46	36,42	46,90

Desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV).

Para doses e formas de aplicação do calcário foram observadas diferenças significativas, os tratamentos SI e IAG apresentaram valores inferiores ao IEG. Com referência as doses, os maiores valores de Mg foram observadas nas maiores doses de calcário aplicadas, T15 e T20 em todas as formas de aplicação. Valores medianos ocorreram nos tratamentos T10 e os menores nos tratamentos sem calcário (T0).

Segundo Ferreira et al. (2008), a correção da acidez pela calagem eleva o Ca e Mg no solo, sendo a forma mais adequada para corrigir deficiências de Ca e Mg (BARRETTO et al., 2008), pois a composição média dos calcários é de 20 a 40% de Mg (MALAVOLTA, 2006).

A calagem reduz a acidez do solo e supri as plantas em cálcio e magnésio (SANTIAGO & ROSSETO, 2015).

Nas maiores profundidades (0,10-0,20m) os valores foram discrepantes com relação as superficiais. Na camada 0,10 – 0,20 m do segundo ciclo de cultivo, os teores máximos e mínimos de Mg variaram entre 0,30 e 7,10 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, médias entre 0,80 e 4,30 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com Dp de 0,39 a 2,03 e CV entre 26,38 a 117,26%.

Sobre formas de aplicação do calcário, os tratamentos SI foram menos eficientes, com menores teores de Mg, diferente do observado na camada superficial, onde houve igualdade entre os valores, reflete a clara influência da incorporação do corretivo. As formas IAG e IEG foram semelhantes pelos valores apresentados. As maiores doses aplicadas (T15 e T20, IEG e IAG), proporcionaram maiores teores de Mg no solo, superiores a aplicação superficial SI.

Destaca-se que a incorporação mecânica do calcário traz prejuízos para a estrutura do solo (DEMARCHI et al., 2011), mas é eficiente na aceleração da reação e disponibilização de Ca e Mg (KAMINSKI et al., 2000).

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para saturação por bases (V%), para as camadas 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m de profundidade, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, em amostras coletadas ao final do segundo ciclo de cultivos.

Os resultados para saturação por bases (V%) na camada 0,0 – 0,10m de profundidade apresentaram variações entre 8,60 e 84,40%, com médias entre 16,1 e 80,0%, desvio padrão (Dp) entre 3,98 a 20,55, e coeficiente de variação (CV) entre 6,48 e 56,47%. No segundo ciclo de cultivos, entre 0,10 e 0,20 m de profundidade, os valores variaram entre 4,50 a 77,0% para mínimo e máximo, enquanto para médias houve variação entre 11,10 e 51,20%. O desvio padrão (Dp) foi de 2,48 e 23,96, e para coeficiente de variação (CV) foi de 19,41 a 109,05%.

Para doses e formas de aplicação, os tratamentos SI e IAG apresentaram valores menores que os IEG, e para doses de calcário aplicado, em todas as formas, as doses mais altas apresentaram melhor eficiência (T15 e T20), e as menores (T0) apresentaram valores menores de V%.

Para doses e formas de aplicação do calcário observou-se significancia, os tratamentos SI foram menos eficientes em relação ao IAG e IEG. Varios trabalhos na literatura apontam maior eficiência da calagem incorporada, com pronta disponibilização de Ca e Mg e melhoria dos atributos químicos do solo. Quanto a doses de calcário, melhores resultados foram obtidos com as doses maiores, destaque aos tratamentos T15 e T20 IAG e IEG, embora na camada de 0,0 – 0,10 m os tratamentos SI também mostraram boa eficiência.

Tabela 12 - Análise estatística descritiva para saturação por bases (V%), para as camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo.

Saturação por bases V%												
Camada 0,0 – 0,10 m												
	Superficial				Arado				Escarificado			
	Dose				Dose				Dose			
	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
Máximo	36,10	73,40	79,70	82,70	21,70	64,20	73,00	81,10	29,00	78,70	83,90	84,40
Média	16,10	47,90	61,10	65,90	16,30	52,50	63,70	70,40	21,80	60,20	76,10	80,00
Mínimo	10,00	19,70	29,60	43,70	8,60	38,40	53,50	54,90	17,20	41,50	53,40	7,02
Dp	9,08	20,55	15,10	12,69	3,98	8,51	5,69	9,19	4,20	12,72	9,63	5,19
CV%	56,47	42,87	24,72	19,26	24,53	16,21	8,93	13,07	19,26	21,14	12,65	6,48
Camada 0,10 – 0,20 m												
Máximo	40,20	20,20	23,30	27,60	18,20	43,60	63,10	77,00	17,50	25,00	66,90	69,50
Média	11,10	12,60	14,80	18,20	10,90	26,00	35,30	51,20	12,80	18,60	39,30	39,20
Mínimo	4,50	6,80	7,50	9,40	6,30	11,60	13,00	13,70	9,50	13,70	16,10	12,40
Dp	12,13	4,52	6,19	6,62	3,88	11,16	19,54	23,96	2,48	4,62	17,77	21,55
CV%	109,05	35,78	42,02	36,43	35,77	42,89	55,30	46,79	19,41	24,83	45,24	55,04
Desvio padrão (Dp), coeficiente de variação (CV).												

Para 0,10 – 0,20 m de profundidade, as formas incorporadas foram mais eficientes na correção do solo e melhoria nos atributos químicos. Neste contexto, em função da profundidade e pela pequena contribuição da rizosfera e com menor teor de matéria orgânica, fica evidente a vantagem da incorporação do calcário.

Para as doses de calcário também houve diferenças quanto a melhoria da fertilidade química do solo, onde doses maiores (T15 e T20), dos tratamentos IAG e IEG mostraram mais eficiência, enquanto tratamentos SI tiveram resultados pouco expressivos.

Sem revolvimento, a mobilidade do calcário no perfil do solo fica na dependência de fatores como: migração de cálcio e magnésio por bioporos e através de ácidos orgânicos (CAIRES et al., 2008; ANGHINONI, 2007).

A saturação por bases (V%) é indicador da fertilidade do solo, onde baixos valores indicam solo com pouco cátion (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}), e pelos resultados obtidos fica claro a importância do método adotado na aplicação de corretivos.

5.4 Rendimento das culturas

O rendimento das culturas de inverno (aveia preta + ervilhaca) e verão (milho) para os tratamentos de solo avaliados serão apresentados e discutidos a seguir para os dois ciclos de cultivos.

5.4.1 Biomassa de aveia-preta consorciada com ervilhaca peluda

A Figura 15 apresenta o intervalo de confiança das médias do rendimento de biomassa seca da aveia + ervilhaca peluda (*Avena strigosa* + *Vicia villosa*), para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro e segundo ciclo de cultivos.

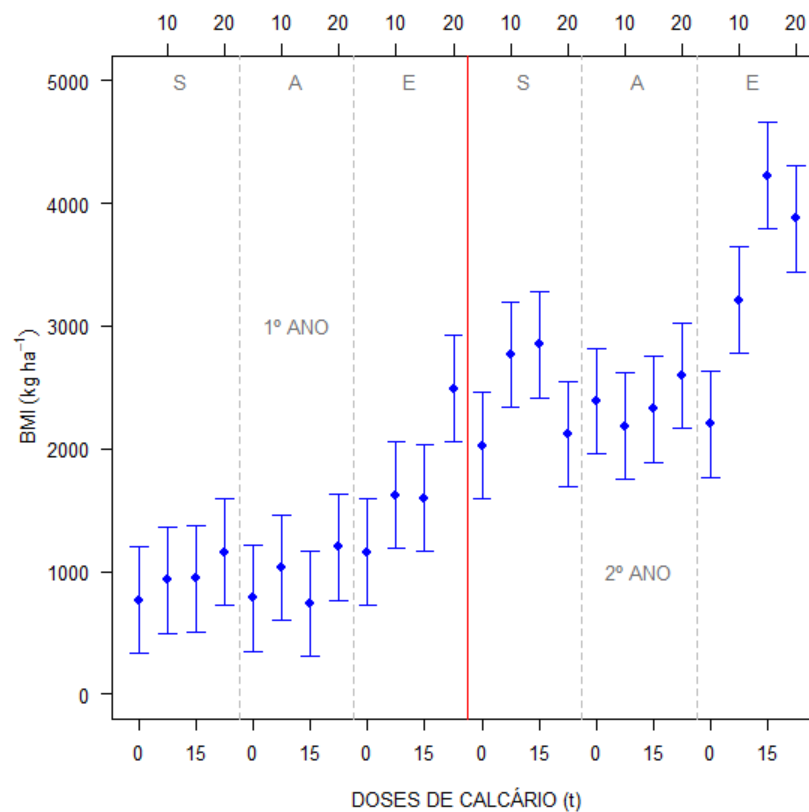


Figura-15. Rendimento de biomassa (BMI) das coberturas de invernos (aveia preta + ervilhaca) avaliadas no primeiro e segundo ciclo de cultivos, em kg ha⁻¹, nas doses T0, T10, T15 e T20, sem incorporação (SI), incorporado com arado e grade (IAG) e incorporado com escarificador e grade (IEG).

Quanto a produção de biomassa, nos dois ciclos de cultivos foram observadas diferenças significativas para doses e formas de aplicação do calcário. No primeiro ciclo os tratamentos T10, T15 e T20 IEG apresentaram valores superiores, com destaque para T20

IEG que foi superior demais, com rendimento médio de 2.500 kg ha⁻¹, enquanto o menor rendimento ocorreu no tratamento TO SI, em torno de 800 kg ha⁻¹.

O baixo rendimento geral pode ser influência do curto período entre a calagem e a semeadura das coberturas, insuficiente para reação do calcário (CASTRO & CRUSCIOL, 2013). Curtas estiagens no início do primeiro ciclo de cultivos também pode ter contribuído para a lenta reação do corretivo, porém, sua ocorrência foi em período de baixa interferência na fisiologia das espécies de cobertura (Figura 4).

Para o segundo ciclo observou-se melhoria significativa nos rendimentos em relação ao primeiro ciclo, os tratamentos T15 e T20 IEG apresentaram rendimentos superiores aos tratamentos SI e IAG, e as doses T0 IEG. Os rendimentos variaram entre 2.000 e 4.200 kg ha⁻¹ de massa seca. Esse resultado sugere ser da reação do corretivo e efeitos dos cultivos do ciclo anterior, que melhoram os atributos químicos do solo (PITELLI et al., 2014; LIMA, 2012; DALMOLIN, 2011; MALAVOLTA, 1980).

Calagem e adubação são práticas que melhoram a fertilidade e potencializam o rendimento de culturas, especialmente para regiões de solos naturalmente ácidos (ERNANI et al., 2000), com Al e Mn em níveis tóxicos para as plantas (OLMOS & CAMARGO, 1976). A calagem é chave para melhorar a qualidade química do solo, e a eficiência do fertilizante para as plantas, disponibilizando nutrientes e minimizando a ação tóxica de elementos (CASTRO & CRUSCIOL, 2013).

5.4.2. Biomassa do milho

A Figura 16 apresenta o intervalo de confiança das médias do rendimento de biomassa seca do milho, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro e segundo ciclo de cultivos.

O rendimento considerado satisfatório obtido no primeiro ciclo de cultivos pode ser justificado pelo uso de milho variedade (IPR 164), obtido através de seleção massal, que devido sua base genética mais ampla apresenta maior rusticidade quanto a correção do solo, exigências nutricionais, além de adaptação as condições ambientais da região (PEREIRA et al., 2006). Milho variedade apresenta características semelhantes ao milho crioulo, com porte mais elevado do que a maioria dos milhos híbridos disponíveis no mercado (ARAÚJO & NASS, 2002). No entanto a cultivar adotada possui características responsivas à melhoria da

fertilidade do solo, sensível à Al e Mn em níveis tóxicos, onde a calagem é importante ação de manejo (FAGERIA, 2001).

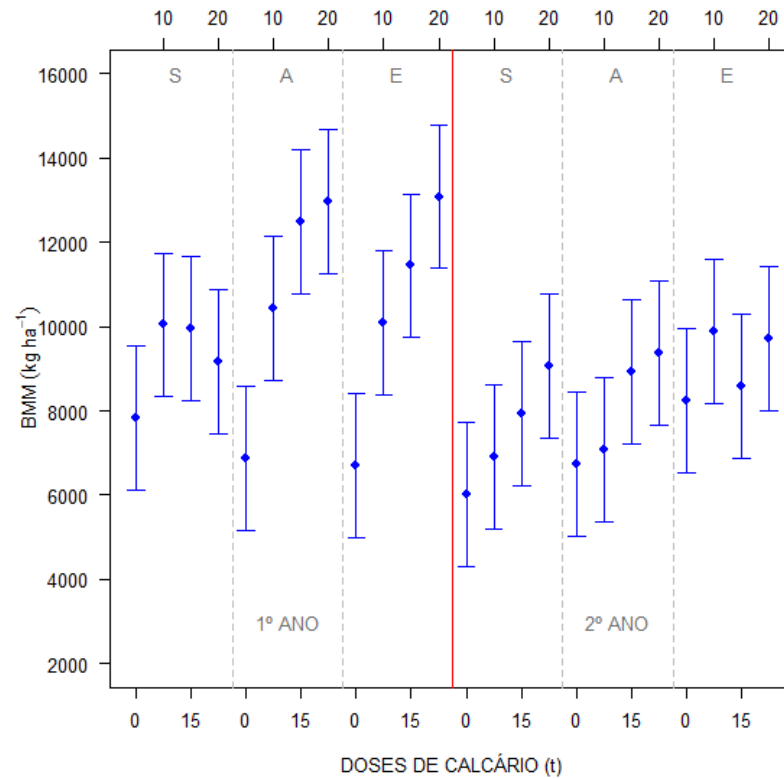


Figura 16 - Rendimento de biomassa (BMM) do milho planta inteira (kg ha^{-1}), avaliadas no primeiro e segundo ciclo de cultivos, nas doses T0, T10 T15 e T20, sem incorporação (SI), incorporado com arado e grade (IAG) e incorporado com escarificador e grade (IEG).

No segundo ciclo de cultivos, os valores de rendimento observados não apresentaram a resposta esperada, com rendimento menor que o obtido no primeiro ciclo de cultivos. Enquanto o rendimento do primeiro ciclo variou entre 5.000 a 14.000 kg ha^{-1} , no segundo ciclo teve rendimento entre 4.000 a 11.000 kg ha^{-1} . Resultado contraditório, pois pesquisas citam o maior tempo entre a aplicação do calcário e o cultivo como favorável ao incremento no desenvolvimento das plantas, pela melhoria na qualidade química do solo e melhor nutrição das plantas, pela menor toxidez Al e Mn (CASTRO & CRUCIOL, 2013).

No entanto a redução do rendimento pode ter relação com fatores climáticos ocorridos no período, como estiagem e altas temperaturas registradas no estágio de florescimento do milho (Figura 5), inclusive com morte de plantas.

5.4.3. Rendimento de grãos de milho

A Figura 17 apresenta o intervalo de confiança das médias de rendimento de grãos, para as diferentes doses e formas de aplicação de calcário, no primeiro e segundo ciclo de cultivos.

No primeiro ciclo de cultivos, observou-se diferença significativa para doses e formas de aplicação. Os maiores rendimentos foram observados nos tratamentos com as maiores doses de calcário aplicado, enquanto todas as doses T0 apresentaram o menor rendimento independente da forma de aplicação.

O rendimento obtido nas diferentes doses e formas de aplicação variaram entre 800 e 3100 kg ha⁻¹. Resultados que embora pequenos, sugerem tratar-se de efeitos positivos do corretivo na melhoria dos atributos químicos do solo (CASTRO & CRUSCIOL, 2013; CAIRES et al., 2008;), apesar do curto período entre a calagem e o cultivo do milho (SOUZA et al, 2007; ERNANI et al, 2004; CAIRES et al., 2002; MOREIRA et al., 2001).

O segundo ciclo de cultivos apresentou resultados mais homogêneos entre doses e formas de aplicação. Contudo, houve menores rendimentos que no primeiro ciclo, com valores entre 600 kg a 3.000 kg ha⁻¹. Apenas a dose T0 SI destacou de forma negativa em relação aos demais. Resultados contraditórios, visto que o segundo ciclo teve tempo hábil para reação do calcário que melhoria nos atributos químicos do solo (CASTRO & CRUSCIOL, 2013). Contudo, a estiagem e altas temperaturas no período crítico da fase reprodutiva do milho, pode ser o responsável pela frustração no rendimento do milho (Figura 17).

No florescimento o estresse hídrico prejudica o crescimento das plantas (BEUTLER e CENTURION, 2003), as raízes sinalizam os componentes vegetativos da necessidade de reduzir o crescimento, pela falta de nutrição e compromete a produção final (BENGOUGH et al., 1997; TAYLOR & BRAR, 1991).

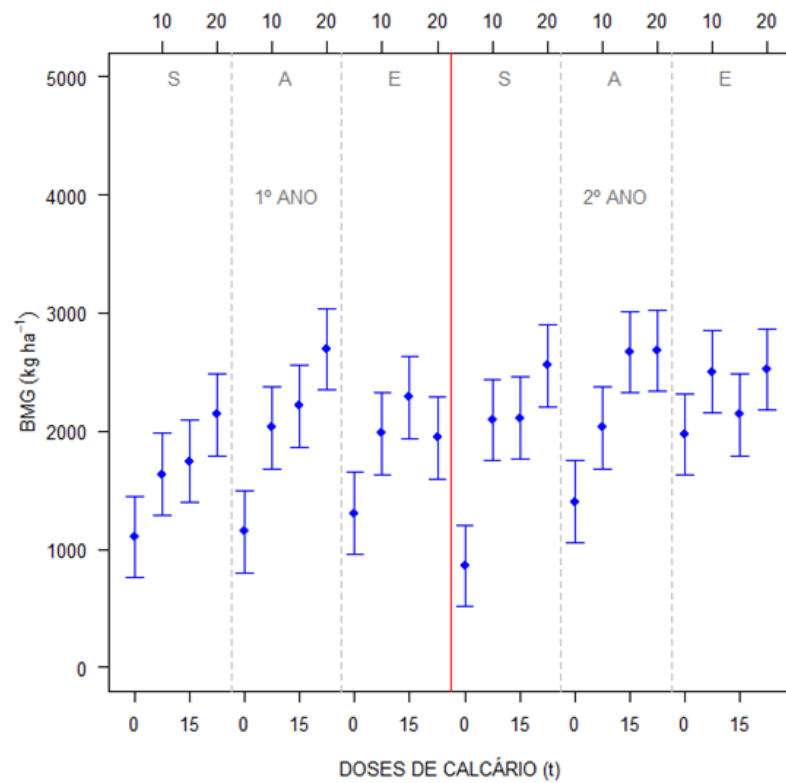


Figura 17 - Rendimento de grãos obtidos com a cultura de milho em kg ha⁻¹ nos dois ciclos de cultivos, nas doses T0, T10 T15 e T20, sem incorporação (SI), incorporado com arado e grade (IAG) e incorporado com escarificador e grade (IEG).

Apesar dos baixos rendimentos obtidos no segundo ciclo, essa pequena produção do milho é devido ao cultivo de milho variedade, mais adaptada às adversidades, como fertilidade e clima, em relação a cultivar híbrida. Milho variedade apresenta desenvolvimento irregular pela heterogeneidade genética, mas constitui boa opção para cultivo em áreas de baixa fertilidade e para produtores com pequena capacidade de investimento em tecnologia, apesar de ter menor potencial produtivo (CARDOSO et al., 2007).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível que algumas alterações observadas na resistência do solo à penetração, em especial no primeiro ciclo de avaliações, na forma de aplicação incorporada com arado de discos e grade niveladora, seja resultante do rearranjo das partículas minerais do solo, após a desestruturação promovida pelo processo mecânico. Este processo pode ter ocorrido pelo empacotamento que endurece o solo, favorecido pela textura da classe de solo estudada (Cambissolo Háplico Alumínico), que apresentou textura de 45% de argila, 40% de silte e 15% de areia, sendo que o maior percentual da areia se enquadra na classe de fina e muito fina.

Em função do pequeno número de trabalhos e informações existentes sobre os Cambissolos e pela importância dessa classe de solo para a região Sudeste do Paraná, região formada em sua maioria agricultores familiares com baixo poder de investimento, é importante estimular a realização de pesquisas sobre manejo para os Cambissolos.

A região Sudeste do Paraná é formada por uma diversidade de classes de solos, com a maior parcela das áreas composta por Cambissolos e Neossolos, onde se concentra a maioria dos agricultores com menor capacidade de investimentos, o que justifica a necessidade da continuidade de pesquisas neste segmento.

7. CONCLUSÕES

A hipótese que motivou o estudo não foi confirmada, as diferentes doses de calcário aplicado não influenciaram significativamente a resistência do solo a penetração;

A forma de aplicação do calcário, com aração e gradagem de nivelamento, apresenta-se como a mais propícia ao endurecimento do solo;

Pelas alterações nos atributos físicos e químicos do solo, a forma de aplicação do calcário com a incorporação mecânica através de escarificação e gradagem de nivelamento mostrou ser a melhor opção para a correção da acidez do Cambissolo estudado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI P.R.; MAFRA, A.L.; FONTANA, E.C. APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E FÓSFORO E ESTABILIDADE DA ESTRUTURA DE UM SOLO ÁCIDO. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:799-806, 2003.

ALCARDE, J.C. **Corretivos de acidez dos solos**: características e interpretações. São Paulo, ANDA, 1992. (Boletim Técnico, 6)

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de coberturas do solo sob sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:241-248, 2000.

AMARAL, A.S. & ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.**, 36:695-702, 2001.

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.411-418, 2009.

ANGHONONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do solo. Ed.1. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007, p.874-928.

ARACHAYA, A.; ARUNDEL, A. and ORSENINGO, L. The evolution of European Biotechnology and its future competitiveness, In: J. Senker (ed.), **Biotechnology ad Competitive Advantage**. Cheltenham: Edward Elgar. 1998.

ARAUJO, P. M.; NASS, L. L. Caracterização e avaliação de populações de milho crioulo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.3, p.589-593, jul./set. 2002.

ARAÚJO, E.A.; KER,J.C.; NEVES,C.L.; LANI,J.L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliações. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia** v.5, n.1, 2012.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:425-435, 2005.

ARSHAD,M.A.; LOWERY,B.; GROSSMAN,B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. **Madison: Soil Science of America**, p.123-141, 1996.

ASSIS, R.L. & LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:515-522, 2005.

ASSIS, R. L., LAZARINI, G. D., LANÇAS, K. P., CARGUELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Eng. Agríc.** vol.29 n.4 Jaboticabal 2009.

AULER, A.C. **Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Háplico Alumínico em função de doses e modo de aplicação de calcário**. Dissertação de Mestrado apresentado na UEPG, 2014.

BALL, B.; GUIMARÃES, R. M. L.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. Avaliação Visual da Estrutura do Solo. **University of Aarhus**. 2007.

BARRETO, P.M.; SANTOS, A.C.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.P.A.; BRITO, S.S.; TERRA, T.G.R.; LEAL, T.C.A. Relações Ca:Mg nas características agronômicas do Brachiaria brizantha cv. MG-4. **Pubvet**, v.2, n.38, 2008.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo, ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Gênesis**, 1999. p. 1-26.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 105-112, 1997.

BENASSI, D.A.; SANTOS, J.A.B.; GIAROLA, N.F.B. Conhecimentos Etnopedológicos dos Agricultores do Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.4, p.1862-1865, 2009.

BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41: 341-358, 1990.

BENEDETTI .M.; DUARTE, I.N.; MELO, H.B.; GORGES, E.N.JR. Resistência do Solo à Penetração em um Latossolo Vermelho Distrófico Típico Sob Diferentes Usos. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer** - Goiania, vol.6, N.11; 2010.

BENGOUGH, A. G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 189, p. 155-164, 1997.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:155-163, 2004.

BERTOL I.; BEUTLER,J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades Físicas de um Cambissolo Húmico Afetado pelo Tipo de Manejo do Solo. **Scientia Agricola**, v.58, n.3, p.555-560, jul./set. 2001.

BISCAIA, R.C.M. **Influência da intensidade de movimentação do solo no processo erosivo, com uso de simulador de chuva, em Latossolo Vermelho-Escuro, dos Campos Gerais, no Paraná**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978. (Dissertação de Mestrado)

BOER, C.A. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1269-1276, 2007.

BOGNOLA, I.A.; FASOLO, P.J.; BHERING, S.B.; MARTORANO, L.G. Solos, clima e vegetação da região de Campos Gerais. In: MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; SILVA, C.A. (Ed.). Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2004. p.57-75.

BRADY, N. and WEIL, R. The Nature and Properties of Soils, 13th Edition. Prentice Hall. **Upper Saddle River**, New Jersey. 2002, 960 p.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.131-139, 2010.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. Carbon Management and Sequestration Center, OARDC/FAES, School of Natural Resources, The Ohio State University. **Geoderma** 124 (2005) 3 –22

BRUNINI, O.; CARDOSO, M. Efeito do déficit hídrico no solo sobre o comportamento estomático e potencial da água em mudas de seringueira. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.33, n.7, p.1053-1060. 1998.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R. & SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Till. Res.**, 43:205-217, 1997.

BUSSCHER, W.J. Adjustament of flat-tipped Penetrometer resistance data to a common water content. Transactions of the ASAE, **Saint Joseph**, v.3, n.2. p.519-524, 1990.

BUTIERRES, M.F.M. Efeito do calcário e fosfato de potássio no ponto de carga zero (PCZ) e grau de floculação em três solos do Rio Grande do Sul. Santa Maria-RS: UFSM, 1980. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria-Rio Grande do Sul.

CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. R. Bras. **Ci. Solo**, 22:27-34, 1998.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, v.59, p.213-220, 2000.

CAIRES,E.F.; BARTH,G.;GARBUIO,F.J.; KUSMAN, M.T. Correção da Acidez do Solo, Crescimento Radicular e Nutrição do Milho de Acordo com a Calagem na Superfície em Sistema Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:1011-1022, 2002.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003

CAIRES, E.F.; KUSMAM, M.T.; BARTH, G.; GARBUIO, F.G. & PADILHA, J.M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **R. Bras. Ci. Solo**. 28:125-136, 2004.

CAIRES, E.F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, p.791–798, 2005.

CAIRES, E.F.; CORRÊA, J.C.L.; CHURKA, S.; BARTH, G. & GARBUIO, F.J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Sci. Agric.**, 63:502- 509, 2006.

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

CALEGARI, A. **Plantas de Cobertura. In: Sistema Plantio Direto com Qualidade**. Ruy Casão Jr.; Rubens Siqueira; Yeshwant Ranchandra Metha.; João José Passini. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006. 212 p.

CÂMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ci. Rural**, 35:813-819, 2005.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Reconhecimento e medida da compactação do solo**. <http://www.infobibos.com/Artigos/> 2006.

CARDOSO, A.; POTTER, R.O.; DEDECEK, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no noroeste do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.2, p.349-353, fev. 1992.

CARDOSO, M. J.; CARVALHO, H. W. L.; GAMA, E. E. G.; SOUZA, E. M. Estabilidade do rendimento de grãos de variedades de Zea mays L. no Meio-Norte brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.38, n.1, p.78-83, 2007.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.147-157, 2009.

CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I.; SOUZA, E.D.; SULC, R.M.; LANG, C.R.; FLORES, J.P.C.; LOPES, M.L.T.; SILVA, J.L.S.; CONTE, O.; WESP, C.L.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R.S. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, p. 259-273, 2010.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAUJO, A.G.; LLANILLO, R.F. **No Till Agriculture in Southern Brazil**. Factors that facilitated the evolution of the system and the development of the mechanization of conservation farming. FAO and IAPAR, 2012.

CASSOL, L.C. & ANGHINONI, I. Alterações nas características de um Podzólico Vermelho-Escuro após quatro anos de cultivo nos sistemas de plantio direto e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. **Anais. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1995. p.1843-1844.

CASTRO, G.S.A. & CRUSCIOL, C.A.C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195–196, p. 234–242. 2013.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T.J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.5, p.1407-1413, 1991.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:527-538, 1998.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.28, n.1, p.15-25, 1993.

CHANG, M, Y. Sistema Faxinal: Uma forma de organização Camponesa em desagregação no centro-sul do Paraná: Londrina, IAPAR, **1988**, 124p.

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. & ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolos Bruno em plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:317-326, 2004.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; HERMANI, L. C. **NUTRIÇÃO E ADUBAÇÃO DO MILHO**. Embrapa Milho Sorgo. Sistema de produção, versão eletrônica. 2ª ed. 2006.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L. & SILVA, F.R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa,v.33, n.2, p.235-244, 2009.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A. & FONTOURA, S.M.V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ci. Rural**, 34:281-284, 2004.

CRUCIOL, C.A.C.; FOLTRAN,R.; ROSSATO,B.; McCray.; ROSSETO,R. Effects of Surface Application of Calcium Magnesium Silicate and Gypsum on Soil Fertility and Sugarcane Yld. **R. Bras. Ci. Solo**, 38: 1843 – 1854, 2014.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; BORGHI, E. & MATEUS, G.P. Benefits of integrating crops and tropical pastures as systems of production. **Better Crops**, 94:14-16, 2010.

CUNHA, J.P.A., VIEIRA, L.B., MAGALHÃES, A.C. Resistência Mecânica do Solo a Penetração Sob Diferentes Densidades e Teores de Água. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1-4, Jan./Dez., 2002.

DALBEN, A.D.; OSAKI, F. Atributos Físicos do Solo de um Cambissolo Háplico em Floresta Nativa e de Pinus. **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 29-37, 2008.

DAL MOLIN, V.T.S. **Avaliação Química e Sensorial do Grão da Aveia em diferentes formas de Processamento**. Santa Maria, 2011, 80p.

DEMARCHI, J. C.; Perusi, M. C.; Piroli, E. L. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo - SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.4, p.07-29, 2011.

DEXTER, A. R.; Czyz, E. A.; Gate, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil & Tillage Research**, v.93, p.412-419, 2007.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Soil Science Society of America. p.3-21, 1994.

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELO, A. Persistência do Efeito de Intervenções Mecânicas para Descompactação de Solos Sob Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1713-1722, 2011

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. 212p. : il. (EMBRAPA-CNPS. Documentos ; 1)

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos**. Mapa do delineamento macroagroecológico do Brasil. 1992/1993.

ERNANI, P.R., Ribeiro, M.F.S., Bayer, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 35, 889-901, 2004.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. & CAMILLO, R.J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:537- 544, 2000.

FAGERIA, N.K. Efeito da calagem na produção d arroz, feijão, milho e soja em solo de Cerrado. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. V.36, p.1419-1424, 2001.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. *R. Sci. Solo*, v.23, n.3, p.515-524, 1999.

FERREIRA, A.O.; SÁ, J.C.M.; GIAROLA, N.F.B.; HARMS, M.G.; MIARA, S.; BAVOSO, M.A.; BRIEDS, C.; QUADROS NETTO, C. Variação na Resistência Tênsil de Agregados em Função do Conteúdo de Carbono em dois Solos na Região dos Campos Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:437-445, 2011.

FLOSS, E. L. **Aveia, um sustentáculo do sistema de semeadura direta**. Revista Plantio Direto, Passos Fundo, v. 72, n. 69, p. 14-18, 2002.

FORTI, V.A; CICERO, S.M; PINTO, T. L. F. Avaliação daEvolução deDanos porUmidade e Redução do Vigor em Sementes de Soja , cultivar TMG 113-RR, Durante o

Armazenamento , Utilizando Imagens de Raio X e Testes de Potencial Fisiológico . **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 32, nº 3 p. 123-133, 2010.

FRANCHINI, J.C.; MEDA, A.R.; CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por métodos biológicos. **Scientia Agrícola**, v. 58, p.357-360 2001.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C.; KAMINSKI, J. & RHEINHEIMER, D.S. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ci. Rural**, 33:282-290, 2003.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:885-893, 2002.

GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F. Indicadores Físicos e Químicos de Qualidade de Solo de interesse Agrícola. **EMBRAPA - Meio Ambiente**. Jaguariúna, 2006.

GREGORICH, E.G. Quality. In: LAL, R. (ed.). *Encyclopedia of Soil Science*. New York: Marcel Dekker, p.1058-1061, 2002.

GROSSMAN, R.B., and T.G. Reinsch. Bulk density and linear extensibility. p. 201–228. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison*, WI. 2002.

GUERREIRO, E. Caracterização, tipologia e diagnóstico de sistemas de produção predominantes em uma comunidade rural: O caso de Cerro da Ponte Alta, Iratí, PR. IAPAR, 1994. 51 p. (**BOLETIM TÉCNICO**, 47).

HAMBLIM, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 95-158, 1985.

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

HAYNES, R.J.; BEARE, M.H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, p.1647–1653, 1997.

HOAD, S. P.; RUSSEL, G.; LUCAS, M. E.; BINGHAM, I. J. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, New York, v. 74, p. 195- 254, 2001.

IMHOFF, S. D.C. **Indicadores de Qualidade Estrutural e Trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, ESALQ/USP. Piracicaba-SP. 2002. 94p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, jul. 2000.

JORIS, H.A.W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant Soil**. v. 365. p. 409–424, 2013.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; GATIBONI, L.C.; BORTOLUZZI, E.C. XAVIER, F.M. Respoplicação de Calcário em Superfície ou incorporado ao Solo em Campo Nativo. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 30, n.4, p.605-609. 2000.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, G. B.; SILVA, L. S. Eficiência da Calagem Eficiência da Calagem Superficial e incorporada Precedendo o Sistema Plantio Direto em um Argissolo sob Pastagem Natural. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:573-580, 2005.

KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BZEDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. **Madison, Soil Science Society of America**, 1994. p.53-72. (Special Publication, 35)

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v.61, n.1, p.4-10, 1997.

KAY, B.D. & DEXTER, A.R. The influence of dispersive clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, 30:297-310. 1992.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2008. 240p.

KLEPKER, D. & ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Anais. **Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1995. p.1854-1856.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. & BERTON, A.L. Compactação e descompactação de solos. Passo Fundo, Embrapa Trigo, 2000. 20p. (**Embrapa Trigo. Documentos, 19**)

LAL, R. Global potential of carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **CRC Critical Review in Plant Science**, v. 22, n. 2, p. 151-184, 2003.

LARSON, W.E. & PEIRCE, F.J. **Conservation and enhancement for soil quality**. In: Avaliation for Sustainable land Management in Developing Word. Vol, 2: Technical Papers. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings, n.12 (2).

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Wisconsin, USA: **Soil Science Society American**, p.37-52, 1994.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 58p. Dissertação Mestrado.

LEITE, L.F.C.; FREITAS, R.C.A.; SAGRILO, E.; GALVÃO, S.R.S. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos vegetais depositados sobre Latossolo Amarelo no Cerrado Maranhense. **Revista Ciências Agronômicas**, Loureno Marques, v.41, n.1, p.29-35, 2010.

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

LIMA, V. C. Conhecendo os principais solos do Paraná : abordagem para professores do ensino fundamental e médio / Valmiqui Costa Lima: Marcelo Ricardo de Lima; Vander de Freitas Melo. – Curitiba : **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** / Núcleo Estadual do Paraná, 2012. vi + 18 p.

LLANILO, R. F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Seminários**, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

LOPES, A.S.; SILVA, M.C.; GUILHERME, R.G. BOLETIM TÉCNICO N° 1 ACIDEZ DO SOLO E CALAGEM. ANDA Associação Nacional para Difusão de Adubos São Paulo – SP, 22p. 1991.

MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A.; BERNARDI, A.C.C.; CARMO, C.A.F.S.; VALENCIA, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P.; MOLIN, J.P.; PAULETTI, V.; GIMENEZ, L.M. **Variabilidade de atributos de fertilidade e espacialização da recomendação de adubação e calagem para a soja**. In: MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; SILVA, C.A. (Ed.). Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p.115-129

MALAVOLTA, E. Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: **Editora agronômica Ceres Ltda**. 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E.; **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARUN, F. Propriedades físicas e biológicas de um Latossolo Vermelho-Escuro do arenito Caiuá sob pastagem e culturas anuais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.8, p.593-597, ago. 1996.

MARTINS, S.G.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; NORTON, L.D.; FONSECA, S. Rainfall erosivity and rainfall return period in the experimental watershed of Aracruz, in the coastal plain of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.999-1004, 2010.

MINEROPAR - **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. MINEROPAR – Minerais do Paraná, SA Curitiba. 2001. 116 p.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brasilian Archive**, 2002.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F. M. Análise química de tecido vegetal. **Londrina: IAPAR**, 1992. (Circular, 74).

MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; SILVA, V.R.; FRANCHINI, J.C.; LEVIEN, R. Qualidade física de um Latossolo Vermelho avaliada por meio da curva de resistência do solo à penetração. IN: **XXXIV Congresso de Ciência do Solo, Florianópolis-SC**, 2013.

MOREIRA, S.G.; KIEHL, J.C.; PROCHNOW, L.I. & PAULETTI, V. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:71-81, 2001.

MOTA, J.C.A.; OLIVEIRA, C.V.; ASSIS-JR, R.N. ; FREIRE, A.A.G.; Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil. **Article history**: Accepted 5 February 2015.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo em Sistemas Agrossilvipastoril no Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 74, p. 45-53, 2007.

NOLLA, A. & ANGHINONI, I. Métodos utilizados para correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 06, n. 01, p. 97-111, 2004.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v.38, p.47-57, 1996.

OLMOS, I.L.J.; CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, v.28, p.171-180, 1976.

OTTONI FILHO, T.B.; OTTONI, M.V.; OLIVEIRA, M.B.; MACEDO, J.R. & REICHARDT, K. Revisiting Field Capacity (FC): Variation of the FC definition and its estimation with pedotransfer functions. **R. Bras. Ci. Solos**, 38: 1750-1764, 2014.

PRADO, R.M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. **Revista de Biociências**, v.9, p.7-16, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A. & CRESTANA, S. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:521-529, 2001.

PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M.; MARTINS, J.H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.10, n.2, p.306-314, 2006.

PITELLI, R.A.; NACHTIGAL, F.G.; PITELLI, R.L.C. Controle biológico de plantas daninhas. FCAV/UNESP – 14884-900 – Jaboticabal, SP 2- EMBRAPA – Pelotas, RS 3- **Ecosafe A.M.A.** 2014.

POTTKER, D. & BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:675-684, 1998

POWER, J.F.; MAYERS, R.J.K. **The maintenance or improvment of farming systems in north América and Austrália.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE SPONSORED, Saskatoon, Canadá. Proceedings... Soil quality in semi árid agriculture. Saskatoon: Canadian int. Development Agency/Univ. of Sasktchewan – Saskatchewan inst. Of Pedology, 1989. P.273-292.

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

RAIJ,V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes.** Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011, 420 p.

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: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M., eds. Tópicos Ciência do Solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**,v. 5, p.49-134. 2007.

RIBON, A.A.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; FERNANDES, K.L.; HERMÓGENES, V.T.L. Alterações na estabilidade de agregados de Latossolo e Argissolo em função do manejo, na entre linha da seringueira. Revista da Árvore, Viçosa-MG, v.38, n.6, p.1065-1071, 2014.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. de Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de Pinus taeda. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, set./out. 2005.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelhocuro de Eldorado do Sul (RS). Revista **Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.2, p.313-319, 1995.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Calagem.** Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-cucar/arvore/CONTAG01_34_711200516717.html. Acesso realizado em 26 de outubro de 2015.

SENE, M. et al. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci Am J**, Madison, v.49, p.422-427, 1985.

SHAMRIKOVAA, E. V. & SOKOLOVAB, T. A. Correlations between different acidity forms in amorphous loamysoils of the tundra and taiga zones. **EurasianSoil Science**, v. 46, , p. 505–517, 2013.

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, D.J.; FARIA, C.M.B.; ALBUQUERQUE, T.C.S.Nutrição, calagem e adubação. Sistema de Produção-EMBRAPA. Versão eletrônica, agosto de 2010.

SILVA, R. F.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento Inicial da Cultura da Soja em Latossolo Bruno com Diferentes Graus de Compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, 38:1731-1739, 2014.

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

SILVA, R.R.; SILVA, M.L.N.; FERREIRA, M.M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do Alto do Rio Grande-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.4, p.719-730, jul./ago. 2005.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J.A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação Umidade Versus Resistência à Penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, 34:659-667, 2010.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S. & DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Till. Res.**, 79:7-31, 2004.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 93-111, 1997.

SORATTO, R. P. & CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675-688, 2008.

SOUZA, D.M.G., et al. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F. et al. Fertilidade do solo. Ed.1. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007, p.206-274.

SOIL SC. SOC. of Am.(1987). Glossary of soil science terms. SSSA, **Madison**, WI. 1987. STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B. The water relations of the root-soil interface. **Plant & Cell environment**. 1996.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, p.217-243, 1994

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p.415-422, 1980.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. Non-limiting water range (NLWR): An approach for assessing soil structure. Ottawa, Soil Quality Evaluation Program, Agriculture and Agr-Food Canada, 1994. 36p. (**Technical Report, 2**)

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico de um Latossolo roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 22: 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C. & COSTA, A.C.S. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sci. Agríc.**, 59:795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & ARAÚJO, M.A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 8:65-71, 2004.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & ROSSI JÚNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:33-42, 2008.

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.; RULOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 20. p. 333 - 339. 1996.

TORRENS, J. C.S. Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável do Território Centro- Sul do Paraná (PTDRS). Deser. Curitiba, Agosto de 2011

TRANNIN, I.C. de B.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M. de S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com bio-sólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.223-230, 2008.

WEAICH, K.; BRISTOW, K.L.; CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of America Journal**. V.56, p.1272-1278, 1992.

VON UEXKÜLL, H.R. & MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant Soil**. V. 171, p. 1-15, 1995.

ZANBOLIM, E.M., S.K. Alonso, K. Matsuoka, M.G. Carvalho & F.M. Zerbini. Purification and some properties of papaya meleira virus, a novel virus infecting papaya in Brazil. **Plant Pathol**. 52: 389-394, 2003.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects on mechanical properties of soil aggregates. **Soil Till. Res.**, 31:263-175, 1994.