

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Aplicação da penetrometria na quantificação da compactação do solo**

**Edison Aparecido Mome Filho**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

**Piracicaba  
2012**

Edison Aparecido Mome Filho  
Engenheiro Agrônomo

**Aplicação da penetrometria na quantificação da compactação do solo**

Orientador:  
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de  
Mestre em Ciências. Área de Concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas.

**Piracicaba**  
**2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Mome Filho, Edison Aparecido

Aplicação da penetrometria na quantificação da compactação do solo / Edison  
Aparecido Mome Filho. - - Piracicaba, 2012.  
88 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Água do solo - Teor 2. Cana-de-açúcar 3. Compactação dos solos 4. Mecanização  
agrícola 5. Penetrômetro digital I. Título

CDD 631.43  
M732a

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**



**DEDICO**

A meus pais,  
Edison Aparecido Mome e Izabel da Silva Mome.

**OFEREÇO**

A meus irmãos Ricardo e Erica,  
minha cunhada Maria e meus sobrinhos Daniel, Giacomo e Izabel

*“Eu nunca vi um animal selvagem sentir pena de si mesmo, Um pássaro cairá congelado e morto de um galho sem nunca ter sentido pena de si mesmo.”*

D. H. Lawrence



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me manter calmo e confiante nos momentos em que o esforço parecia não ter razão.

A minha família, que sempre me apoiou nos momentos difíceis e me cobrou quando necessário, principalmente meus pais, Edison e Izabel, minha irmã Erica, meu irmão Ricardo e sua esposa Maria e meus sobrinhos Daniel, Giacomo e Izabel. Também meus avós José e Irene, que aceitaram a distância e a falta de atenção, dando sempre apoio e motivação quando necessário.

A Esalq e ao corpo docente do departamento de Solos e Nutrição pela receptividade e oportunidade. Ressalta-se o professor Dr. Alvaro Pires da Silva, pela excelente orientação e disponibilidade integral, até nos momentos em que o trabalho restringia o tempo. Também o professor Dr. Miguel Cooper pelo apoio desde minha chegada na Esalq.

Aos amigos, pelos momentos de diversão e pela ajuda no cumprimento do dever. Dentre eles, o pessoal das “salinhas” do Solos, Osvaldo, Sueli, Lorena, Sâmala, Raul, Selene, Renata (Beltrão), Mariana, João, Talita. Também aos amigos da Engenharia de Biosistemas, Fernando (Salsicha), Helon, Cris e Neilo. Ao pessoal da Nutrição de Plantas, Beatriz, Elisângela, Tiago, Márcio, Fabiana e, especialmente, a Carla, a qual pagou devidamente minhas horas de “estágio” ao ajudar no desenvolvimento desta dissertação.

Aos familiares e amigos não citados, pois embora não estão diretamente relacionados neste agradecimento, foram importantes no desenvolvimento diário dos meus estudos, minha pesquisa e minha vida.



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b> .....	15
2.1 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1.1 Compactação de solos agrícolas.....	15
2.1.2 Penetrometria na verificação da compactação.....	17
2.1.3 Manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.).....	21
2.2 Material e Métodos.....	23
2.2.1 Área experimental.....	23
2.2.2 Preparo do Solo.....	24
2.2.3 Atributos Avaliados.....	26
2.2.3.1 Resistência do solo à penetração (RP) e teor de água do solo ( $\theta$ ).....	26
2.2.3.2 Densidade do solo (Ds), Densidade de Partícula (Dp) e Porosidade Total do Solo (PT).....	29
2.2.3.3 Capacidade de Campo (CC).....	30
2.2.3.4 Distribuição granulométrica.....	30
2.2.3.4 Teor de carbono orgânico (C.org).....	30
2.2.4 Análise dos Resultados.....	31
2.3 Resultados e Discussão.....	31
2.3.1 Variáveis Físicas que Influenciam a RP.....	31
2.3.2 Correlação entre RP e $\theta$ .....	34
2.3.2.1 Dados de RP sem ajuste para o $\theta$ .....	34
2.3.2.2 Dados de RP com ajuste para o $\theta$ .....	41
<b>3 CONCLUSÕES</b> .....	61
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63
<b>ANEXO</b> .....	71



## RESUMO

### **Aplicação da Penetrometria na Quantificação da Compactação do Solo**

A agricultura moderna sofre grande impacto da mecanização devido ao aumento do tráfego e do peso do maquinário. A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma cultura altamente mecanizada e, devido ao tempo de sua permanência no campo, o solo fica muito suscetível à compactação, processo dependente de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos deste, podendo ser revertido através de técnicas, como subsolagem ou aração profunda. Porém, tais técnicas geram altos gastos de energia e capital, sendo que alguns manejos, como o controle do tráfego agrícola, contribuem para diminuição da carga exercida sobre o solo e dos custos de produção. Diversos aparelhos foram desenvolvidos para a apuração de atributos do solo diretamente no campo, visando averiguar áreas a serem manejadas por causa da compactação. A penetrometria é uma técnica muito utilizada na verificação de áreas com problemas de compactação, entretanto, existem diversos penetrômetros, que possuem modos de atuação diferenciados. Os objetivos deste estudo foram verificar a eficiência de dois penetrômetros com diferentes modos de introdução da haste metálica no solo (automático e manual) e a correlação dos índices obtidos (resistência à penetração) com outros atributos do solo (teor de água). Os resultados comprovaram que o teor de água no solo altera os resultados de resistência a penetração e a utilização de equações de regressão não linear expressam bem a relação entre estes dois atributos do solo, podendo ser utilizado para correção dos dados antes da comparação de diferentes sistemas de manejo. O ajuste das medições de resistência de acordo com o teor de água no solo diminuiu o intervalo de confiança da média na comparação de diferentes manejos, o que melhora a comparação de atributos que apresentam alta variabilidade, como a resistência do solo a penetração. Os dois métodos de utilização do penetrômetro (Manual e Automático) apresentaram diferenças significativas nas medições, de modo que houve uma tendência das medições manuais superestimarem os valores de resistência.

Palavras chave: Cana-de-açúcar; Mecanização; Penetrômetro digital; Teor de água no solo



## ABSTRACT

### Penetrometer application for soil compaction quantification

Modern agriculture has suffered a large impact of mechanization due to increased of traffic and the weight of the machinery. The sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) crop is highly mechanized and, since it is a semi perennial crop, the soil is very susceptible to compaction, a process dependent on a number of intrinsic and extrinsic factors that can be reversed through techniques, such as deep tillage or subsoiling. However, these techniques are expensive, and some crop managements, such as traffic control, contribute to reduction of production costs and the load on the soil. Several devices have been developed for the determination of soil attributes in the field, aiming to determine areas to be managed because of compaction. The penetrometer is a widely used equipment in the verification of areas with compaction problems. However, there are several penetrometers, which have different action mode. The objective of this study was to verify the efficiency of two penetrometers with two modes of introduction of the metal rod into the soil (automatic and manual) and the correlation of obtained data (penetration resistance) with soil water content. Results showed that the soil moisture modify the penetration resistance data and the use of non-linear regression equations express well the relationship between these two soil properties and can be used for correction of the data before comparing different management systems. The modeling of soil resistance measurements with soil moisture decreased confidence interval of the mean in the comparison of different management systems, which improves the comparison of attributes that have high variability, as the soil resistance to penetration. The two penetrometers methods (manual and automatic) showed significant differences in data measurements, showing a tendency for manual measurements overestimate the values of soil resistance.

Keywords: Sugarcane; Mechanization; Penetrometer, Soil moisture



## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na área agrônômica tornou a agricultura uma prática modernizada e transformou-a em uma ciência praticamente exata, onde são contabilizados todos os prós e contras, visando à obtenção de melhores índices de produtividade e rentabilidade. Deste modo, todos os fatores que influenciam diretamente a lavoura são analisados mais detalhadamente, a fim de que seja possível sempre melhorar tais índices, por meio de manejos mais adequados. Neste contexto, o solo se torna um fator preponderante, atuando diretamente sobre o resultado visado. A avaliação dos atributos físicos do solo busca compreender os processos que interferem na sua qualidade e, por intermédio destes, programar o manejo mais adequado a manutenção de características benéficas, aprimorando os resultados obtidos a cada safra. Logo, o estudo e inferência dos atributos físicos de um solo têm papel importante no desenvolvimento de técnicas aprimoradas de manejo.

A partir das informações citadas é possível afirmar que nem sempre as condições de campo são favoráveis, permitindo que as coletas e averiguação de índices obedeçam a determinadas normas, verificando-se a necessidade de identificar quais equipamentos são mais recomendados, eficazes e precisos no momento de realizar medições em campo, gerando dados confiáveis em diferentes condições de contorno. O uso do penetrômetro na avaliação da compactação do solo é relevante, porém, os resultados obtidos por meio deste aparelho devem ser inseridos em um contexto mais abrangente na avaliação da compactação, contemplando diferentes condições de utilização (tipo de solo; tipo de cobertura; sistema de manejo), modos de obtenção de resultados (manualmente ou automatizado) e a influência sofrida por outros atributos do solo (teor de água, densidade, teor de matéria orgânica); e a adequação de medições que busquem a menor geração de erros sistemáticos é imprescindível.

O comportamento dos atributos físico-hídricos do solo está intimamente ligado ao manejo deste. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é responsável pela produção de duas das principais commodities do mercado brasileiro, açúcar e etanol, as quais são importantíssimas para a economia nacional e impactantes no âmbito da economia mundial. O Brasil figura como o primeiro e o segundo maior produtor mundial de açúcar e etanol, respectivamente e é o maior exportador de ambos. As estimativas da safra 2011/2012 mostraram uma produção nacional de 558.775 t de cana-de-açúcar, dessa qual a região centro-sul representou 88,3 % (493.264 t), sendo 54,4 % (304.230 t) somente a produção do Estado de São Paulo, o que representou 58,6 % (21.068 t) da produção de açúcar e 51,2 % (11.598 t)

da produção de etanol total (anidro + hidratado) (UNICA, 2012). Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012) indicam que a área plantada de cana-de-açúcar no período foi de 8,4 milhões de hectares, de modo que 52,6 % (4,4 milhões de hectares) está presente em São Paulo.

Estes dados comprovam a importância da indústria sucroalcooleira para a economia do país. Portanto, se torna importante o desenvolvimento de projetos que visem o desenvolvimentos de técnicas que possam melhorar o manejo desta cultura. Todas as etapas do processo produtivo da cana-de-açúcar são estabelecidas por meio de metas que visam o aumento da produtividade e a diminuição de gastos. Por se tratar de uma cultura semiperene, sabe-se que a influência do manejo desta sobre a compactação do solo tem um efeito marcante, uma vez que o histórico de mecanização de uma área está intimamente ligado ao grau de compactação que esta pode apresentar. Soma-se a isso a crescente mecanização que tal cultura apresenta na atualidade, suportada por mudanças legislativas referente a conservação do solo e a nova sistemática ambiental, voltadas a mudança das colheitas por corte manual, após a queima da palhada, pela colheita mecanizada em sistemas de cana crua.

A renovação tecnológica pela qual a agricultura vem passando, torna necessária a avaliação de equipamentos que visem mensurar atributos físico-mecânicos do solo em condições dinâmicas, averiguando o grau de variabilidade que os atributos do solo podem conferir aos índices obtidos. Por conseguinte, a hipótese deste trabalho foi de que a utilização da penetrometria para avaliação da compactação do solo depende de fatores como modo de atuação do aparelho e das condições de alguns atributos físicos do solo, principalmente o teor de água do solo. Com isso o objetivo geral foi verificar a atuação de um penetrômetro estático eletrônico de campo na identificação de áreas compactadas na cultura da cana-de-açúcar, frente à alta mecanização presente no manejo desta. Os objetivos específicos foram: i) verificar influência do teor de água do solo em fatores como: variabilidade espacial da resistência à penetração, comparação de áreas na averiguação da compactação do solo; ii) comparar dados de resistência à penetração obtidos por dois penetrômetros com diferentes modos de atuação, manual e automático.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Revisão Bibliográfica**

#### **2.1.1 Compactação de solos agrícolas**

Os solos apresentam variadas características físicas e químicas que lhes conferem distintas respostas ao seu manejo e à cultura agrícola. Porém, de maneira abrangente, a partir do momento em que o solo é utilizado para fins agrícolas, ocorrem modificações em algumas de suas propriedades originais (PAULINO et al., 2004). Tais modificações interferem em sua resposta, podendo ser benéficas, indiferentes ou impeditivas ao desenvolvimento da cultura, principalmente, nesse último caso, por desfavorecerem o desenvolvimento radicular das plantas (BRITO et al., 2006). As mudanças impeditivas são as mais importantes, pois interferem na produtividade de uma cultura, além de influírem gradativamente na conservação dos solos agrícolas, favorecendo processos erosivos que geram perdas de nutrientes e perda de vigor das culturas.

A restrição ao crescimento radicular ocorre devido a problemas químicos, biológicos ou físicos. Os problemas físicos estão relacionados, principalmente, à compressão das partículas sólidas do solo, que tem efeito negativo sobre a macroporosidade, pois os macroagregados quando comprimidos são pulverizados, deixando o solo com aspecto maciço (OLIVEIRA et al., 2010) o que dificulta o crescimento radicular e gera um processo conhecido como compactação. Compactação é o processo no qual ocorre concentração das partículas sólidas de um solo em decorrência da expulsão do ar gerada pela redução de sua porosidade. Esse processo é marcado pela redução do volume do solo e aumento de sua densidade e é gerado pela aplicação de uma pressão externa antropogênica (SOUZA et al., 2009). As diferenças intrínsecas dos solos, referentes à sua composição mineralógica e textural, influenciam o comportamento diferenciado que estes apresentam frente à compressão (SEVERIANO et al., 2008), o que reflete em diferentes respostas à compactação. Além dos fatores intrínsecos há os fatores externos que influenciam a compactação, como o tipo, intensidade, frequência e tempo de aplicação de uma carga (MACHADO et al., 2010), e alguns autores enfatizam a importância da pressão de inflação dos pneus, o teor de água do solo e a intensidade de tráfego na intensidade da compactação (HÅKANSSON et al. 1990). Todavia, independentemente do tipo de solo ou manejo, a compactação restringe o crescimento das plantas, pois esta é marcada pela diminuição da porosidade de aeração do solo (macroporosidade) e aumento da resistência à penetração das raízes, fato que não ocorre em

solos bem estruturados, onde as restrições são relacionadas apenas ao déficit hídrico (SEVERIANO et al., 2008).

No solo compactado, o sistema radicular prevalece acima das camadas adensadas, ultrapassando-a apenas em planos de fraquezas e rachaduras (SOARES et al., 2005), fato que dificulta o desenvolvimento e a manutenção da cultura em períodos de estiagem prolongada. A implementação de uma agricultura intensiva e altamente tecnificada tem incentivado a utilização de maquinário de alta tração e capacidade de trabalho, sendo que o tráfego dessas máquinas tem aumentado a degradação física do solo, gerando obstáculos ao crescimento radicular (CARRARA et al., 2007). O gasto energético de máquinas agrícolas e a degradação do solo, pela compactação, são problemas reconhecidamente causados pelo manejo inadequado, devido à alta correlação entre manejo e atributos físicos do solo (YAVUZCAN, 2000).

Além da compactação da camada superficial, existe a preocupação quanto à compactação em subsuperfície, principalmente devido à sua persistência (ARVIDSSON, 2001). Nesse caso, a compactação é um problema de difícil avaliação visual, pois deixa pouco indício sobre a superfície do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Como altas resistências em camadas subsuperficiais impedem o desenvolvimento radicular das culturas e diminuem sua produtividade (BUSSCHER et al., 2006), a existência de camadas subsuperficiais compactadas pode ocasionar muitas perdas na agricultura, tornando importante o desenvolvimento de técnicas para verificação da existência de tais camadas e sua eventual descompactação.

A compactação pode ser remediada através de técnicas como aração profunda ou subsolagem, porém, é necessário um conhecimento prévio da área a ser manejada, pois tais técnicas, além de caras e de necessitarem de altos gastos de energia, também podem levar à degradação física do solo (DOMSCH et al., 2006). O manejo do solo é extremamente dependente de sua constituição, pois esta interfere na sua resposta aos fatores condicionadores da erosão, como o vento e a chuva. Por exemplo, em solos arenosos, sob condições hídricas restritivas, como em um veranico, é recomendável o revolvimento, pois os altos valores de resistência encontrados nesta situação tornam-se incompatíveis com o bom desenvolvimento da cultura (LÓPEZ et al., 1996). Em solos argilosos, onde a pulverização das partículas aumenta sua suscetibilidade à erosão hídrica, a escarificação ou subsolagem são opções que favorecem o aumento da produtividade da cana-de-açúcar (HAMMAD; DAWELBEIT, 2001) devido à desestabilização de camadas compactadas mais profundas, permitindo o melhor desenvolvimento da cultura, sem deixar o solo totalmente desestruturado.

Por outro lado, o controle do tráfego na agricultura ajuda a minimizar os efeitos negativos da mecanização agrícola, além de permitir diminuir gastos de produção, gerando um aumento do lucro das culturas (ROQUE et al., 2010). Por isso, embora o advento da aração profunda ou subsolagem favoreça, inicialmente, o desenvolvimento das raízes, é importante ressaltar que o efeito não é duradouro, sendo que o solo pode, com o tempo, apresentar valores de densidade e resistência à penetração superiores aos de seu estado inicial, de modo que a subsolagem só tem efeito sobre a compactação caso a intensidade de tráfego seja diminuída após a operação de preparo do solo, devido a maior suscetibilidade deste a recompactação, gerada pelo abalo da sua estrutura (SHÄFER-LANDEFELD et al., 2004). Portanto, deve-se atentar para o fato de que as operações de manejo do solo são extremamente importantes para a obtenção de índices produtivos mais elevados, mas a utilização de técnicas, como subsolagem, não é anualmente obrigatória (BUSSHER; BAUER, 2003), nem necessária em todas as áreas de cultivo, sendo importante a identificação dos locais de interesse para tal manejo.

Por isso, a averiguação das situações de real necessidade de controle da compactação do solo depende da utilização de índices que tenham alta confiabilidade para a tomada de decisão. Sabe-se que alta densidade do solo, baixa taxa de infiltração de água e alta resistência à penetração estão relacionadas (SOUZA et al., 2006b) e por isto esta última tem sido priorizada nos estudos de manejo e compactação do solo (SOUZA et al., 2009) devido à facilidade e rapidez de sua obtenção (BUSSCHER et al., 2000) e correlação com atributos da planta, como crescimento radicular (BUSSCHER; BAUER, 2003) e produtividade (WHALLEY et al., 2008). Deste modo, devido a facilidade e rapidez de obtenção de resultados, a localização de áreas compactadas pode ser realizada com base na resistência a penetração (DOMSCH et al., 2006).

### **2.1.2 Penetrometria na verificação da compactação**

Embora não seja possível evitar o aparecimento de camadas adensadas, tanto em sistemas convencionais quanto em sistemas conservacionistas (DOMSCH et al., 2006), pesquisas têm demonstrado relações lineares inversas entre produtividade e resistência do solo à penetração (BUSSCHER; BAUER, 2003). Este atributo é muito utilizado como parâmetro na avaliação do solo, como por exemplo, na criação de mapas de compactação. Sua forma de amostragem é um assunto pouco abordado, tanto quanto ao arranjo experimental no campo quanto aos aparelhos utilizados. A maioria dos métodos de avaliação dos atributos físicos do solo acaba sendo um empecilho perante algumas técnicas inovadoras, como a agricultura de

precisão, pois diversas análises laboratoriais são trabalhosas e demandam muito tempo para obtenção de resultados que possam ser utilizados na tomada de decisões sobre o manejo do solo. Devido a isto muitos aparelhos foram desenvolvidos para facilitar e acelerar a obtenção de resultados, que é o caso de penetrômetros, equipamentos simples que inferem a resistência à penetração (AGGARWAL et al., 2006). A medição de resistência do solo por penetrometria transformou-se em uma técnica rápida, fácil e de baixo custo, sendo extensamente utilizada em estudos de compactação (BAGHDADI et al., 1993; BUSSCHER et al., 1997; FERRERO et al., 2005; BELBIN; COTCHING, 2004; CARRARA et al., 2007).

A técnica da penetrometria é antiga, sendo que há relatos de que os primeiros equipamentos foram desenvolvidos em 1846 (PERUMPRAL, 1987). Desde então, diversos penetrômetros foram desenvolvidos para aplicação em diferentes áreas do saber (engenharia civil, mecânica). Muitos foram utilizados para avaliar a resistência do solo à penetração em sistemas de uso e manejo. No entanto, os valores obtidos com os mesmos podem divergir (BEUTLER et al., 2007). A principal diferença é relacionada à velocidade de inserção da haste no solo, podendo ser constante, que é o caso de penetrômetros automatizados, ou dependente do operador, conforme ocorre com penetrômetros de esforço manual. Estas configurações são capazes de interferir no resultado das leituras coletadas *in situ* (HERRICK; JONES, 2002). Em linhas gerais, a confiabilidade dos dados gerados por um penetrômetro manual está diretamente relacionada ao fato da velocidade estar constante durante a penetração da haste no solo, mesmo que isto seja quase impossível (CARRARA et al., 2007). Então, quando não se mantém uma velocidade constante, a força exercida também não o é (HERRICK; JONES, 2002), e caso ocorra alguma aceleração da haste ao penetrar o solo, a força aumentará e vice e versa (SUN et al., 2006). Conforme relatado por Reinert et al. (2007), a maioria dos penetrômetros usados em estudos de manejo do solo emprega a força manual para a haste penetrar o solo, o que causa grande variabilidade devido à dificuldade de impor pressão constante ao longo do tempo de penetração tal que permita velocidade constante durante o ensaio de penetrometria.

Penetrômetros automatizados, que possibilitam obter medições com velocidade constante, podem gerar mais dinamicidade ao processo de amostragem (CARRARA et al., 2007), pois possibilitam seu acoplamento em carrinhas, ou ainda adaptações em carros ou tratores, abrangendo áreas extensas em menor tempo. Segundo Carrara et al. (2007) o penetrômetro automatizado possui vantagens devido à velocidade constante de penetração, recomendado pela American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE,

2009), diminuição do tempo de amostragem e o fato de aplicar uma força normal ao plano de campo.

Considerando que possa ser realizada uma padronização quanto ao tipo de penetrômetros utilizados, sabe-se que existem características e propriedades intrínsecas do solo que podem afetar os valores de resistência do solo à penetração. A textura é um importante atributo do solo que influencia os valores da RP. Vários autores encontraram valores de resistência mais elevados para solos de textura mais grosseira quando comparados com solos de textura fina (MAPFUMO; CHANASYK 1998; WHALLEY et al., 2008). Porém, a literatura é divergente, de modo que existem outros trabalhos em que os solos de textura mais fina apresentaram valores mais elevados de resistência (ASSIS et al. 2009; AJAYI et al., 2009). Buchanan et al. (2010), embora tenham encontrado resultados que apontam para um incremento nos valores de resistência conforme há um aumento no conteúdo de argila, citam que a maioria dos estudos indica o contrário. De modo geral, solos mais grosseiros (com menor teor de argila) apresentam densidades mais elevadas, que podem contribuir para maiores valores de resistência. Em contrapartida, solos de textura mais fina podem apresentar efeito contrário (densidades menores e resistência mais baixas). Casos em que os solos de textura fina apresentam valores mais elevados, as distinções podem ser atribuídas às diferenças estruturais dos solos estudados ou ao manejo.

A influência da textura sobre a resistência é tão marcante que vários autores já trabalharam com funções relacionando tais variáveis. To e Kay (2004) desenvolveram uma equação correlacionando resistência com potencial mátrico do solo, na qual seus parâmetros ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) eram função da textura e outros atributos do solo. Em trabalho de Silva et al. (2008) foi possível ajustar as curvas de resistência em função dos teores de argila, obtendo-se altos valores de  $R^2$ . Esse comportamento distinto frente à textura, pode ocasionar diferentes respostas ao correlacionar dados de resistência advindos de solos com texturas contrastantes.

Porém, como citado, existem outros atributos do solo que interferem na resistência, logo a textura não deve ser tomada unicamente para análise de tal variável, pois, embora possa trazer importantes informações sobre a resposta de um solo frente à compressão de partículas, há outros atributos, que são dependentes do manejo que este solo é submetido. Portanto, mesmo que dois solos apresentem textura similar, é possível, através de seu manejo, alterar algumas características que podem se expressar nos valores de resistência do solo a penetração. Dentre estes atributos é sabida a importância dos estoques de carbono orgânico do solo, que refletem diretamente sobre os conteúdos de matéria orgânica deste, a qual participa

de vários processos físicos, químicos e biológicos de estruturação do solo. Basicamente, quanto maior conteúdo de C.org de um solo, maior será seu teor de matéria orgânica e, logo, maior a possibilidade deste apresentar uma melhor qualidade estrutural, o que influi sobre sua agregação, porosidade e nos valores de resistência do solo a penetração. Sharma et al. (2001) verificaram que o incremento do conteúdo de carbono orgânico influenciou negativamente os valores da densidade do solo, o que interferiu no comportamento da resistência deste. Resultado semelhante foi encontrado por Stock e Downes (2008) para valores maiores que  $6 \text{ g kg}^{-1}$  de carbono orgânico, de modo que quando o conteúdo variou de 0 a  $6 \text{ g kg}^{-1}$  estes autores relataram aumento da densidade do solo e da resistência a penetração. Porém, Spivey Junior et al. (1986) não encontrou correlação significativa entre carbono orgânico e resistência do solo a penetração para solos com menos que  $10 \text{ g kg}^{-1}$  de carbono orgânico.

Outro fator que influencia os valores de resistência a penetração que um solo pode apresentar é o seu teor de água, de modo que sua interferência ocorre porque o filme de água presente entre as partículas do solo relaciona-se à força de atrito que este apresenta ao ser perfurado e a coesão apresentada pelos agregados. Segundo Cunha (2002), apesar de muitos estudos terem sido realizados, não existe uma quantificação da influência de uma determinada variação no teor de água sobre a resistência à penetração para diferentes solos, ou se estes acréscimos influenciam o coeficiente de variação dos dados de resistência de um determinado solo. Dados de Utset e Cid (2001) e de Souza et al. (2006b) mostram que solos com alto teor de água apresentam coeficiente de variação maior que solos secos, comprovando esta influência. Seguindo esta premissa, solos com alto teor de água necessitariam de uma grade amostral mais densa, ou seja, com número maior de amostragens quando comparado aos solos mais secos (SOUZA et al., 2006b).

Em condição de baixo teor de água, encontra-se um maior estado de tensão de água nos poros do solo (ASSIS et al., 2009) e, somando-se as forças de coesão e de adesão entre os sólidos do solo, ocorre maior resistência à deformação (CUNHA, 2002). Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e seu atrito interno, provocando, então, a diminuição da resistência mecânica. Alguns autores consideram que o conteúdo de água na capacidade de campo é a ideal para a determinação da resistência (HENDERSON, 1989; ARSHAD et al., 1996). Porém, Assis et al. (2009) discordam que a capacidade de campo seja ideal, pois a água diminui a capacidade de detecção das diferenças existentes nos resultados. Tal discordância pode ser pelo fato que os penetrômetros utilizados anteriormente eram, na grande maioria, manuais e não possibilitavam a obtenção de dados em

solos com baixo teor de água. Isso pode ser contornado com a utilização de penetrômetros automatizados.

### **2.1.3 Manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**

O manejo da cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) utiliza um grande aporte de maquinário desde o plantio até a colheita (CEDDIA et al., 1999; PAULINO et al., 2004). Embora o preparo do solo seja dependente do clima, relevo e tipo de colheita, nesta cultura convencionou-se a utilização de revolvimento profundo (HAMMAD; DAWELBEIT, 2001). Durante o ciclo, além dessas operações, em alguns casos, na colheita é realizada a queima de resíduos, fato que contribui para a degradação física dos solos agrícolas (SOUZA et al., 2004a). Esta aceleração do processo erosivo influencia os atributos do solo, como a estabilidade de agregados (CEDDIA et al., 1999).

Por outro lado, manejos conservacionistas nem sempre refletem em condições mais favoráveis de solo ao cultivo (LÓPEZ et al., 1996), sendo sua grande aceitação mais relacionada ao controle erosivo do solo (OSUNBITAN et al., 2005) do que pela resposta das culturas. Ao verificarmos o sistema cana crua, com a colheita mecanizada, ocorre aumento da carga exercida sobre o solo, devido à utilização de colhedoras e isso também influencia os atributos do solo. Segundo Blanco-Canqui (2010), as práticas culturais têm pouca influência sobre as propriedades físicas do solo, agindo somente sobre a taxa de infiltração de água, enquanto que o impacto do tráfego sobre o solo tem influência significativa sobre todas as suas propriedades físicas. No cultivo da cana são utilizados tratores que realizam o plantio em uma ou duas linhas e a colheita é realizada, normalmente, em linha única acompanhada do caminhão de transbordo, o que confere a essa cultura alta trafegabilidade, com altos impactos na qualidade física do solo, caracterizando a necessidade de renovação do plantel após algumas safras (ROQUE et al., 2010).

A crescente adoção da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar trouxe efeitos deletérios sobre vários atributos do solo, dos quais os que sofrem maiores alterações são: densidade, geometria de poros, condutividade hidráulica, resistência à penetração, teor de matéria orgânica e estabilidade de agregados. Tais mudanças são causadas principalmente pela compactação do solo, processo abordado em diversos estudos referente à cultura da cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2004b; SOARES et al., 2005; SILVA; CABEDA, 2006; SEVERIANO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2010). Dentre os atributos relacionados à compactação, os mais extensivamente abordados são porosidade relacionada à retenção e

condutividade da água e do ar, além da densidade e o impedimento mecânico ao crescimento das raízes (SOUZA et al., 2009).

A verificação do grau de compactação dos solos cultivados com cana-de-açúcar tornou-se um fator muito importante com o advento da alta mecanização (SOUZA et al., 2006a). Isto se reflete no fato desta ser uma cultura altamente suscetível à compactação por ser considerada semiperene, dado que seu cultivo se estende por safras consecutivas, sendo interrompido somente quando ocorre uma diminuição demasiada na produtividade do talhão. O principal componente da planta afetado pelas características físicas do solo é a raiz, órgão que é de suma importância por ser responsável por quase a totalidade da absorção de água e nutrientes, além de fixar as plantas ao solo (LIBARDI; LIER, 1999). Logo, como o tráfego de maquinário pesado contribui para o aumento da densidade do solo na camada superficial (MACHADO et al., 2010), sua porosidade é afetada (SHÄFER-LANDEFELD et al., 2004), crescendo sua resistência mecânica à penetração, o que influi sobre o crescimento de raízes (QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998).

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Área experimental**

O experimento foi realizado em talhões de cana-de-açúcar pertencentes à Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), pólo regional centro-sul, localizada no município de Piracicaba, SP (Figura 1). A área experimental localiza-se numa latitude sul de 22°41'04" e longitude oeste de 47°38'52", a uma altitude de 547 metros. O clima da região é tropical de altitude, Cwa segundo Köppen, com temperatura média de 24°C, com verões quentes e úmidos com pluviosidade média de 229,5 mm no mês de janeiro e invernos de temperaturas amenas e com menor incidência de chuvas com pluviosidade média em torno dos 28,2 mm em julho.

Nesta área há diversas parcelas cultivadas com cana-de-açúcar, com plantéis de diferentes idades, onde estão instalados experimentos com diferentes variedades para comparação de manejos do solo. Dentre estas parcelas, foram selecionadas três, com o propósito de verificar a hipótese referente à sensibilidade da penetrometria na verificação de áreas compactadas. As parcelas constaram de: uma com cana-soca, plantada em julho/2010, tendo sido sua primeira colheita com corte manual (1CMan) em julho/2011; uma parcela de cana-soca, plantada em abril/2010, tendo sido sua primeira colheita realizada por corte mecanizado (1CM) em julho/2011; e uma parcela de cana-soca, plantada em abril de 2008, com três cortes efetuados, por colheita mecanizada (3CM), em junho/2009, junho/2010 e julho/2011. Todas as áreas foram mantidas com as entrelinhas cobertas pelos restos culturais da colheita anterior. Dentre as três, somente a parcela 3CM foi cultivada, de maneira que, a cada três entrelinhas, em duas era realizada tal operação. Nesta parcela a coleta de dados ocorreu apenas nas entrelinhas não cultivadas.

O solo do local era um Latossolo Vermelho álico, textura argilosa a muito argilosa, com A moderado. Devido ao manejo Nas três parcelas utilizadas neste estudo os valores de C.org foram muito baixos, evidenciando que o manejo da cana-de-açúcar contribuiu para o processo de mineralização da matéria orgânica do solo (Tabela 1). A uniformidade dos tratamentos pode ser verificada pela pequena variação da textura e dos valores de C.org.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica e quantidade de carbono orgânico das parcelas 1CMan, 1CM e 3CM

Camada m	Argila			Areia			Silte			Carbono Orgânico		
	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM
0,0 a 0,1	540,79	569,78	541,99	318,98	310,75	332,52	140,23	119,46	125,49	11,42	10,98	12,08
0,1 a 0,2	543,23	565,02	539,73	321,64	308,89	332,23	135,14	126,08	128,04	11,46	10,09	10,84
0,2 a 0,3	565,91	609,31	548,79	303,52	283,04	328,06	130,58	107,65	123,15	10,76	9,08	10,54



Figura 1 - Área experimental. Parcelas demarcadas: cana-soca com 1° corte mecanizado (1), cana-soca com 1° corte manual (2), cana-soca com 3° corte mecanizado (3) e estação meteorológica (4)

Em todas as parcelas as operações de adubação de cobertura e calagem eram realizadas pelo lançamento do material sobre a superfície do solo. O fato de todas as análises terem sido efetuadas em locais não revolvidos contribuiu para a verificação do processo de compactação, uma vez que, estando todas as parcelas presentes no mesmo tipo de solo, cotas semelhantes e sob mesmo manejo, aliado ao histórico de mecanização da área, auxiliam na inferência de que, quanto maior o número de cortes, mais compactado provavelmente o solo estaria.

Cada parcela tinha 31 x 80 m, e para todas as parcelas fixou-se uma bordadura de 5 m, a partir da qual as medições eram realizadas.

### 2.2.2 Preparo do Solo

As três parcelas utilizadas neste trabalho são cultivadas com cana-de-açúcar há pelo menos 20 anos. O preparo, embora efetuado em épocas distintas, seguiram as mesmas

premissas. Primeiramente foi realizada uma gradagem pesada (aradora), para desagregação do solo e revolvimento de touceiras de capim e dos resquícios da cultura anterior. Em seguida foi realizada uma subsolagem (Subsolador com cinco hastes), acoplado em um trator Massey Ferguson MF262, para descompactação de camadas mais profundas. Após esta operação foram realizadas mais duas gradagens na área, uma pesada e outra média. Em seguida, foi realizado o sulcamento para o plantio dos toletes. O plantio foi efetuado com carreta (Ford 6600), colocando-se dois toletes perpendiculares e arranjados contrariamente (ponta apical *versus* base do colmo), conhecido como arranjo “pé com ponta”. Estes toletes eram cortados antes da cobertura com solo, deixando apenas três gemas interligadas. Na parcela 1CMan foi cultivada a variedade RB86-7515, enquanto na parcela 1CM foi plantada a variedade IAC87-3396 e na parcela 3CM a variedade SP81-3250, todas de grande expressão no estado de São Paulo e comumente cultivadas em todas as regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil.

Três meses depois do plantio, foi realizada a operação “quebra-lombo”, que visa uniformizar a superfície do solo na entrelinha para que possa ser realizada a colheita mecanizada. A colheita mecanizada foi realizada com uma colhedora de linha única, acompanhada de transbordo (parcelas 1CM e 3CM). A colheita manual foi realizada com o corte da planta manualmente que, com utilização de carregadores convencionais, era alocada em carretas para retirada da área (parcela 1CMan). Em ambos os tipos de colheita não foi realizada queima da palhada, mantendo-se os resíduos das colheitas anteriores nas entrelinhas da cultura.

Na parcela 3CM o plantio foi realizado no final de abril de 2008, época em que o solo se encontrava nas condições recomendadas para entrada de maquinário na área (friável). Nesta área foram realizadas três colheitas, sendo a da cana-planta realizada em início de junho de 2009, da primeira cana-soca em meados de junho de 2010 e da segunda cana-soca em início de julho de 2011. Nestas épocas o solo se apresentava nas condições ideais para entrada de máquina nas áreas, devido a não ocorrência de eventos chuvosos (Figura 2). O plantio nas parcelas 1CM e 1CMan foi realizado em final de abril e início de julho de 2010, respectivamente. A colheita da cana-planta em ambas as áreas ocorreu no início de julho de 2011.

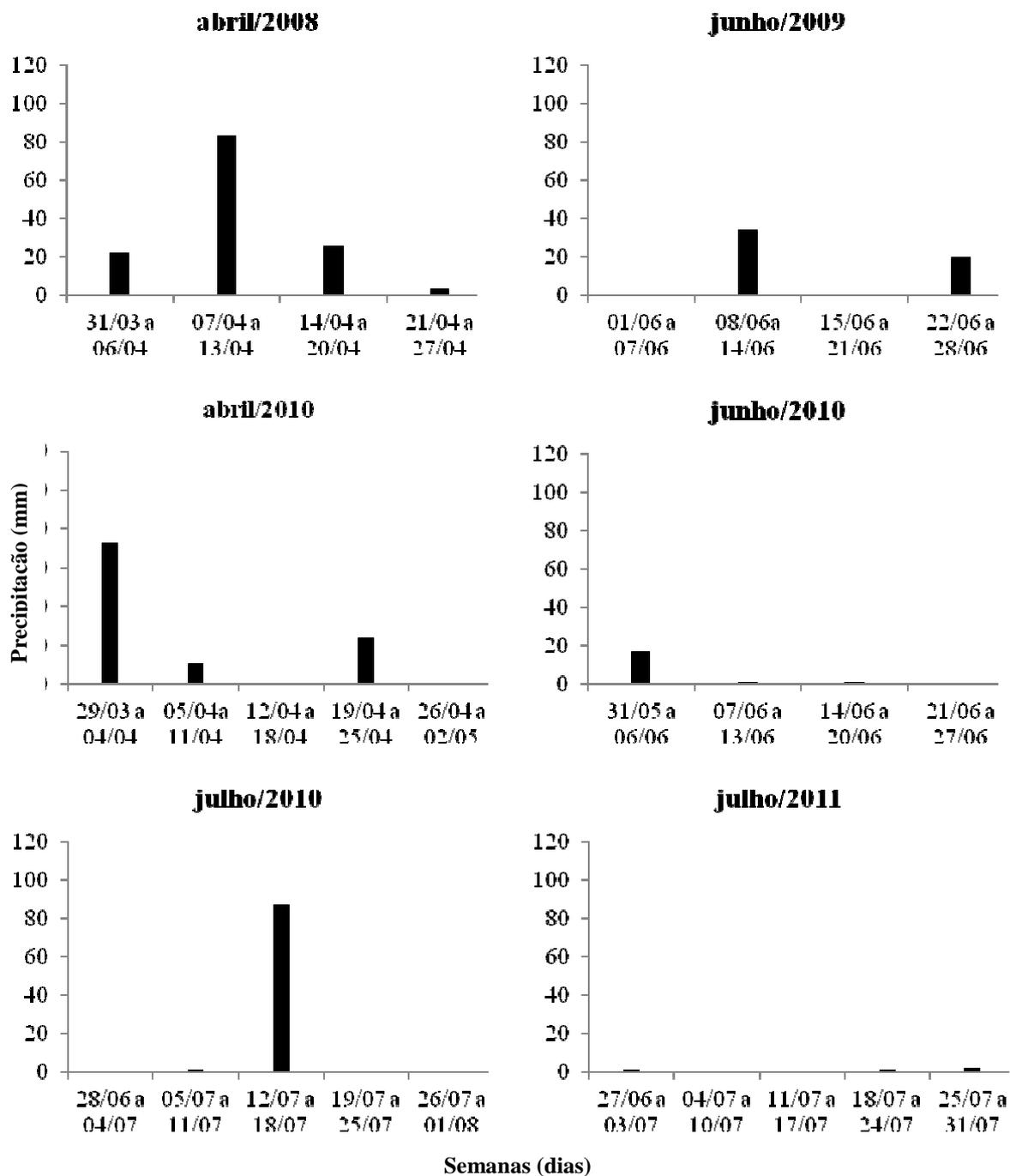


Figura 2. - Gráficos pluviométricos referente aos meses em que realizou-se o plantio e as colheitas das parcelas 1CMan, 1CM e 3CM

## 2.2.3 Atributos Avaliados

### 2.2.3.1 Resistência do solo à penetração (RP) e teor de água do solo ( $\theta$ )

Para obtenção dos valores de RP (MPa), foi utilizado um penetrômetro eletrônico da Falker Automação Agrícola e de tecnologia nacional, com princípio de funcionamento normatizado pela ASABE (2009), modelo PLG1020. A forma de aquisição de dados em

campo ocorreu de duas formas: por esforço manual, onde a ponta cônica e a haste do equipamento eram inseridas no solo através da força do operador; e automatizada, de modo que o mesmo equipamento era acoplado em um amostrador de solo eletro-mecânico desenvolvido por Figueiredo (2010), o qual realizava as medições com velocidade constante ( $5.10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ). A ponta cônica utilizada possuía área basal de  $7,74 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ , ângulo de  $30^\circ$  e era presa em uma haste de 0,40 m de comprimento e  $6 \times 10^{-3} \text{ m}$  de diâmetro (Figura 3).

As leituras de RP foram obtidas instantaneamente no campo. Os ensaios foram realizados na camada de 0,0 a 0,3 m. Para cada medição foi realizada uma média para as camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2; e 0,2 a 0,3 m. Todas as medições foram realizadas nas entrelinhas em grade fixa, totalizando 182 pontos por parcela. Nas parcelas 1CMan e 1CM a grade amostral foi de 5 m x 1,5 m, totalizando 13 pontos de amostragem em cada entrelinha e 14 entrelinhas por parcela. Já na parcela 3CM a grade foi de 2,5 x 4,5 m com 26 pontos de amostragem em cada entrelinha e 7 entrelinhas. A cada ponto a RP era coletada da seguinte maneira: primeiramente era realizada a obtenção de modo manual, em um ponto centralizado na entrelinha; em seguida, a uma distância de 0,15 m, paralela as linhas de plantio, era realizada a leitura pelo método automatizado; entre os dois pontos eram coletados os dados de  $\theta$  (Figura 3). Essa distância respeita os limites citados por Becher (1994), de que a distância mínima entre duas medições de RP deve ser 10 vezes o diâmetro do cone utilizado, devido às mudanças da Ds envolta da haste do penetrômetro durante a penetração.

Todas as medições foram realizadas durante os meses de janeiro e fevereiro de 2012. A primeira coleta de dados foi realizada no dia 10 de janeiro, logo após duas semanas de intensos eventos chuvosos (Figura 3). As coletas foram realizadas esporadicamente, para abranger uma grande amplitude nos valores de  $\theta$ . Até o sétimo dia de coleta houve uma secagem gradual do solo, sendo que na primeira semana e no início da segunda semana de fevereiro foram realizadas várias coletas em dias sucessivos devido à parada das chuvas e a rápida secagem do solo (Figura 4). Com o retorno dos eventos chuvosos as coletas esporádicas voltaram a ocorrer, até a décima quarta, e última, coleta ser realizada em 1 de março de 2012.

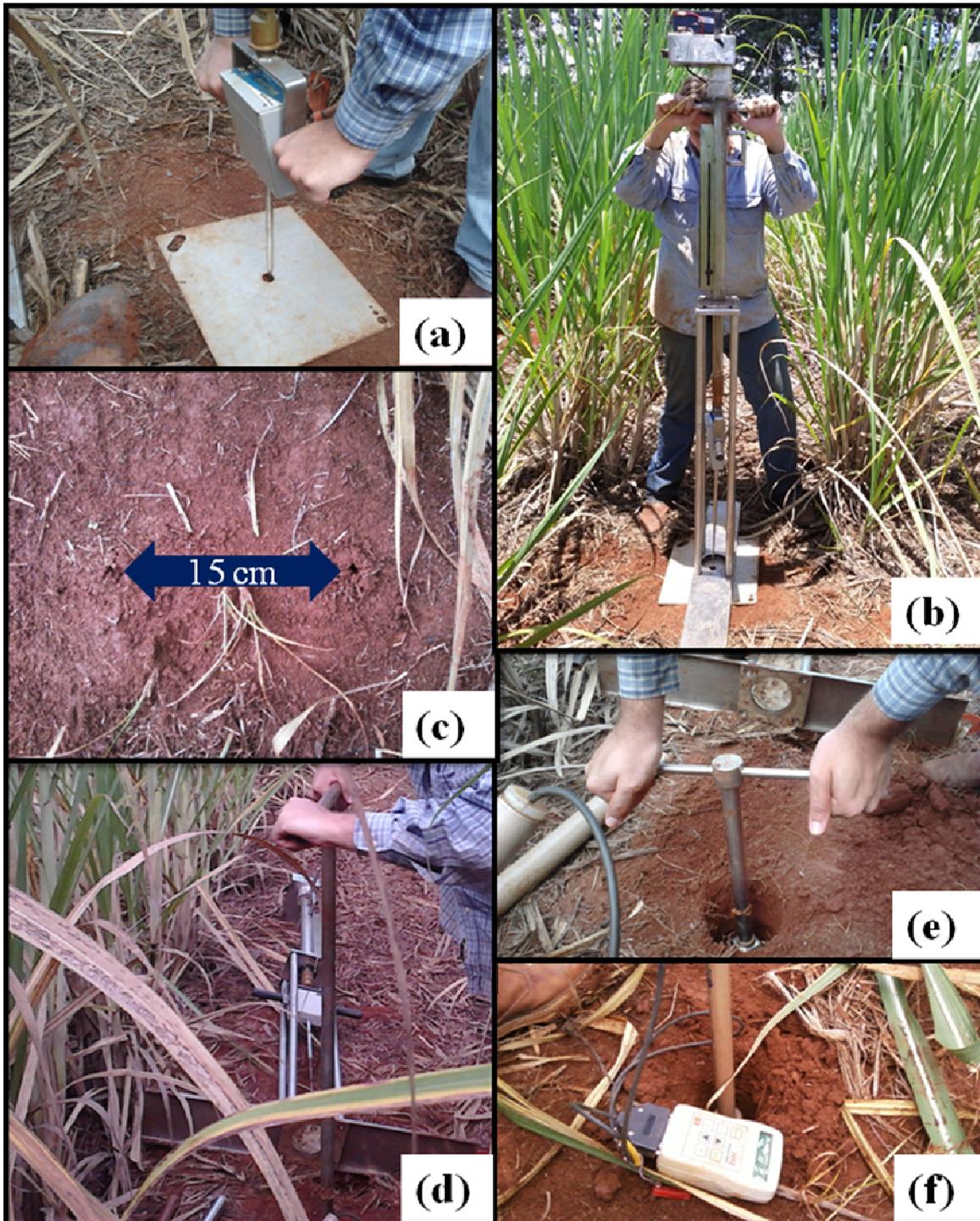


Figura 3 - Etapas das medições de RP e  $\theta$ : coleta de RP com o penetrômetro PLD1020 pelo método manual (a); pelo método automático (b); distância entre os pontos de medição da RP (c); tradagem para coleta do  $\theta$  em profundidade (d); aplainamento da superfície do orifício de tradagem (e); medição do  $\theta$  com o sensor ML2x (f)

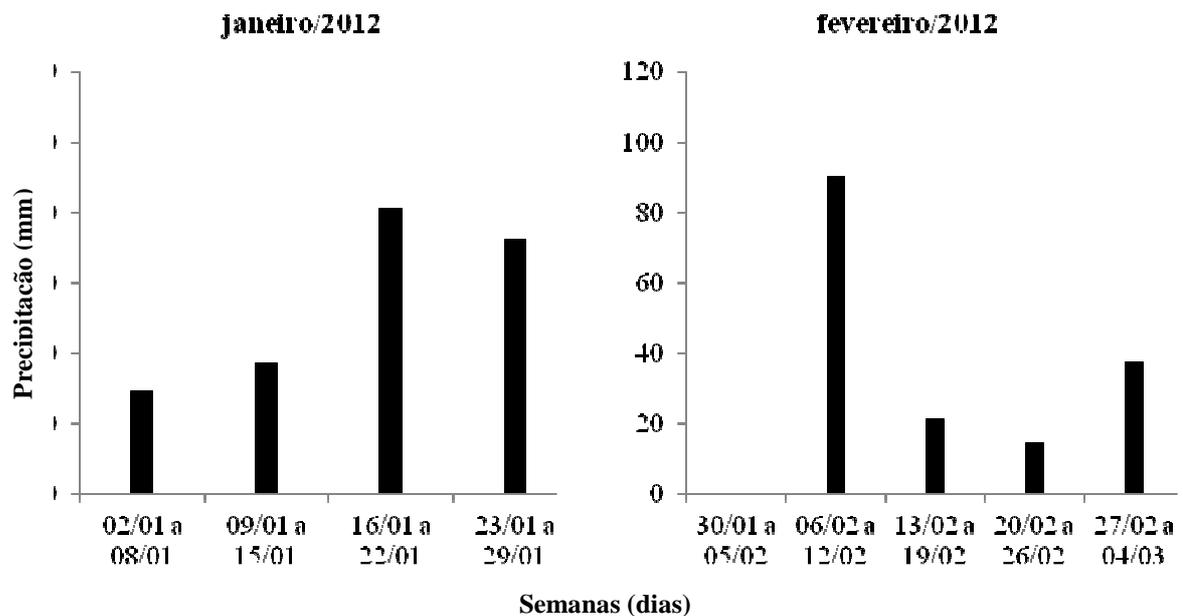


Figura 4 - Gráficos pluviométricos referentes aos meses em que foram realizadas as medições de RP e  $\theta$

O  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) no momento das medições de RP foi obtido diretamente no campo utilizando um sensor da Delta-T Devices (ML2x ThetoProbe), o qual detecta o teor de água volumétrico no solo através da medição de mudanças na constante dielétrica aparente deste (Figura 3). Tais mudanças são convertidas em tensão elétrica que, dentro do intervalo de leitura do aparelho, são proporcionais a umidade do solo. As medições foram realizadas nas profundidades de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2; e 0,2 a 0,3 m para possibilitar a verificação das correlações com os valores médios de RP obtidos para estas mesmas camadas.

### 2.2.3.2 Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade de Partícula ( $D_p$ ) e Porosidade Total do Solo (PT)

A  $D_s$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) foi determinada pelo método do anel volumétrico de acordo com Grossman e Reinsch (2002). As amostras para  $D_s$  foram coletadas próximas aos pontos onde foram realizadas as medições de RP. Foram coletados aleatoriamente 30 anéis volumétricos por parcela, sendo 10 para cada camada de solo. Cada anel tinha 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, tendo um volume médio de  $9,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ .

A  $D_p$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) foi obtida pelo método do picnômetro de gás hélio, (ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation<sup>®</sup>), onde as amostras de solo foram passadas em peneira com abertura de 2 mm e secas em estufa a 105 °C, até que o peso se mantivesse constante, para obtenção da Terra Fina Seca em Estufa (TFSE). Após isso, foram pesadas alíquotas de aproximadamente 7 g de solo em uma cápsula de metal, para posterior realização das leituras

no picnômetro. Para esta análise foi utilizado solo advindo da secagem das amostras utilizadas em análises granulométricas e de carbono orgânico.

A PT ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi calculada a partir da  $D_s$  e da  $D_p$  (média), indicando o valor relativo de espaços vazios do solo (equação 1).

$$PT = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (1)$$

### 2.2.3.3 Capacidade de Campo (CC)

A CC ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi determinada pelo método da mesa de tensão, colocando amostras indeformadas de solo, contidas em anéis volumétricos, em mesas com pó quartzo e ajustando, por meio de flautas, as amostras à tensão de água de 0,01 MPa. Foram utilizadas as mesmas amostras obtidas para determinação da  $D_s$ .

### 2.2.3.4 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica de partículas do solo foi determinada pelo método do densímetro, descrito em Grossman e Reinsch (2002). Para tal análise foi utilizado o solo advindo de amostras deformadas realizadas para cada camada de solo, em 7 entrelinhas de cada parcela experimental, totalizando 21 amostras por parcela e 63 amostras ao todo. As amostras foram secas ao ar e passadas em peneiras com abertura de 2 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), utilizando-se 40 g de solo de cada amostra para a análise.

### 2.2.3.4 Teor de carbono orgânico (C.org)

Os procedimentos de determinação de carbono orgânico (C.org) foram realizados pelo método Walkey-Black, descrito em Anderson e Ingram (1992). Foram utilizadas amostras deformadas advindas das profundidades de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2; e 0,2 a 0,3 m, secas ao ar e passadas em peneiras com abertura de 2 mm, também utilizadas para as análises granulométricas. O princípio desse método baseia-se na oxidação do carbono orgânico do solo com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico, utilizando como catalisador da oxirredução o calor desprendido na diluição do ácido sulfúrico, sendo realizada titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal.

Para cálculo de C.org ( $\text{g kg}^{-1}$ ) é considerado o volume ( $\text{cm}^{-3}$ ) utilizado na prova em branco (V1), o volume ( $\text{cm}^{-3}$ ) de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (V2)

e o peso (g) da amostra (P) (equações 2 e 3). O volume da prova em branco é usado para calcular o fator f (meq dicromato de potássio/meq sulfato ferroso amoniacal).

$$f = \frac{10 \times 1}{(V1 \times 0,5)} \quad (2)$$

$$C.org = \frac{(10 - V2 \times f \times 0,5 \times 0,4)}{P} \quad (3)$$

#### 2.2.4 Análise dos Resultados

A análise estatística descritiva e inferencial foi feita no programa R Project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) Para a comparação das médias de RP, obtidas pelo método manual e automatizado, foi realizado um teste *t* pareado, considerando o valor de  $\alpha \leq 5\%$ . Para a análise da influência de  $\theta$  sobre os valores de RP, foi utilizado o intervalo de confiança da média, com  $\alpha \leq 5\%$  (PAYTON et al., 2000), na comparação das médias de RP antes e após a modelagem correlacionando os valores de RP e  $\theta$  com a utilização de regressões não lineares. O modelo utilizado para correlação dos dados foi o proposto por Busscher et al. (1990) (Equação 4), que considera que a RP responde à mudança dos valores de  $\theta$  exponencialmente, onde *a* e *b* são parâmetros dependentes de outros atributos do solo (textura, estrutura, C.org, Ds).

$$RP = a\theta^b \quad (4)$$

### 2.3 Resultados e Discussão

#### 2.3.1 Variáveis Físicas que Influenciam a RP

A Ds (Tabela 2) não apresentou diferença estatística entre as parcelas estudadas (1CMan, 1CM e 3CM). Os valores encontrados podem ser considerados elevados para solos argilosos (média geral entre tratamentos de 1,49 Mg m<sup>-3</sup>). Reichert et al. (2003) citam que, para solos argilosos, valores de Ds limitantes ao crescimento radicular situam-se entre 1,30 e 1,40 Mg m<sup>-3</sup>. A influencia do manejo sobre a Ds é muito abordado na literatura, de modo que vários estudos demonstraram que com o aumento da mecanização ocorre um incremento dos valores da Ds (JORAJURIA; DRAGHI, 1997; YAVUSCAN, 2000; SHÄFER-LANDEFELD et al. 2004). E a correlação positiva da RP com a Ds é notoriamente conhecida e estudada a

décadas (MIRREH; KETCHESON, 1972; AYERS; PERUMPRAL, 1982; HENDERSON et al., 1988; BLANCO-SEPÚLVEDA, 2009). Observou-se que a dispersão da Ds dentro de cada parcela foi mínima (CV% < 5% na maioria dos casos), o que corrobora a afirmação de Warrick (1998) de que a Ds é um atributo que apresenta baixa variabilidade e um coeficiente de variação menor que 15%. Pode-se verificar que a camada superficial (0 a 0,1 m) apresentou os maiores valores de CV%, podendo ser explicado pelas mudanças devido ao manejo e pelo fato desta camada ser mais explorada pelo sistema radicular (IMHOFF et al., 2001). Os valores de Dp ficaram próximos a 2,70 Mg m<sup>-3</sup>, o que se aproxima dos valores médios mais frequentemente citados na literatura (2,65 Mg m<sup>-3</sup>), apresentaram baixíssima dispersão (CV% < 1%), confirmando a pequena variação desta propriedade do solo em uma área.

Tabela 2 - Estatística descritiva da densidade do solo (Ds) e densidade de partícula (Dp)

	Ds			Dp		
	-----Mg m <sup>-3</sup> -----					
	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM
0 a 0,1 m						
Max	1,54	1,51	1,54	2,68	2,68	2,71
Média	<b>1,39a</b>	<b>1,44a</b>	<b>1,45a</b>	<b>2,67b</b>	<b>2,68b</b>	<b>2,70a</b>
Mín	1,19	1,35	1,26	2,64	2,67	2,69
DP	0,14	0,05	0,08	0,02	0,01	0,01
CV%	9,83	3,53	5,62	0,61	0,24	0,25
0,1 a 0,2 m						
Max	1,64	1,59	1,62	2,69	2,69	2,70
Média	<b>1,54a</b>	<b>1,49a</b>	<b>1,53a</b>	<b>2,67b</b>	<b>2,68b</b>	<b>2,70a</b>
Mín	1,45	1,41	1,44	2,64	2,66	2,69
DP	0,06	0,07	0,06	0,02	0,01	0,00
CV%	4,07	4,46	3,77	0,78	0,34	0,17
0,2 a 0,3 m						
Max	1,56	1,58	1,64	2,69	2,69	2,70
Média	<b>1,52a</b>	<b>1,51a</b>	<b>1,54a</b>	<b>2,68b</b>	<b>2,68b</b>	<b>2,70a</b>
Mín	1,47	1,43	1,39	2,64	2,67	2,70
DP	0,03	0,06	0,08	0,02	0,01	0,00
CV%	2,17	3,98	4,91	0,64	0,25	0,06

Médias seguidas de mesma letra não possuem diferença significativa (p < 0,05) pelo teste t.

Como os tratamentos não apresentaram diferenças significativas nos valores de Ds, já se esperava que os valores de porosidade total (PT) seguissem a mesma premissa, como mostra a Tabela 3. Porém, observou-se que a capacidade de campo (CC) apresentou comportamento diferenciado, de modo que a ordem, do maior para o menor, foi 1CMan > 1CM = 3CM na

camada superior (Tabela 3). Pode-se inferir que os diferentes manejos influíram principalmente sobre a meso e microporosidade do solo, havendo diminuição da CC no manejo onde houve maior passagem de máquinas. Isso se deve ao fato de a CC depender principalmente dos poros de menor diâmetro, pois desconsidera a água gravitacional que é rapidamente drenada, e a mudança em seus valores reflete numa diferenciação do espaço poroso responsável pela retenção de água, logo, sua meso e microporosidade. A elevada mecanização em todas as etapas do ciclo da cultura da cana-de-açúcar contribui para que, mesmo no manejo de corte manual, os valores de  $D_s$  sejam elevados, o que corrobora os valores elevados citados na Tabela 2, independente do manejo de colheita. Quando os valores de densidade do solo são semelhantes e a macroestrutura não se diferencia, as mudanças relativas à CC podem ser devido às distinções na microestrutura do solo estudado, o que acarreta na modificação de sua porosidade textural. Portanto, é possível afirmar que o aumento da mecanização nestas áreas pouco influenciou a macroestrutura do solo, no entanto, alguns microporos possam ter se transformado em poros bloqueados, o que contribuiu para a diminuição da retenção de água nos manejos com maior mecanização.

Solos saturados podem conter poros preenchidos com ar, chamados poros bloqueados e quantificados pela diferença entre a  $P_T$  e a  $\theta$  no potencial mátrico na saturação (BERNADIER et al., 1991). Estes poros são ocasionados pela aproximação entre as partículas de solo, aumentando as superfícies de contato e impedindo que a água entre nestes. Silva e Cabeda (2006), através de análises micromorfológicas, verificaram que em áreas cultivadas com cana-de-açúcar há um rearranjo das partículas devido à compactação, aumentando os pontos de contato na matriz do solo, fato que comprova a possível formação de poros bloqueados devido ao manejo da cana-de-açúcar, explicando as diferenças nos valores de CC.

Este aumento entre pontos de contato podem ocasionar diferenças nos valores de RP, mesmo com as parcelas apresentando valores semelhantes de  $D_s$ . A entrada da haste do penetrômetro no solo é facilitada quando esta encontra um poro, diminuindo as forças de atrito entre esta e o solo, o que contribui para uma diminuição nos valores de RP. Quando o solo se encontra num estado de maior coesão, onde suas partículas estão mais intimamente conectadas, ou seja, com maior número de pontos de contato entre suas partículas, diminui as chances da haste encontrar poros que permitam sua passagem facilitada, portanto os valores da RP tendem a aumentar.

Tabela 3 - Estatística descritiva da porosidade total do solo (PT) e da capacidade de campo (CC)

	PT			CC		
	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM
-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----						
-----						
	1CM	1CMan	3CM	1CM	1CMan	3CM
0,0 a 0,1 m						
Max	0,55	0,50	0,53	0,34	0,35	0,34
Média	<b>0,48a</b>	<b>0,46a</b>	<b>0,46a</b>	<b>0,31b</b>	<b>0,34a</b>	<b>0,32b</b>
Mín	0,42	0,44	0,43	0,27	0,32	0,28
DP	0,05	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02
CV%	10,70	4,10	6,53	8,31	2,47	6,3
0,1 a 0,2 m						
Max	0,46	0,47	0,47	0,37	0,37	0,37
Média	<b>0,42a</b>	<b>0,44a</b>	<b>0,43a</b>	<b>0,34ab</b>	<b>0,35a</b>	<b>0,34b</b>
Mín	0,39	0,41	0,40	0,32	0,33	0,32
DP	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
CV%	5,53	5,61	4,94	3,77	3,25	3,77
0,2 a 0,3 m						
Max	0,45	0,47	0,48	0,38	0,4	0,38
Média	<b>0,43a</b>	<b>0,44a</b>	<b>0,43a</b>	<b>0,36a</b>	<b>0,37a</b>	<b>0,33b</b>
Mín	0,42	0,41	0,39	0,32	0,33	0,29
DP	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03
CV%	2,85	5,12	6,48	6,11	4,43	9,94

Médias seguidas de mesma letra não possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste t.

Ao analisar os atributos  $D_s$ ,  $D_p$ , e PT foi possível verificar que as três parcelas se apresentavam uniformes e que as principais variáveis que influenciam as medições de RP (granulometria,  $C_{org}$  e  $D_s$ ) não apresentaram diferenças significativas a ponto de influêrem sobre os resultados, de modo que pode-se inferir que qualquer diferença encontrada para a RP seja dependente principalmente dos atributos hídricos dependentes do manejo, que pode ser expresso pelos diferentes valores de CC apresentados nas três parcelas estudadas. Portanto foi analisada a influência de  $\theta$  sobre a medição da RP, para que a hipótese sobre a importância da dependência entre tais variáveis fosse elucidada.

## 2.3.2 Correlação entre RP e $\theta$

### 2.3.2.1 Dados de RP sem ajuste para o $\theta$

As medições de RP nas três parcelas foram realizadas em uma amplitude média do  $\theta$  de  $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com medições desde  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  até  $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Ao realizar a comparação da RP, desconsiderando a influência do  $\theta$ , utilizando-se o intervalo de confiança da média, observou-se resultados contrastantes, de modo que tanto para medições realizadas de modo “Manual” como Automático (“Auto”), a parcela com mecanização intermediária (1CM) apresentou menor valor de RP nas três camadas (0 a 0,3 m) (Figura 5). Esta parcela foi a que apresentou maior quantidade de resíduos vegetais cobrindo as entrelinhas. Souza et al. (2005) verificaram que no sistema de cana crua com e sem incorporação da palhada a retenção de água é maior, possivelmente devido a barreira que os resíduos formam na superfície dificultando a saída de água, diminuindo a evapotranspiração local do solo (OLIVEIRA et al., 2010) e protegendo o solo dos raios luminosos, o que diminuí a sua temperatura (BORTOLUZZI; ELTZ, 2000). Como os valores de RP tendem a diminuir com o incremento do  $\theta$  (PERUMPRAL, 1987), o fato de um sistema contribuir para uma manutenção do  $\theta$  por um maior período pode ter contribuído para que a parcela 1CM obtive-se o menor valor médio de RP.

Nas camadas mais superficiais não houve diferença significativa entre as parcelas 3CM e 1CMan. Resultado semelhante foi verificado por Koch et al. (2008) estudando o efeito acumulativo das passagens de maquinário pesado, os quais observaram que na camada superficial (0,01 a 0,05 m) não havia diferenças entre as medições realizadas dentro e fora da região do rodado, porém, com o aumento da profundidade (0,18 a 0,35 m), em ambos os tratamentos de seu experimento, os valores de RP foram até três vezes mais elevados na região do rodado.

Ao utilizar a média geral das medições, as diferenças entre o método Manual e Auto foram distinguíveis apenas em profundidade. Na penetrometria, a intenção de se utilizar um cone com diâmetro maior que o da haste é de diminuir o máximo possível o atrito entre esta e o solo. Alguns pesquisadores já trabalharam com alternativas para tentar diminuir a influência deste atrito utilizando transdutores de força acoplado ao cone e reportaram diminuição de 40% nos resultados das medições comparados ao método usual (ARMBRUSTER et al., 1990; BARONE; FAUGNO, 1996). Com o incremento da profundidade a probabilidade de ocorrer um aumento do contato entre a haste e o solo pode explicar a diferenciação entre os resultados obtidos por cada método.

Nas camadas superficiais, caso o operador no método Manual tenha experiência, é possível atravessar uma pequena camada de solo com velocidade e ângulo (entre a haste e o solo) quase constante. Porém, conforme se aumenta a profundidade, o controle do equipamento é muito menor se comparado ao método Auto, de maneira que neste segundo há uma maior homogeneidade de tais variáveis (velocidade e ângulo de inserção da haste). Isso pode explicar o fato de as medições não terem apresentado diferenças significativas na superfície e com o aumento da profundidade tenha ocorrido uma diferença maior entre os métodos.

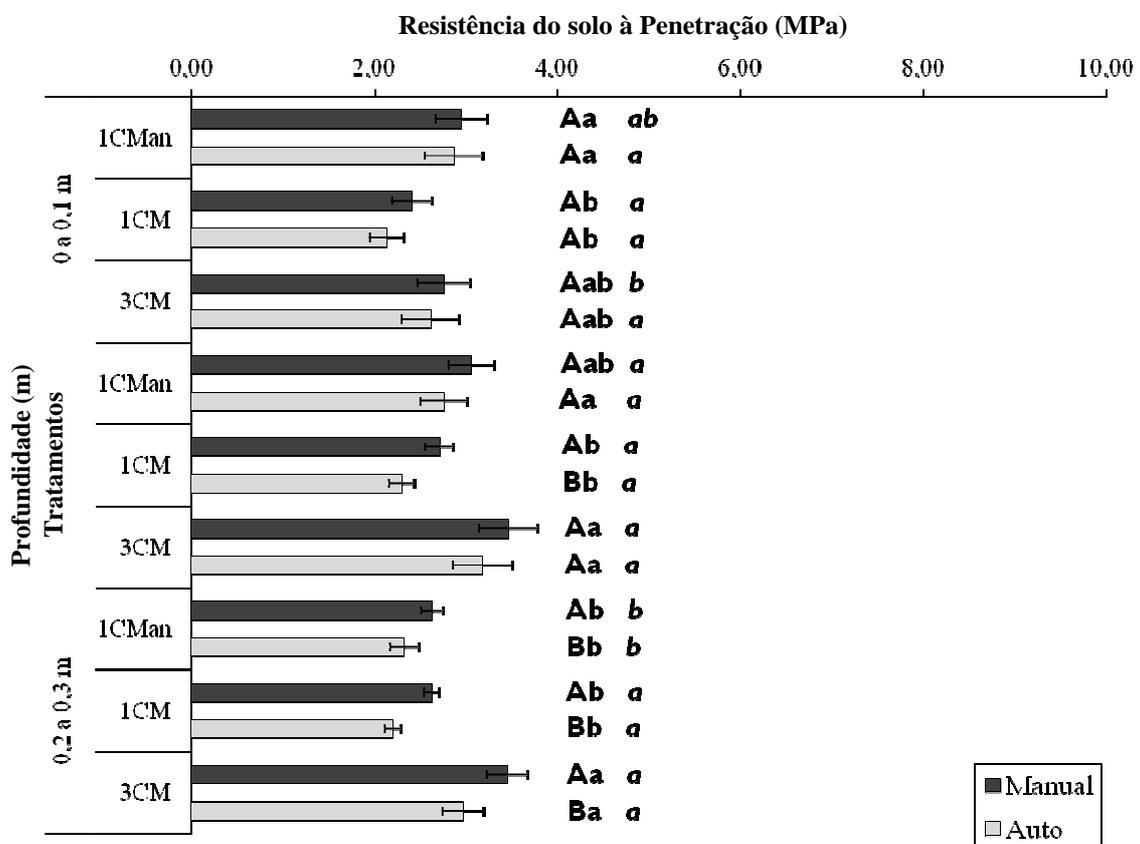


Figura 5 - Comparação dos dados de resistência a penetração (RP), sem correção para teor de água no solo ( $\theta$ ), para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM, em diferentes profundidades medidos por meio do método manual e automatizado (auto) utilizando o intervalo de confiança da média. Barras seguidas de letras maiúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o método de medição (manual e auto) realizado na mesma área e mesma profundidade; barras seguidas de letras minúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos na mesma profundidade e realizados pelo mesmo método; barras seguidas de mesma letra minúscula em itálico não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as profundidades par um mesmo tratamento e método de medição

Considerando que durante a coleta dos dados a amplitude dos valores do  $\theta$  foi muito alta, foi realizada outra comparação das médias de RP com um número menor de repetições, separadas por dia de coleta, até o sétimo dia, após o qual a secagem da área cessou devido à

ocorrência de eventos chuvosos. Observando os dados gerados para cada dia com a média de 13 pontos de RP por área, verificou-se que mesmo com a diminuição da dispersão dos dados de umidade, a diferenciação das três parcelas não seguiu um padrão para todas as camadas (Figura 6).

No primeiro dia a diferenciação das três parcelas é notável apenas nas camadas mais profundas (0,1 a 0,3 m) e mesmo assim na segunda camada (0,1 a 0,2 m) não houve diferença entre os tratamentos 1CM e 3CM. A premissa estipulada por este trabalho, de que os valores de RP seguem a ordem decrescente de  $3CM > 1CM > 1CMan$ , nem sempre se manteve. Embora não tenham sido considerados os valores do  $\theta$ , sabe-se que a primeira coleta foi realizada um dia após um evento chuvoso (Figura 4), o que reflete num solo próximo a saturação, que pode ser comprovado pelos valores pontuais de  $\theta$  para este dia (ANEXO A) quando comparado com os valores da PT contidos na Tabela 3. Como na saturação as três parcelas apresentam uma uniformidade nos valores do  $\theta$ , este deixa de interferir nos resultados de RP, que fica dependente apenas dos atributos que podem ser influenciados pelo manejo do solo ( $D_s$ , PT e distribuição do tamanho de poros). Busscher et al. (1997) citam que um dos principais fatores que dificultavam encontrar uma boa correlação entre RP e  $\theta$  era a desconsideração dos diferentes manejos, que mesmo com valores de  $\theta$  iguais podem apresentar valores de RP diferentes. Por isso alguns trabalhos citam a importância de se realizar as medições de RP próximo a CC, onde há maior correlação entre  $D_s$ , RP e crescimento de raízes (HENDERSON, 1989), devido a uma uniformização do  $\theta$ . Portanto, nesta primeira coleta foi possível verificar uma diferença clara e significativa entre os níveis de compactação em camadas mais profundas de cada manejo (0,2 a 0,3m), onde os valores de RP seguiram a ordem  $3CM > 1CM > 1CMan$ .

A partir do segundo dia, quando começou a ocorrer uma secagem gradual em cada área os valores de RP se elevaram, ocorrendo uma inversão nos valores apresentados por cada camada, de modo que a camada superficial tendeu a apresentar valores mais elevados que as camadas subsuperficiais, chegando a valores muito altos no sétimo dia. Porém conforme esse processo de secagem ocorreu, houve uma inversão no comportamento das parcelas. Enquanto no primeiro dia os valores da parcela 1CM eram os mais altos na camada superficial e o segundo maior na camada subsuperficial, com o passar do tempo ocorre uma igualação de valores (do segundo até o quarto dia), seguido de um aumento mais expressivo nas parcelas 1CMan e 3CM, se tornando significativamente maior no sexto e sétimo dia.

Assim como na situação contendo a média de geral de 182 pontos, isso pode ser explicado pelo fato de que o tempo de secagem foi diferente para cada parcela, de modo que nas parcelas onde foi realizada a colheita mecanizada, devido a maior quantidade de palhada, a umidade era mantida por um maior período. A parcela 1CM foi a que apresentou maiores quantidades e maior uniformidade na cobertura de palhada na entrelinha (não quantificado, mas observado no campo). Isso contribuiu para uma menor taxa de secagem nessa parcela quando comparada as outras (ANEXO A). A área que secou mais rapidamente foi a 1CMan, devido a quase ausência de cobertura na entrelinha. A parcela 3CM, embora tivesse um conteúdo de palhada intermediário entre 1CM e 1CMan, devido ao maior aporte de maquinário, foi a que apresentou um aumento mais intensificado nos valores de RP com a secagem do solo. Isso pode ser verificado nas coletas realizadas na primeira semana de fevereiro, quando houve um pequeno veranico, com grande intensidade luminosa, caracterizada pelo alto valor de temperatura média semanal (ANEXO B) e pela secagem rápida nas parcelas 3CM e 1CMan num curto espaço de tempo.

Outro fator importante, que interfere nos resultados obtidos na superfície e na subsuperfície é a relação entre compactação, pressão na superfície e peso do trator. Smith e Dickson (1990) destacaram que na superfície a compactação depende da pressão do rodado, enquanto que a compactação de camadas inferiores é regida pelo peso sobre o rodado, de modo que estes autores concluíram que para diminuir a compactação de camadas mais profundas deve-se atentar para construção de maquinários mais leves. No entanto, Jorajuria e Draghi (1997) verificaram que a intensidade de tráfego também interfere na resposta a compactação e que um trator leve, em várias passagens, pode causar tanto ou mais dano que um trator pesado com poucas passagens. Portanto, considerando que em todas as parcelas existia a utilização de maquinário durante todo o ciclo, e que após sofrer um estresse o solo se torna mais resistente a uma mudança na sua estrutura, é de se esperar que a resposta à compactação na superfície fosse semelhante para as três, enquanto que na parcela onde foi utilizado um maquinário mais pesado (e.g. colhedora da cana) por mais vezes, a compactação das subcamadas de solo fosse mais expressiva.

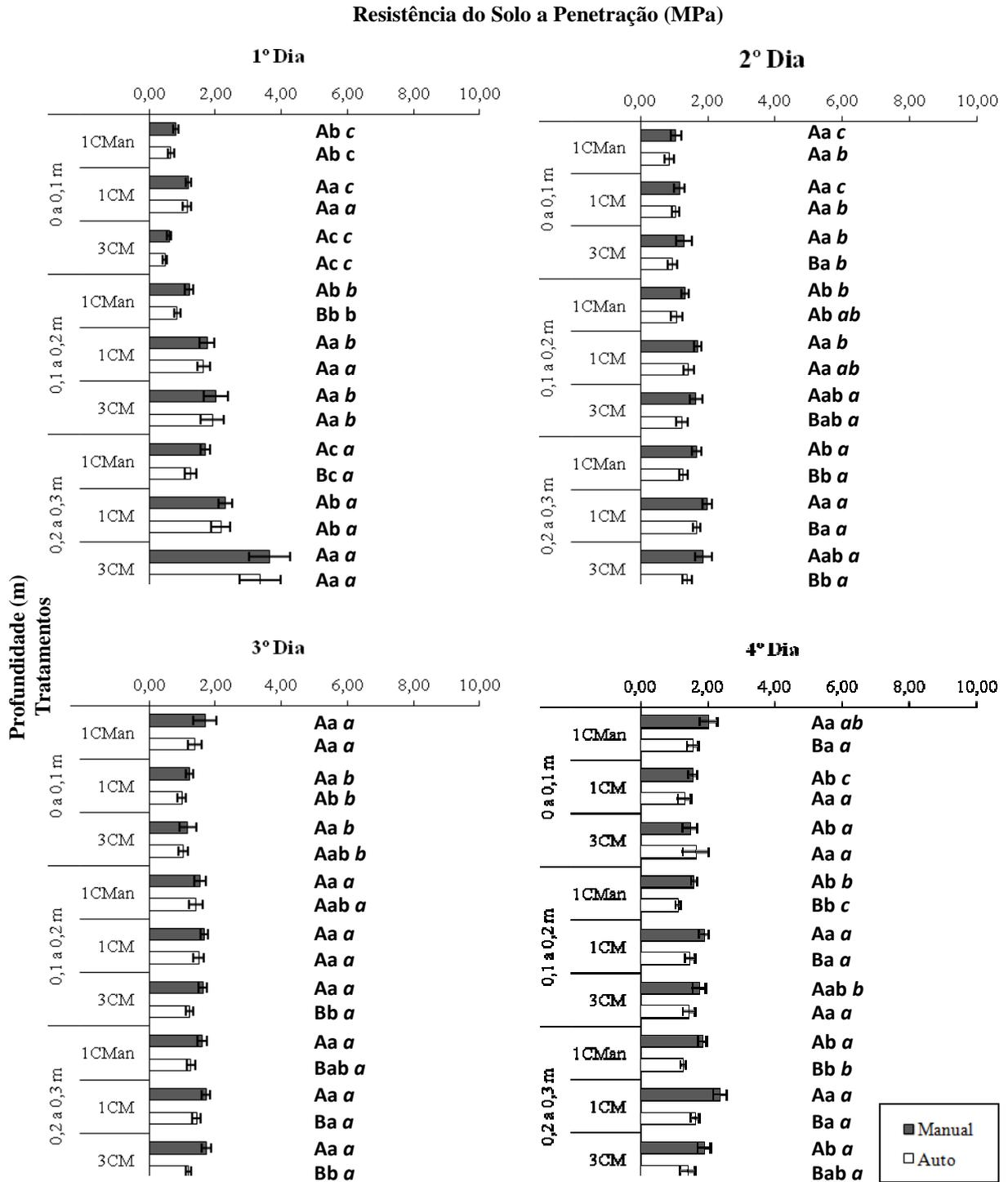


Figura 6 - Comparação dos dados de resistência a penetração (RP) obtidos pelos métodos manual e automático (auto) em diferentes dias de coleta, sem correção do teor de água do solo ( $\theta$ ), para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, utilizando o intervalo de confiança da média. Barras seguidas de letras maiúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o método de medição (manual e auto) realizado na mesma área e mesma profundidade; barras seguidas de letras minúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos na mesma profundidade e realizados pelo mesmo método; barras seguidas de mesma letra minúscula em *itálico* não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as profundidades para um mesmo tratamento e método de medição

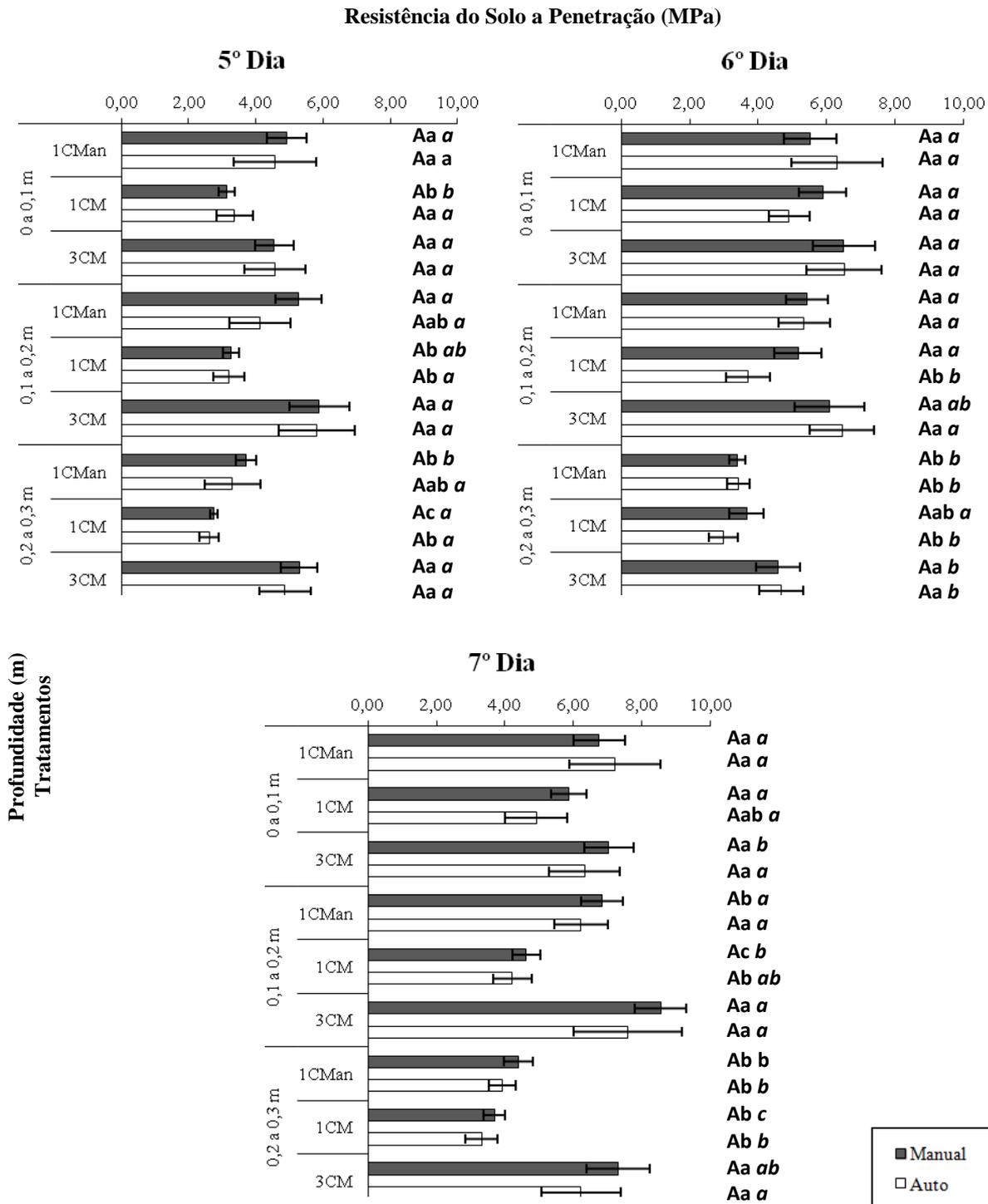


Figura 6 - Comparação dos dados de resistência a penetração (RP) obtidos pelos métodos manual e automático (auto) em diferentes dias de coleta, sem correção do teor de água do solo ( $\theta$ ), para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, utilizando o intervalo de confiança da média. Barras seguidas de letras maiúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o método de medição (manual e auto) realizado na mesma área e mesma profundidade; barras seguidas de letras minúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos na mesma profundidade e realizados pelo mesmo método; barras seguidas de mesma letra minúscula em *itálico* não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as profundidades para um mesmo tratamento e método de medição

Portanto, é observável a importância da informação que os valores do  $\theta$  podem trazer na interpretação dos resultados e, quando desconsiderados, podem acarretar em análises errôneas dos diferentes manejos. Logo, como os dados de RP não apresentaram resultados coerentes com a hipótese sugerida por este trabalho ao serem analisados desconsiderando a influência da umidade, foi realizada uma modelagem com tais dados, através de regressões não lineares para expressar a correlação entre RP e  $\theta$ .

### 2.3.2.2 Dados de RP com ajuste para o $\theta$

A maioria dos ajustes apresentou valores de  $R^2$  elevados e significativos e os valores de intercepto e coeficiente exponencial também apresentaram alta significância ( $p < 0,001$ ) (Figuras 7 e 8).

A alta significância dos coeficientes pode ser explicada pelo número elevado de pontos (182) utilizados para cada regressão. Os valores de  $R^2$  próximos a 0,50 foram considerados satisfatórios, considerando que todas as medições foram realizadas *in situ*. Na medição realizada *in situ* o erro embutido em cada medição é aumentado se comparado a análises realizadas *ex situ*. Além do controle de outras variáveis ser difícil, principalmente a variável espacial, de modo que nunca duas medições poderão ser realizadas exatamente no mesmo local, os próprios erros embutidos nos equipamentos utilizados diretamente no campo contribuem para que os métodos aplicados diretamente neste tenham uma acurácia menor. Por isso existe a necessidade de elevar o número de amostragens para que haja uma diminuição desse resíduo. Busscher et al. (1997) obtiveram valores de  $R^2$  mais elevados ( $0,74 \leq R^2 \leq 0,92$ ) utilizando a mesma equação de ajuste. Porém, estes autores, além de estudarem um solo com gradiente textural (com presença de horizonte E e Bt), desconsideraram a camada superficial do solo (0,25 m), o que pode ter dado maior uniformidade as medições realizadas.

Esperava-se que o método Auto, por apresentar uma uniformização da velocidade de obtenção dos dados, apresentasse uma menor dispersão dos dados, o que contribuiria para uma melhoria nos valores de  $R^2$ , porém tal fato não foi observado. Os valores de  $R^2$  variaram para os dois métodos, porém sem apresentar uma sequência lógica nesta variação. Mas, observou-se que, com o aumento da profundidade, embora as parcelas 1CMan e 3CM não apresentassem tal comportamento, houve uma diminuição nos valores de  $R^2$  da parcela 1CM. Isso pode ser explicado pela diminuição da amplitude do  $\theta$ , conforme o aumento da profundidade, para esta parcela. Tal fato se deve a menor secagem desta área, se comparada às outras, tendo por razão a ação da palhada, não possibilitando que as medições para esta

parcela apresentasse o típico comportamento curvo, representativa do modelo potencial utilizado.

As curvas de RP se apresentaram graficamente diferenciadas para cada manejo, ficando isto visível nas camadas mais profundas, onde a existência de uma camada mais compactada é mais evidenciada. Na camada superficial (0 a 0,1 m) é difícil distinguir as três parcelas utilizando as curvas de RP. Porém, com o aprofundamento do perfil do solo, se torna fácil distinguir as três áreas, verificando-se que os valores de RP observados pelas curvas se mostram na ordem decrescente  $3CM > 1CMan > 1CM$  na parte mais seca da curva (entre  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), e na parte úmida ocorre uma inversão, sendo que a ordem decrescente se rearranja para  $1CM > 3CM > 1CMan$ . Este comportamento pôde ser observado tanto para o modo Manual (Figura 7) como para o modo Automático (Figura 8).

Os baixos valores de  $R^2$  encontrados para a parcela 1CM, embora significativos, demonstram que a representatividade do modelo frente o comportamento dos dados é muito baixa, impossibilitando que esta parcela seja comparada com as demais com mesmo grau de exatidão, possibilitando que inferências incorretas possam ser geradas com base no comportamento de tal curva. Ao observar as diferenças entre as parcelas 1CMan e 3CM inferências podem ser tomadas com maior rigor científico, de maneira que, além dos valores de  $R^2$  estarem mais próximos, é verificado que o comportamento dos dados de RP seguem uma tendência exponencial nos dois casos, permitindo que comparações possam ser feitas.

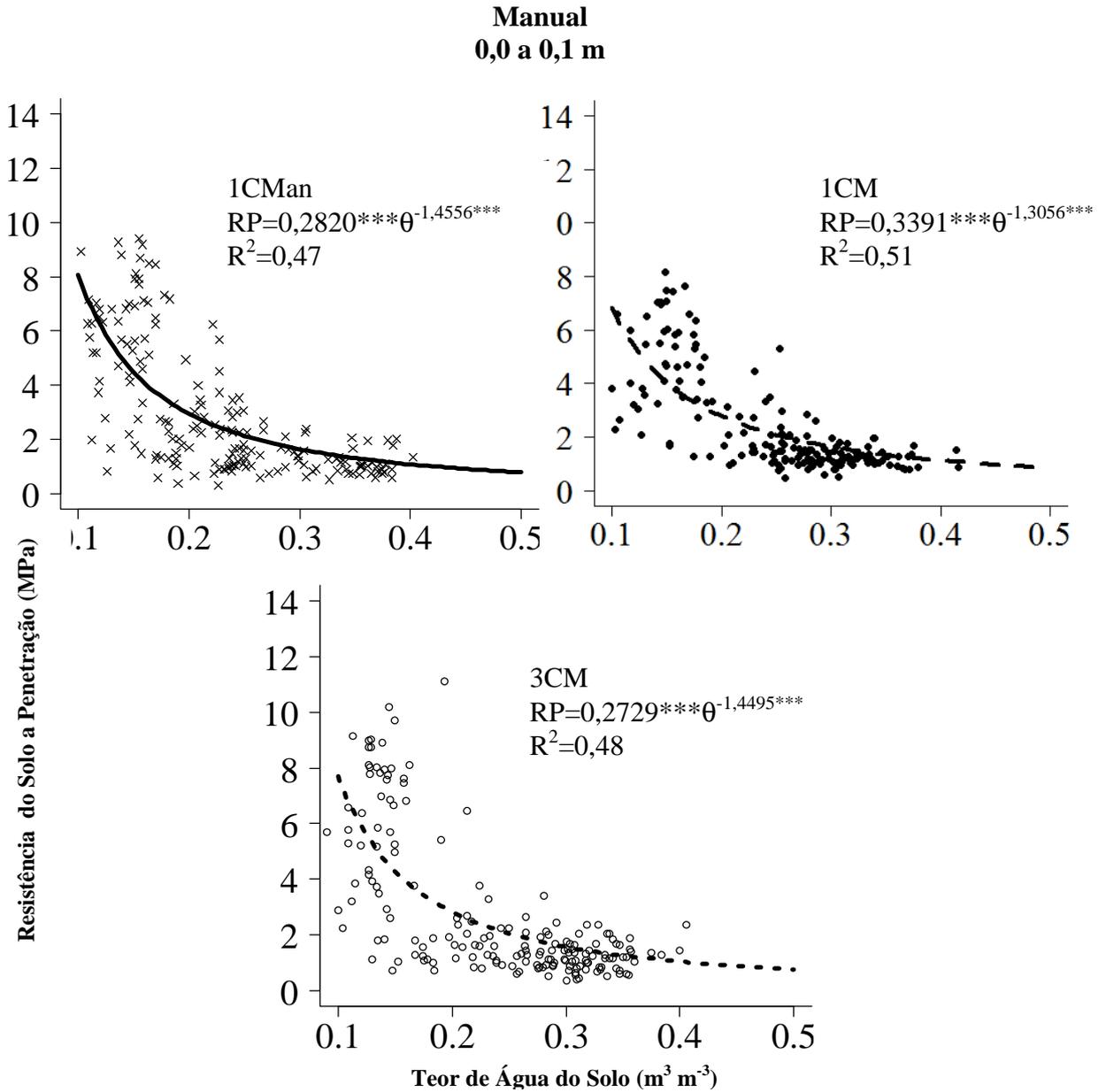


Figura 7 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades com dados de RP obtidos pelo método manual. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

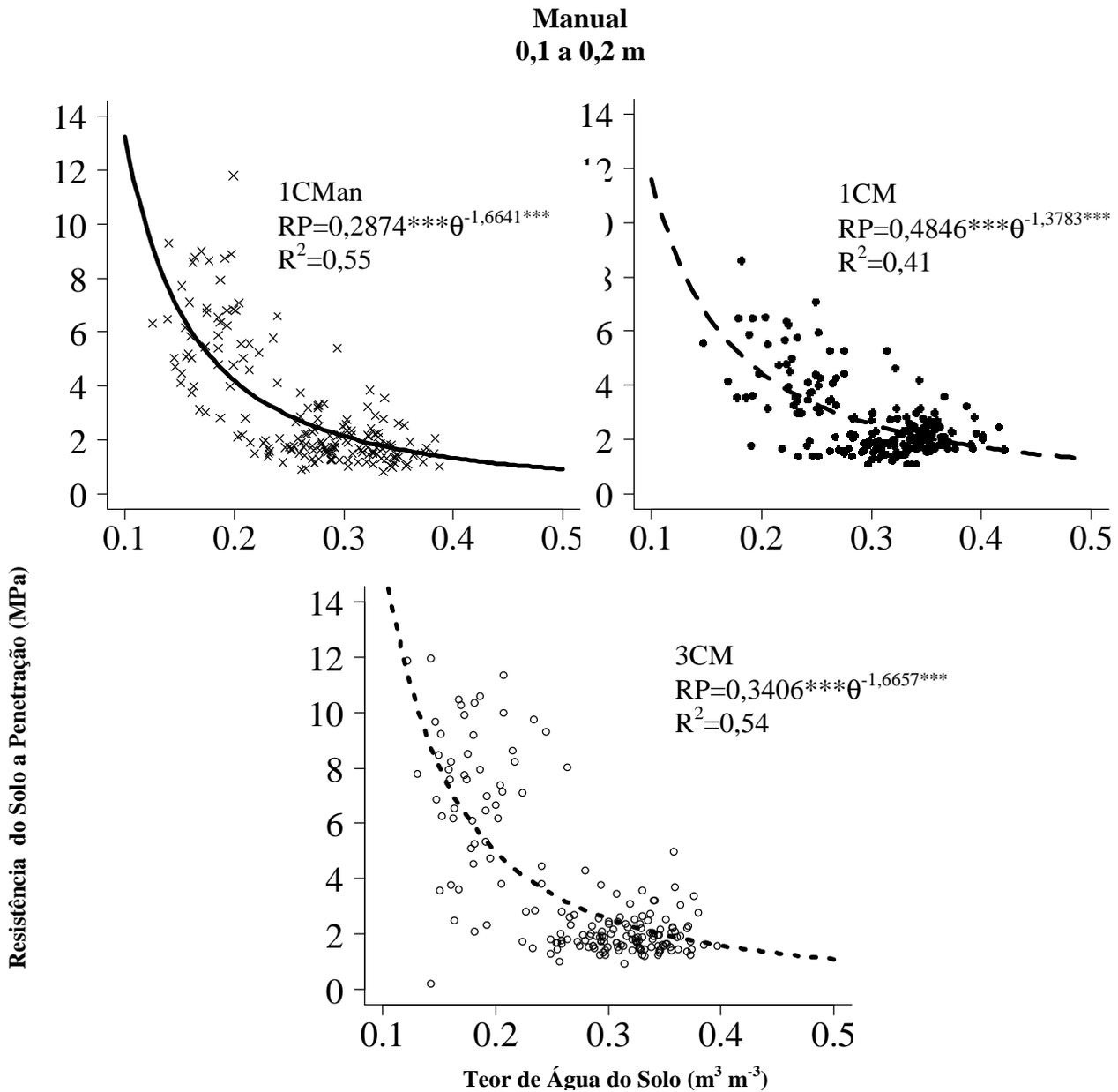


Figura 7 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades com dados de RP obtidos pelo método manual. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

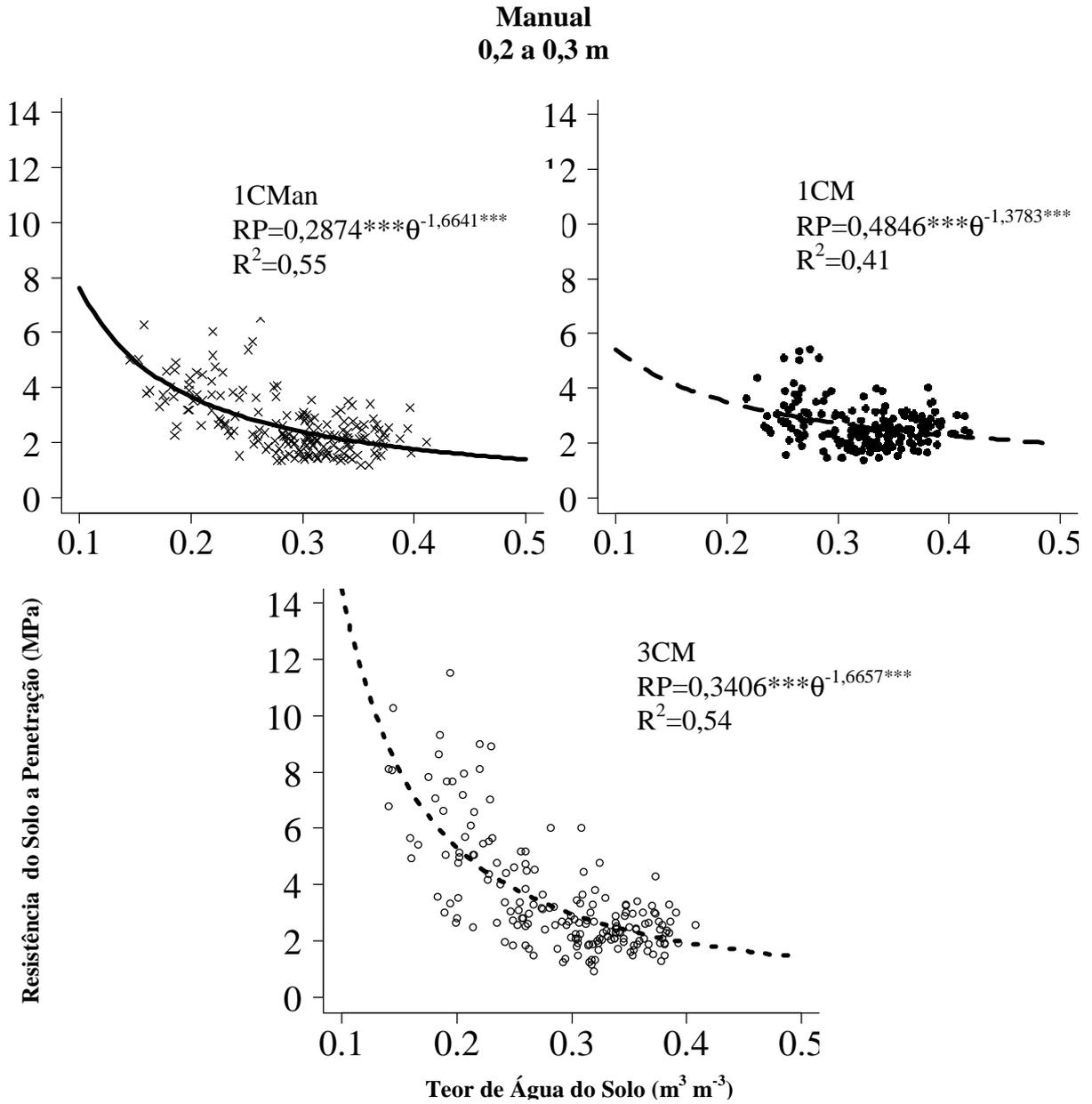


Figura 7 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades com dados de RP obtidos pelo método manual. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

## Curvas dos três tratamentos

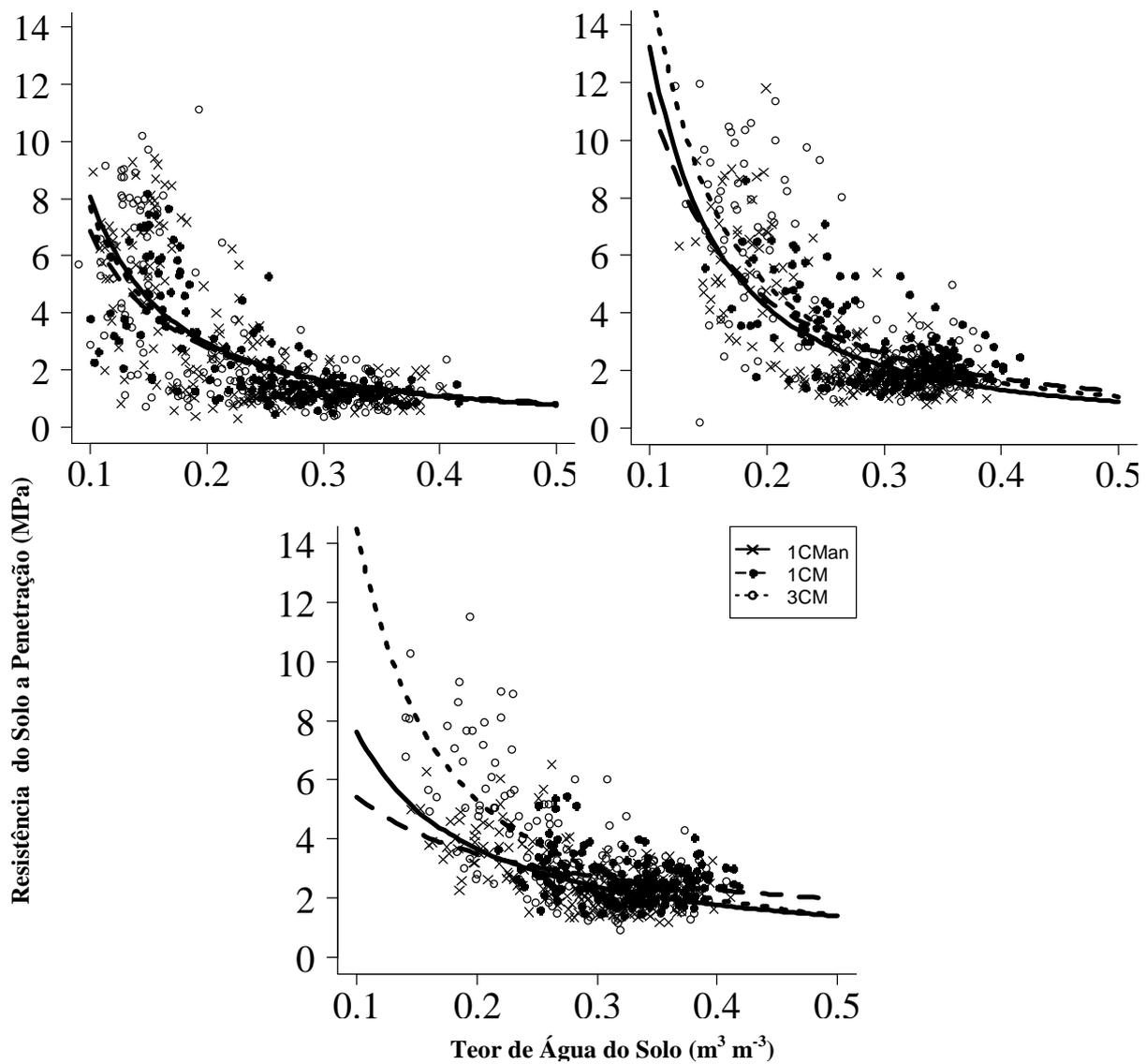


Figura 7 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades com dados de RP obtidos pelo método manual. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

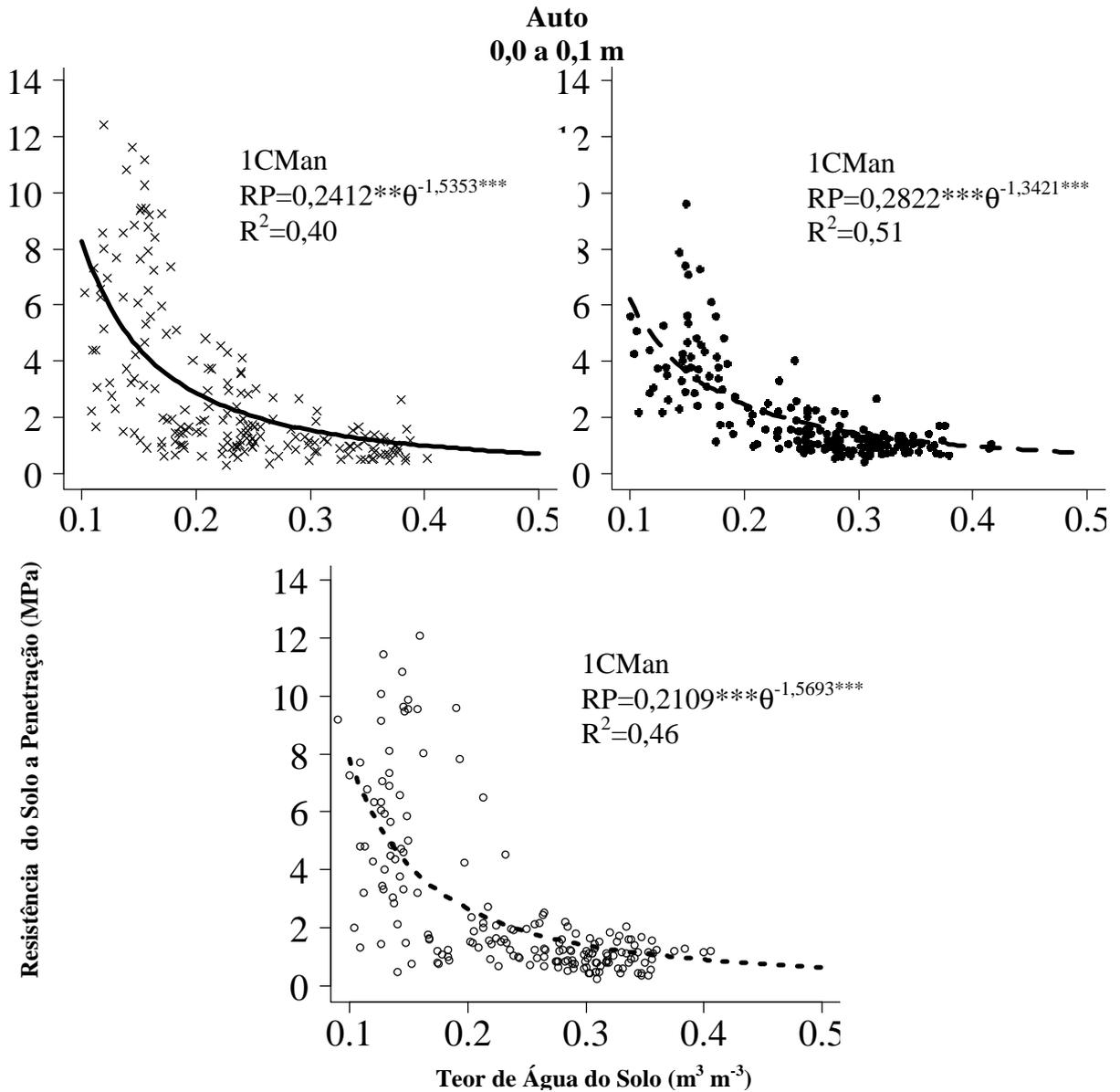


Figura 8 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, com dados de RP obtidos pelo método automático. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

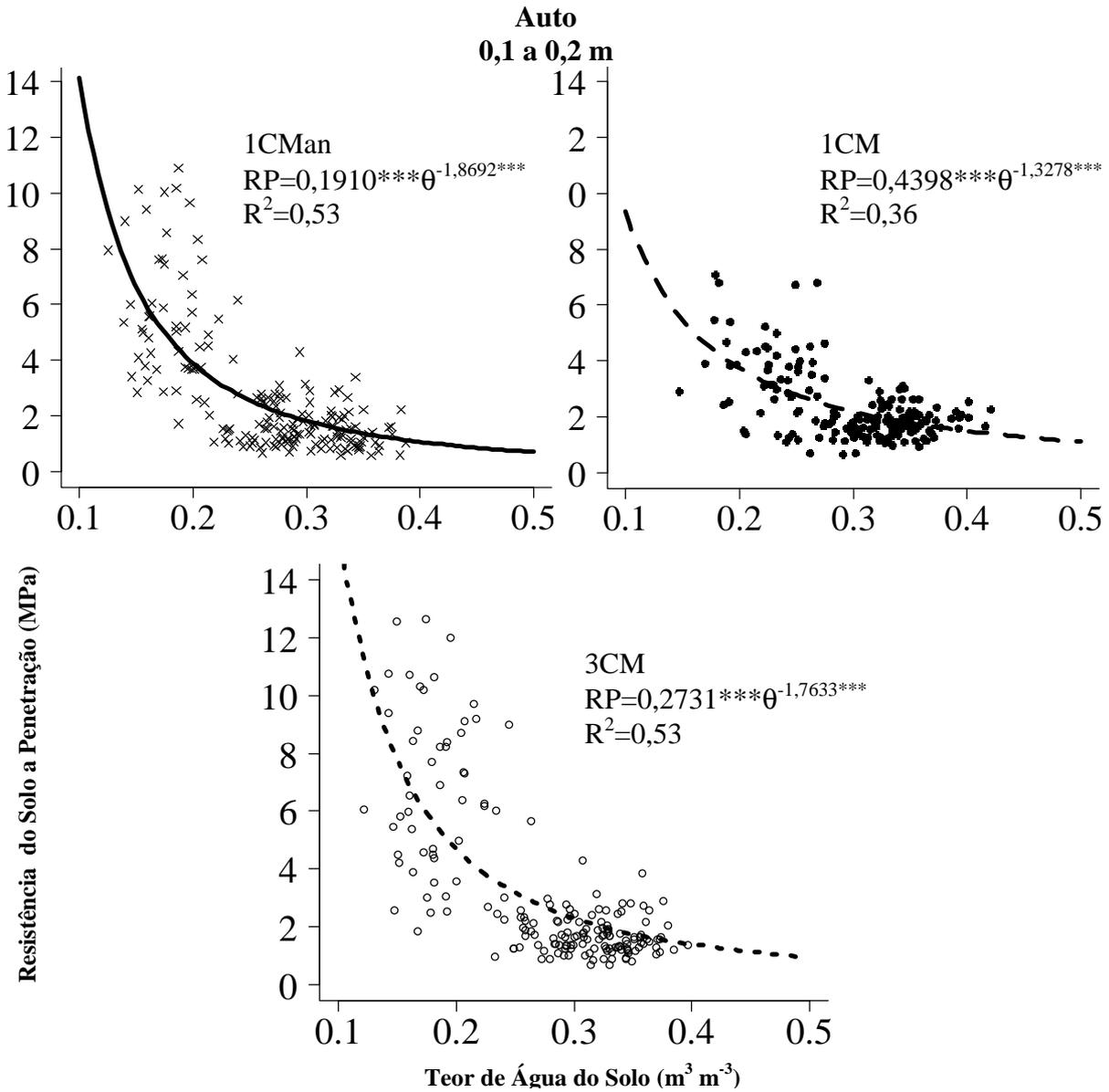


Figura 8 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, com dados de RP obtidos pelo método automático. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

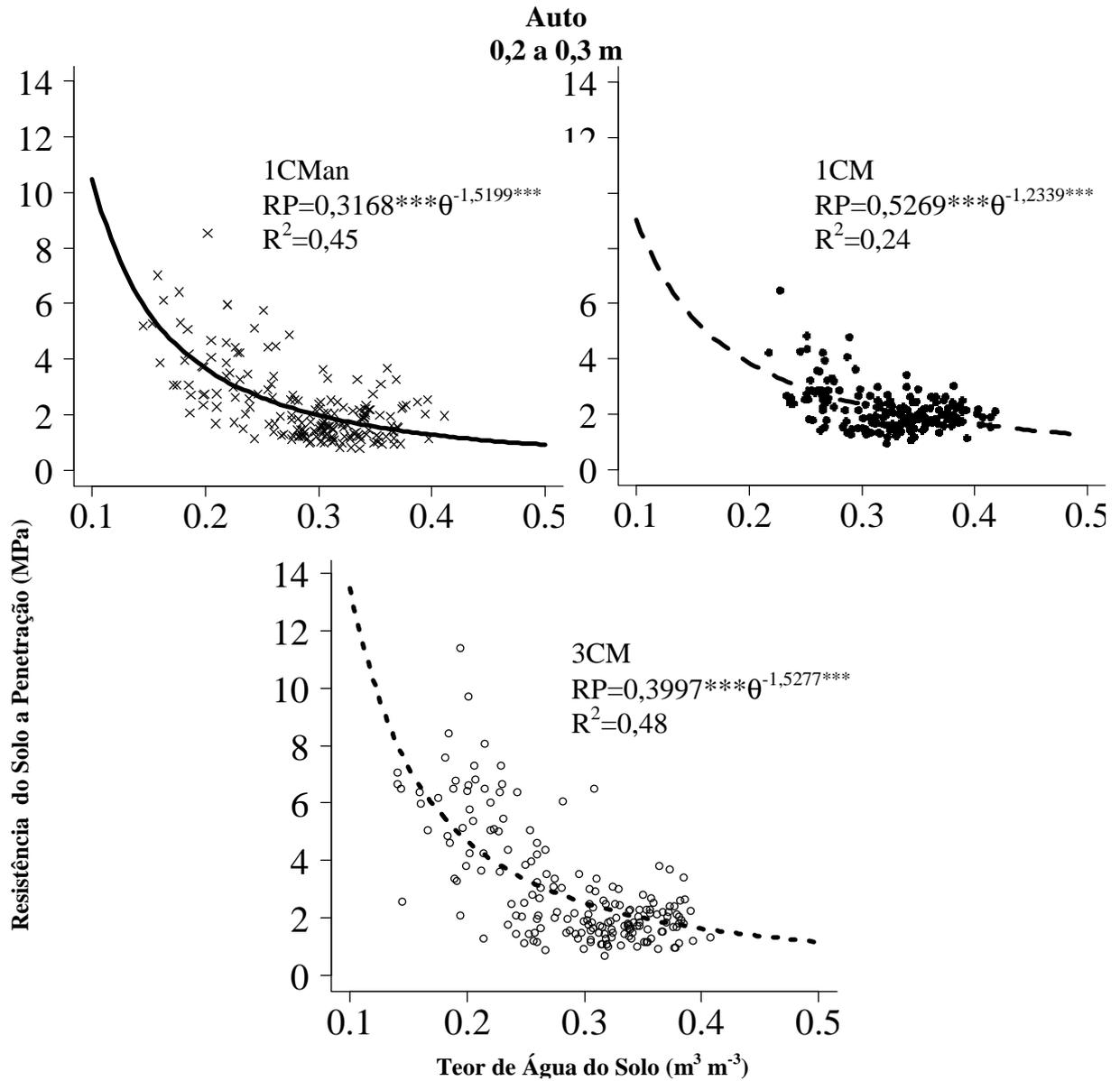


Figura 8 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, com dados de RP obtidos pelo método automático. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

## Curvas dos três tratamentos

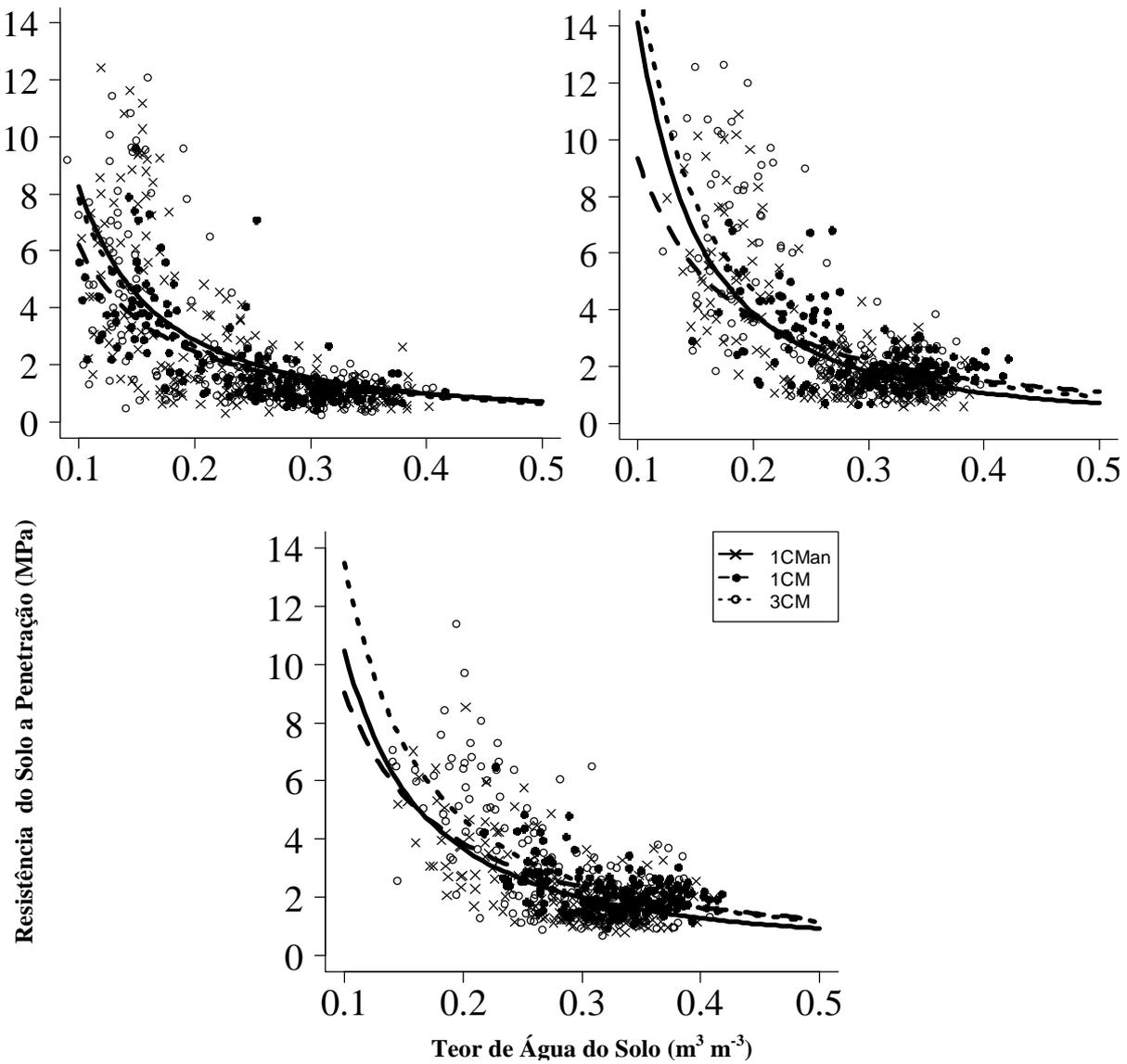


Figura 8 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades, com dados de RP obtidos pelo método automático. Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

Ao analisar a diferença entre os parâmetros  $a$  e  $b$  dos ajustes obtidos para os três tratamentos em todas as profundidades (Figura 9), verificou-se que no método “Manual” apenas a camada de 0,2 a 0,3 m dos tratamentos 1CMan e 1CM apresentaram coeficientes estatisticamente diferentes. O mesmo não ocorreu para o método “Auto”, onde todos os coeficientes não diferenciaram significativamente. Como a maioria dos tratamentos não apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre tais parâmetros, foi realizado um ajuste para todos os tratamentos desconsiderando o efeito da profundidade, numa tentativa de retirar as tendências e uniformizar os resultados das três parcelas, permitindo a comparação entre as três (Figura 10).

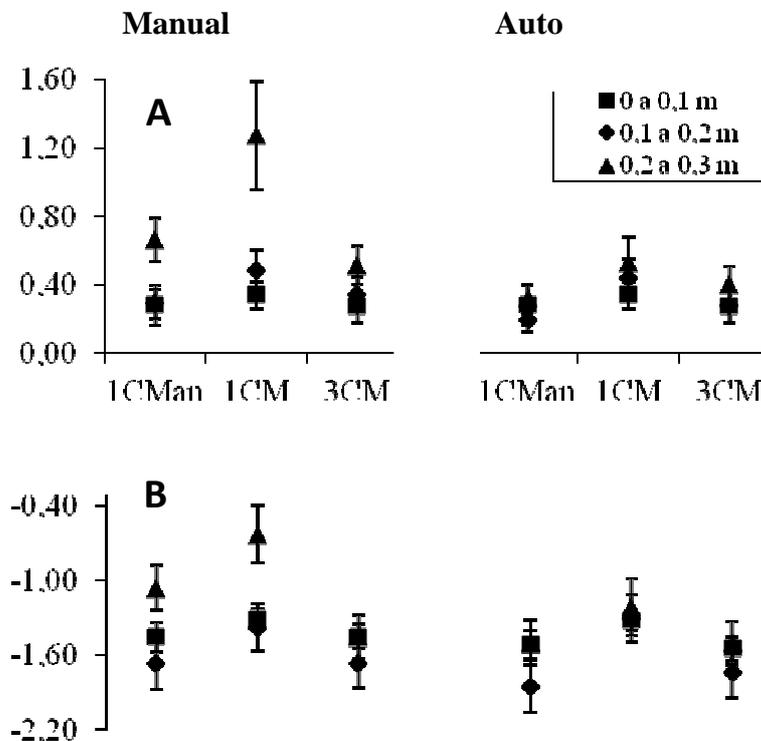


Figura 9 - Gráfico para comparação dos parâmetros  $a$  (A) e  $b$  (B) calculados por regressão não linear pelo modelo potencial (equação 4), que correlaciona a resistência a penetração (RP) com o teor de água no solo ( $\theta$ ), por meio do intervalo de confiança da média ( $p < 0,05$ )

Ao agrupar todos os valores de RP da camada de 0 a 0,3 m foi possível obter uma relação entre RP e  $\theta$  que representasse toda a camada estudada (Figura 10). Embora a regressão apresente-se valores mais baixos de  $R^2$ , verificou-se o mesmo comportamento para as curvas dos diferentes tratamentos, de modo que a junção de todos os dados diminuiu o distanciamento entre as curvas se comparado aos ajustes realizados somente para a camada de

0,2 a 0,3 m (principalmente para o modo “Auto”), onde a sobreposição das curvas dos tratamentos 3CM e 1CMan torna difícil sua diferenciação. Isso ocorre porque as camadas distintas de solo apresentam variação em outros atributos além da umidade que influenciam diretamente os valores de RP (Ds principalmente), diminuindo a confiabilidade da regressão para a junção de todas as camadas e aumentando a dispersão dos dados, que pode ser observado pela diminuição do valor do  $R^2$  mesmo com alta significância do intercepto e do coeficiente exponencial. Sojka et al. (2001) verificaram que ao analisar a correlação entre RP, Ds e  $\theta$ , considerando dados de todo o perfil, a relação era forte entre RP e Ds, porém ao separar os dados por camadas a dependência entre a RP e a Ds não se manteve, de modo que somente o  $\theta$  explicava satisfatoriamente o comportamento da RP. Os autores ainda citam como razão para esta ocorrência o fato de a Ds apresentar baixa variabilidade para uma mesma camada, o que corrobora os baixos valores de coeficiente de variação (CV%) encontrados para Ds neste trabalho (Tabela 2, item 2.3.1).

Como o comportamento das curvas da Figura 10 foi semelhante quando comparado os resultados separados por camada (Figuras 7 e 8), preferiu-se continuar as análises dos dados com os modelos que apresentaram maiores valores de  $R^2$ . Considerando os valores de RP corrigidos (RPcor), obtidos a partir da modelagem para cada camada de solo, foi verificado as diferenças encontradas pelos intervalos de confiança da média (Figura 11). Os resultados da Figura 11 mostram que embora o comportamento antes e após a modelagem tenha sido semelhante, a diminuição do resíduo contribuiu para diminuição do intervalo de confiança, o que possibilitou uma diferenciação mais visível entre as parcelas estudadas. A uniformização ocasionada pela modelagem facilita a interpretação dos resultados e torna mais suave a diferença entre as parcelas. A interpretação dos valores de RPcor apresentaram a ordem crescente de  $1CM < 1CMan = 3CM$  na superfície e  $1CM = 1CMan < 3CM$  na subsuperfície.

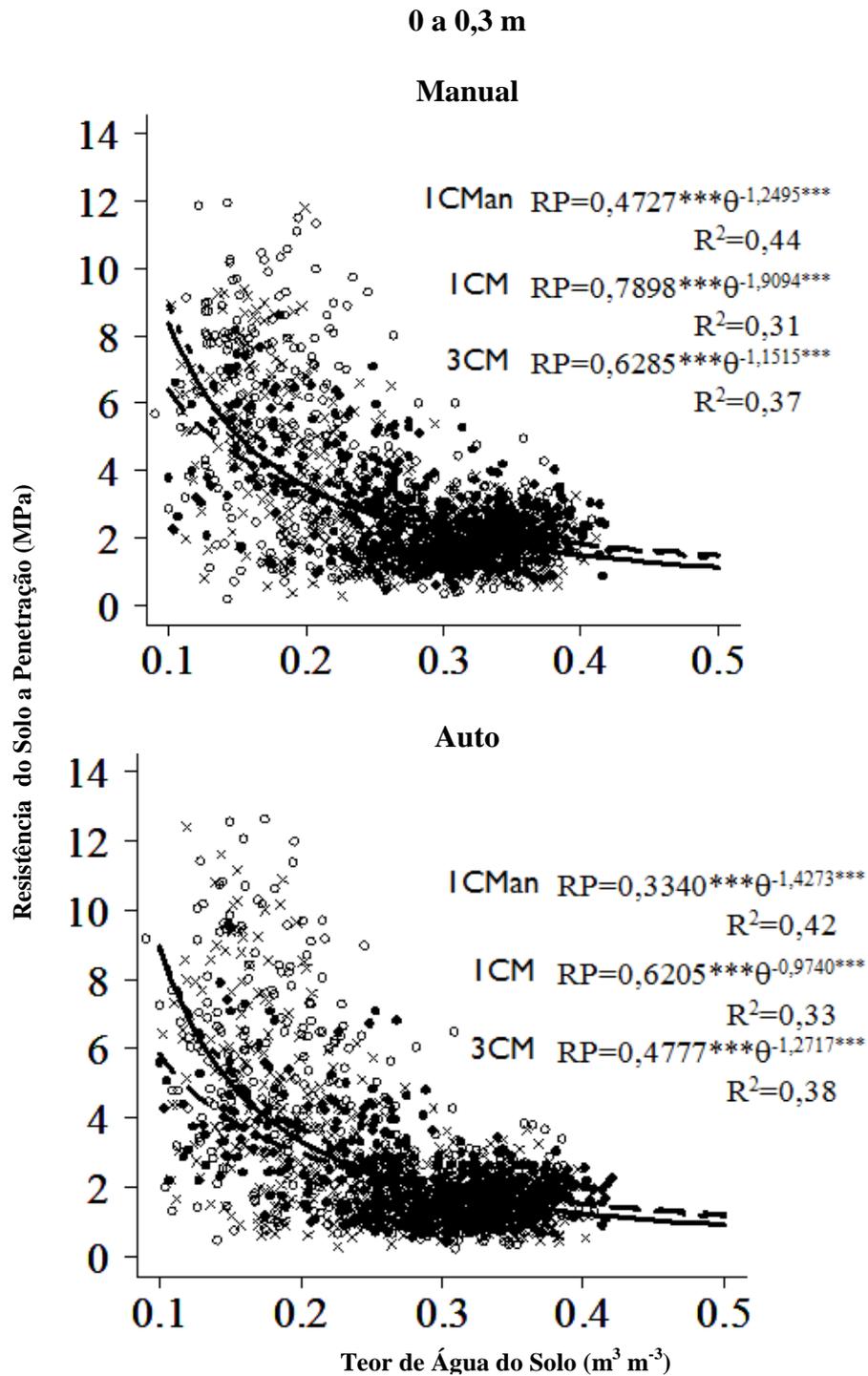


Figura 10 - Gráficos entre a resistência a penetração (RP) e o teor de água do solo ( $\theta$ ) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM para a profundidade de 0 a 0,3 m, com dados obtidos pelo método manual e automático (auto). Significância dos parâmetros das regressões não lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

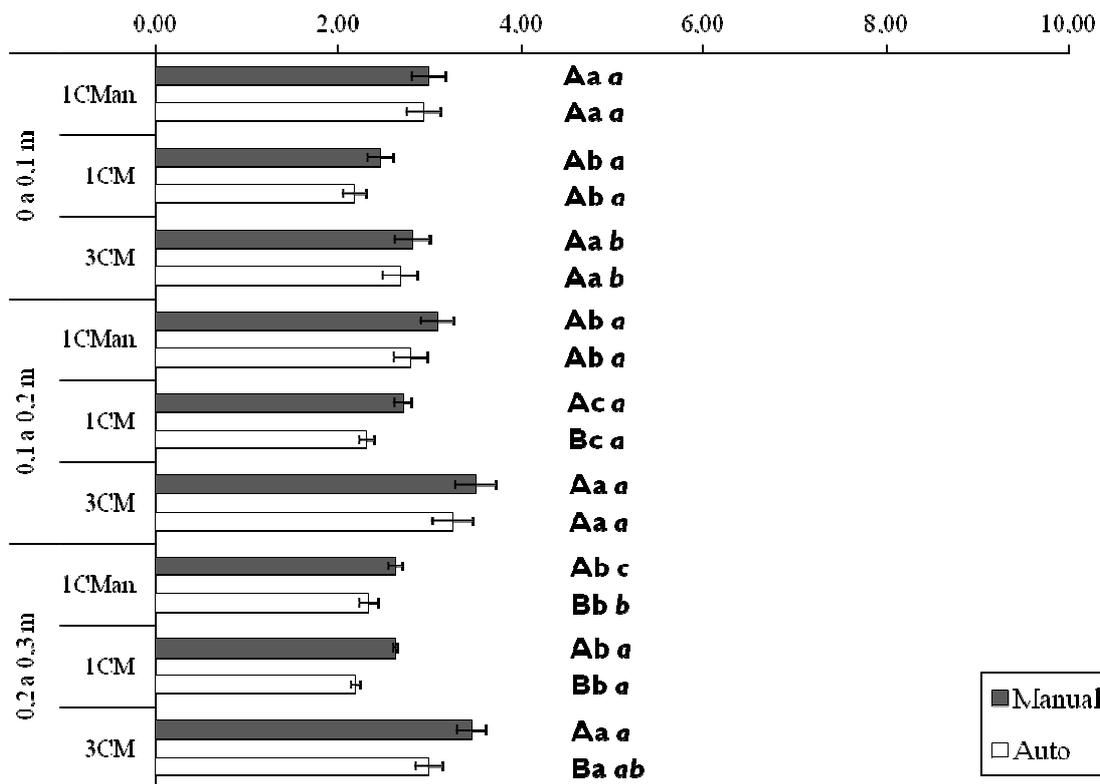


Figura 11 - Comparação dos dados de resistência a penetração (RP), após correção para teor de água no solo ( $\theta$ ), para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM, em diferentes profundidades medidos por meio do método manual e automatizado (auto) utilizando o intervalo de confiança da média. Barras seguidas de letras maiúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o método de medição (manual e auto) realizado na mesma área e mesma profundidade; barras seguidas de letras minúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos na mesma profundidade e realizados pelo mesmo método; barras seguidas de mesma letra minúscula em itálico não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as profundidades por um mesmo tratamento e método de medição

Embora os resultados com e sem correção tenham se apresentado semelhantes é importante fazer algumas considerações. A diminuição do intervalo de confiança demonstra maior uniformidade da variável a ser comparada, o que pode facilitar a comparação entre manejos que contribuam para uma diferenciação nos atributos físicos do solo que interferem na RP. Alguns pesquisadores buscam realizar medições de RP num curto intervalo de tempo, para possibilitar a comparação entre áreas experimentais, mas como foi observado neste trabalho o manejo pode interferir na secagem do solo, mesmo em locais onde outros atributos (textura, C.org, Ds e PT) se apresentam constantes. Isto interferiu nas medições de RP, o que assegura a necessidade do conhecimento do  $\theta$  no estudo da RP, além da exigência de homogeneidade para comparação de diferentes manejos. Portanto, verificou-se que o  $\theta$  é uma limitação para a utilização da penetrometria na comparação de áreas compactadas.

Quanto aos diferentes métodos na obtenção da RP, na figura anterior puderam ser observadas algumas diferenças significativas entre as medições realizadas com e sem controle

da velocidade. Estas foram mais evidentes nas camadas subsuperficiais, apresentando mesmo comportamento para as medições não corrigidas. Tal diferença pode ser avaliada pela comparação das regressões lineares obtidas pela correlação dos diferentes métodos, “Manual” e “Auto”, com a reta 1:1, que serve como identificador de tendência nos dados (Figura 12). Observa-se que para todos os tratamentos e todas as profundidades a medição pelo método manual tende a obter valores maiores que pelo método automático, fazendo com que a linha de tendência das regressões sempre se situe abaixo da reta 1:1.

Observa-se na Figura 12 que as medições com valores mais baixos (até 2 MPa) a dispersão dos pontos foi menor do que em medições mais elevadas. Sabendo que os valores mais elevados de RP aconteceram em valores de  $\theta$  mais baixos, o que pode ser comprovado pelos dados da Figura 6, que mostram o comportamento da RP conforme a secagem do solo. Portanto verifica-se que as maiores diferenças entre os dois aparelhos ocorre em  $\theta$  mais baixos. A coesão de solos argilosos aumenta conforme acontece a secagem, ocorrendo uma aproximação entre as partículas que, somado a diminuição da película de água que recobre as partículas e que agia como lubrificante, favorece o aumento do atrito entre o cone do penetrômetro e o solo. Na medição “Manual”, conforme há um aumento da RP real, se torna cada vez mais difícil manter a velocidade e a posição perpendicular ao solo e isso aumenta o atrito do solo com a haste do equipamento, uma vez que esta, se o movimento não é mantido constante e na mesma direção, entra em contato com a parede do solo no orifício formado pela inserção da ponteira no perfil do solo. Quando a velocidade é mantida constante e o equipamento é tangenciado perpendicularmente ao solo, sendo mantida essa posição sem oscilação, o contato da haste com o solo é minimizado, o que colabora para que os valores de RP sejam menores.

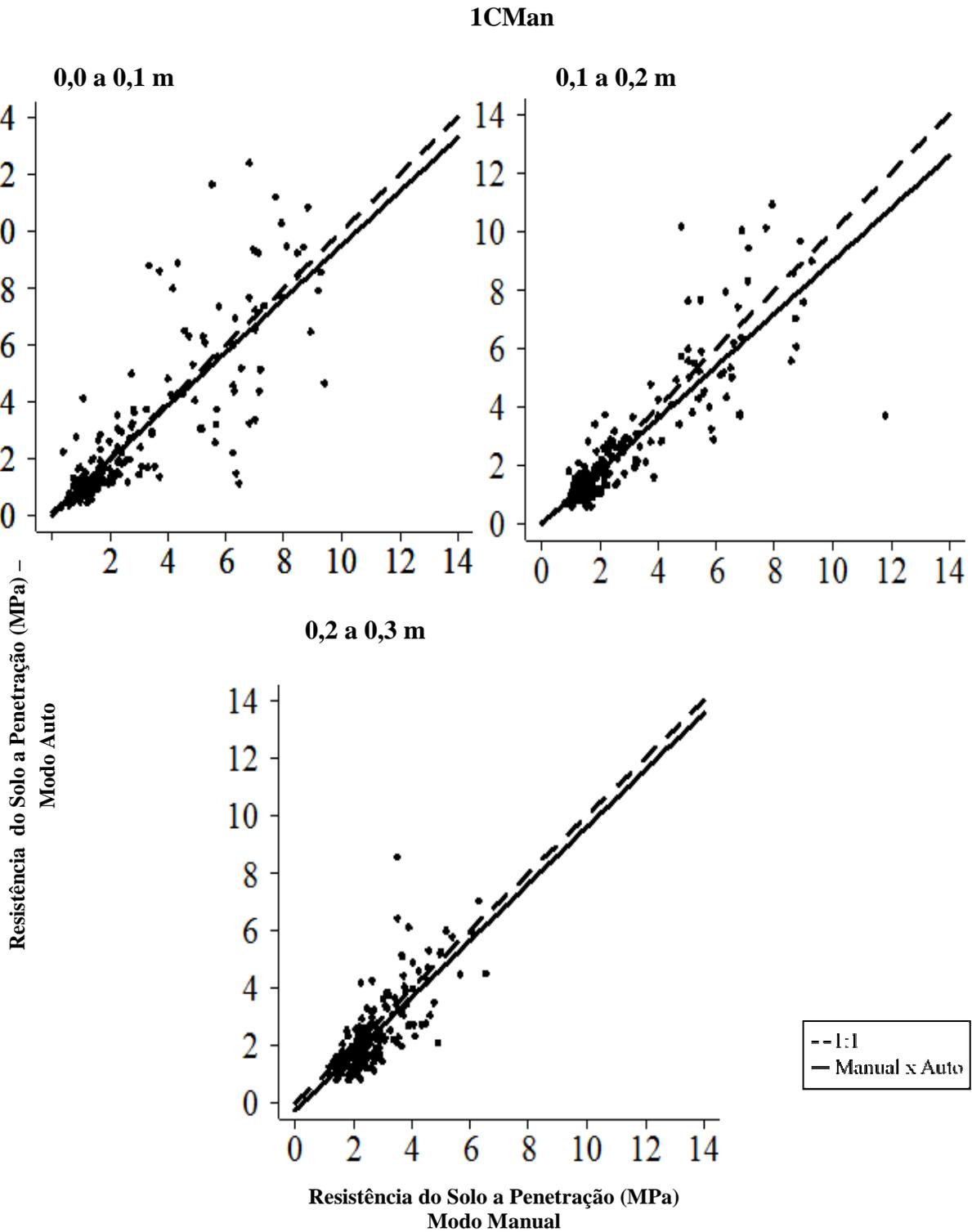


Figura 12 - Gráficos com as retas 1:1 comparadas com as linhas de tendência obtidas por regressão linear ao correlacionar os dados obtidos pelo método manual (variável independente) e automático (variável resposta) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades

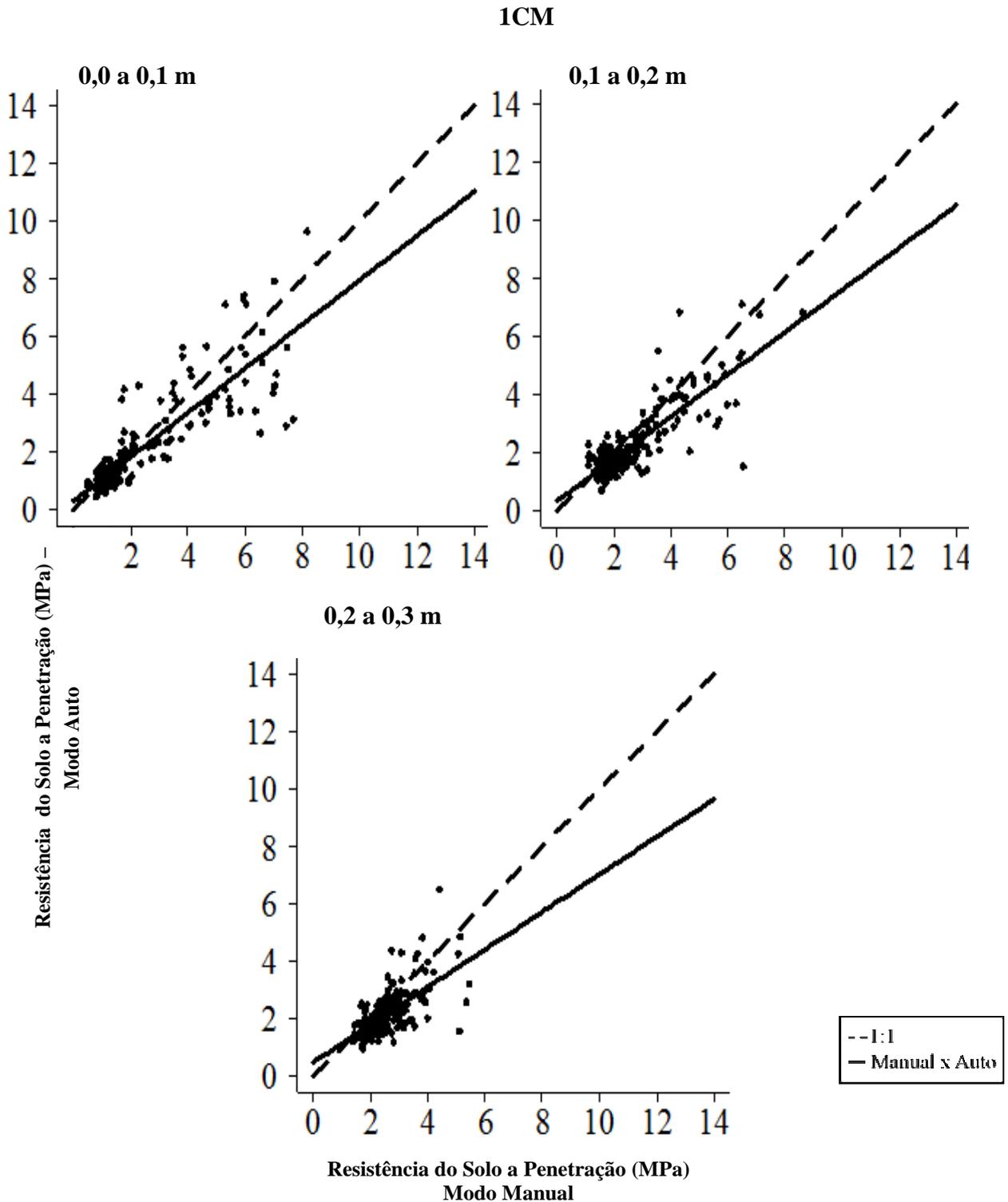


Figura 12 - Gráficos com as retas 1:1 comparadas com as linhas de tendência obtidas por regressão linear ao correlacionar os dados obtidos pelo método manual (variável independente) e automático (variável resposta) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades

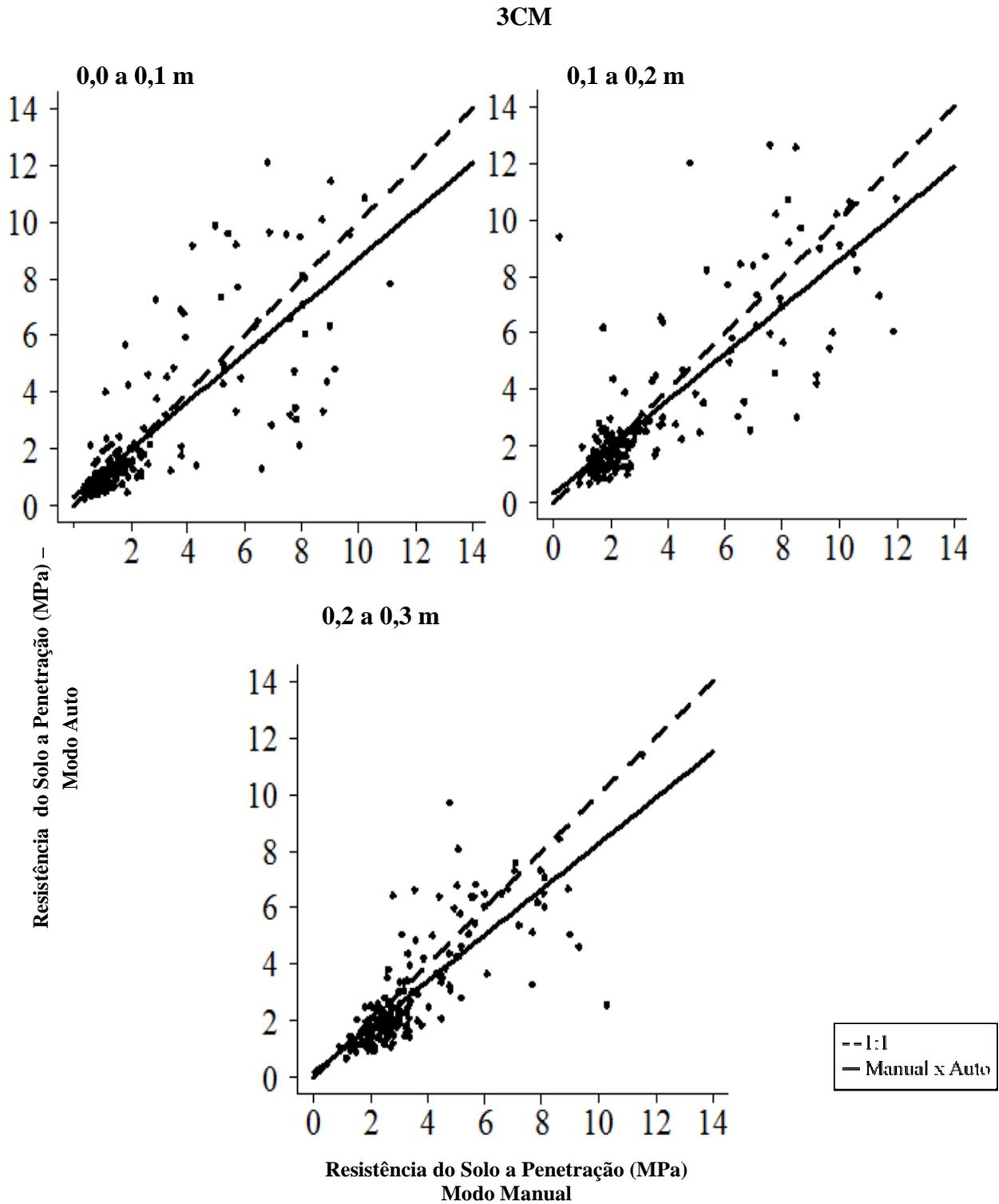


Figura 12 - Gráficos com as retas 1:1 comparadas com as linhas de tendência obtidas por regressão linear ao correlacionar os dados obtidos pelo método manual (variável independente) e automático (variável resposta) para os tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM em diferentes profundidades

Como para todos os tratamentos o comportamento dos diferentes métodos frente à reta 1:1 foi semelhante, realizou-se uma correlação utilizando todas as medições, independente do

tratamento e da profundidade (Figura 13). O resultado foi o mesmo, com a tendência das medições manuais obterem valores mais elevados que as medições automáticas. Devido às observações feitas com base na reta 1:1, foi realizado um teste t pareado, considerando a tendência dos valores manuais serem maiores que os valores automáticos. Os resultados corroboram os da reta 1:1, sendo esta diferença altamente significativa ( $p < 0,001$ ) para quase todas as camadas e tratamentos (Figura 14).

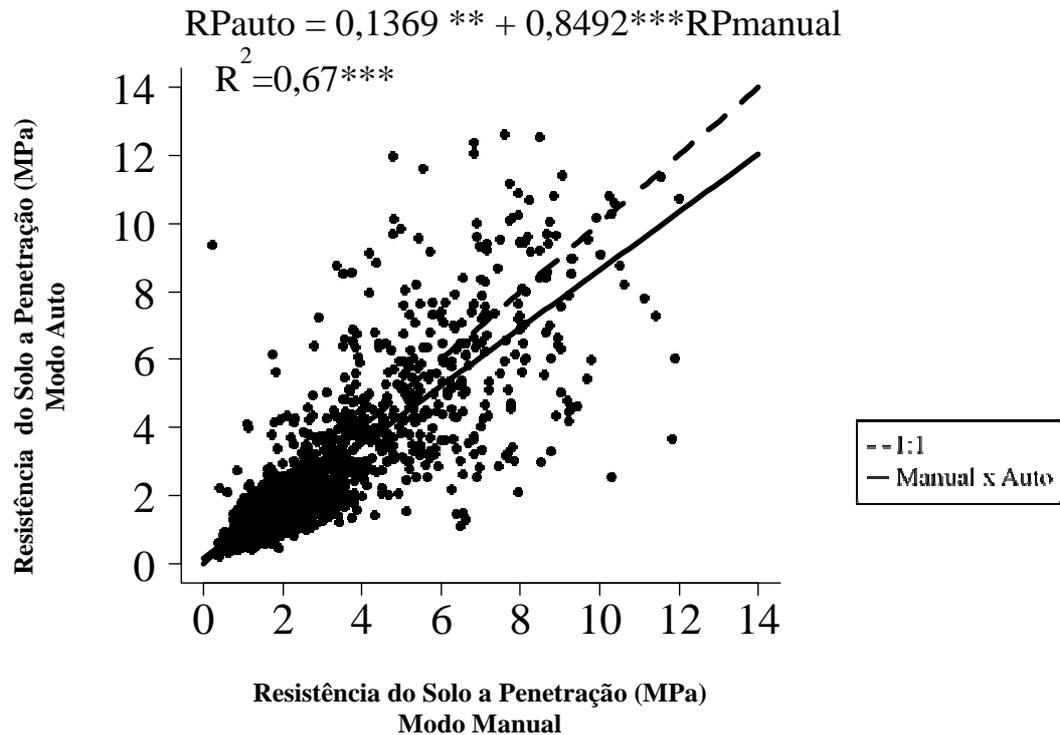


Figura 13 - Gráfico com a reta 1:1 comparada com a linha de tendência obtida por regressão linear ao correlacionar os dados obtidos pelo método manual (variável independente) e automático (variável resposta) para todos os tratamentos todas as profundidades. Significância dos parâmetros das regressões lineares: (°) não significativo; (\*) significativo com  $p < 0,05$ ; (\*\*) significativo com  $p < 0,01$ ; (\*\*\*) significativo com  $p < 0,001$

A oscilação da velocidade e o encontro inconstante entre o solo e a haste provocam aumentos expressivos nas leituras de RP. Esta é uma resposta frente a perturbação do solo e, embora o interesse seja pelo valor da pressão necessária para somente a ponta cônica, pode ocorrer influência do atrito da haste com o solo, efeito que pode ser evitado ao se tomar algumas precauções. Existem diversos trabalhos que visam diminuir ou mesmo evitar a medição da contribuição da haste sobre a RP. Armbruster et al. (1990) e Barone e Faugno (1996) instalaram transdutores diretamente no cone, e citaram diminuição de até 40 % nas medições de RP, atribuindo essa diferença ao atrito da haste. Bengough et al. (1997) mediu a RP com um penetrômetro com haste rotativa e para cones com ângulo de  $5^\circ$  obteve diferenças

expressivas entre os valores de medidos com e sem rotação. Sua teoria é de que a rotação altera a orientação do vetor da resistência friccional em direção perpendicular ao eixo da haste, diminuindo o componente friccional oposto à penetração axial desta. Porém os próprios autores admitem a dificuldade para o desenvolvimento e montagem do aparelho que rotaciona a haste.

Por isso, técnicas mais simples podem ser empregadas para obter resultados semelhantes. Neste trabalho, somente com o advento da velocidade controlada, os valores da RP pelo método Auto se apresentaram, considerando uma média geral para todas as camadas, 11,5 % menores que o método manual. Ajustando os valores de RP para um  $\theta$  de  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , valor próximo a CC apresentada por cada tratamento a diferença entre os dois métodos tendeu a zero, porém calculando esta mesma diferença para  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , valor mínimo medido em campo que foi facilmente alcançado após uma semana sem evento chuvoso, o método Manual apresenta uma média 36,4 % maior que o método Auto.

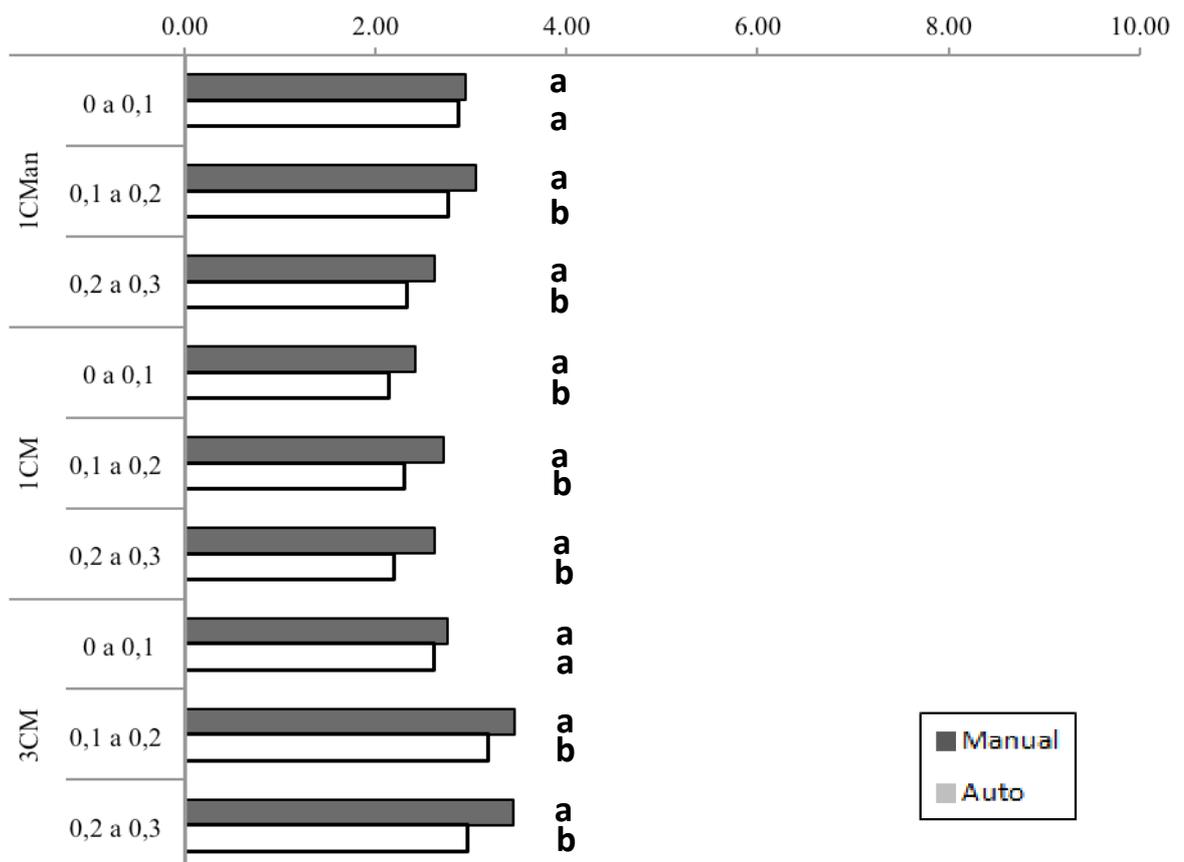


Figura 14 - Comparação dos dados de resistência a penetração (RP) obtidos pelos métodos manual e automatizado (auto) nos tratamentos 1CMan, 1CM e 3CM, em diferentes profundidades, utilizando teste t pareado. Barras seguidas de maiúsculas iguais não apresentam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o método de medição (manual e auto) realizado na mesma área e mesma profundidade

### **3 CONCLUSÕES**

A hipótese levantada por este estudo foi comprovada, de modo que o teor de água do solo, por apresentar correlação marcante com a resistência à penetração, interferiu na utilização da penetrometria na quantificação da compactação do solo e na comparação de manejos distintos do solo. Os métodos utilizados para obtenção dos valores de resistência do solo à penetração interferiram nos resultados, de maneira que o método manual superestimou os valores de resistência quando comparado ao método automático.



## REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K.K.; SINGH, A.K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p.353-363, 2006.
- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; ALADENOLA, O. O.; SOUZA, T.T.T.; INDA JUNIOR, A.V. Comparison of estimation methods of soil strength in five soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.487-495, 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer**. St Joseph, 2009. (ASABE standard: ASABE EP542).
- ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford, UK: CAB International, 1992. 171p.
- ARMBRUSTER, K.; HERTWIG, A.; KUTZBACH, H.D. An improved design of cone penetrometer. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.46, p.219-222, 1990.
- ARSHAD, M.A; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141 (SSSA Special publication, 49)
- ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.60, p.67-78, 2001.
- ASSIS, R.L.; LAZARINI, G.D.; LANÇAS, K.P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009.
- AYERS, P.D.; PERUMPRAL, J.V. Moisture and density effect on cone index. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p.1169-1172, 1982.
- BAGHDADI, Z.A.; GHAZALI, F.M.; AL-AHMADI, S.M.S. Cone penetration testing for field density prediction. **Engineering Journal of Qatar University**, Qatar, v.6, p.135-156, 1993.
- BARONI, L.; FAUGNO, S. Penetration tests for measurement of soil strength: assessment of the contribution of shaft friction. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.64, p.103-108, 1996
- BECHER, H.H. Soil compaction around a small penetrating cylindrical body and its consequences. **Soil Technology**, Amsterdam, v.7, p.83-91, 1994

BELBIN, K.; COTCHING, B. Soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols with visually assessed soil structure differences in north-west Tasmania. In: AUSTRALIAN NEW ZEALAND SOILS CONFERENCE, 3., 2004, Sydney. **Anais eletrônicos...**Gosford: The Regional Institute 2004. 1 CD ROM.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C. E.; WILSON, G. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots. **European Journal of Soil Science**, Commerce Place, v.48, p.603-612, 1997.

BERNADIER, C.R.; ROSS, S.J.; GROSSMAN, R.B. Soil water capacity prediction **Geoderma**, Amsterdam, v.49, p.77-81, 1991.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, 2007.

BLANCO-CANQUI, H.; CLAASSEN, M.M.; STONE, L.R.; Controlled traffic impacts on physical and hydraulic properties in an intensively cropped no-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, n.6, p.2142-2150, 2010.

BLANCO-SEPULVEDA, R. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. **Agrociencia**, Texcoco, v.43, n.3, p.231-239, 2009

BORTOLUZZI, E.C.; ELTZ, F. L.F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.449-457, 2000.

BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A., OLIVEIRA, L. Influência de formas de relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1749-1755, 2006.

BUCHANAN, S.J.; SO, H.B.; KOPITTKE, P.M.; MENZIES, N.W. Influence of texture in bauxite residues on void ratio, water holding characteristics and penetration resistance. **Geoderma**, Amsterdam, v.158, p.421-426, 2010)

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, p.519-524, 1990.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J. Soil strength, cotton root growth and lint yield in a southeastern USA coastal loamy sand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.74, p.151-159, 2003.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p. 205-217, 1997.

BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R.; BAUER, P.J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.999-1003, 2000.

- BUSSCHER, W.J.; NOVAK, J.M.; HUNT, P.G.; BAUER, P.J.; Increase of soil strenght over time in a US southeastern coastal plain loamy sand. **Soil Science**, Philadelphia, v.171, n.7, p.519-526, 2006.
- CARRARA, M.; CASTRIGNANÒ, A.; COMPARETTI, A.; FEBO, P.; ORLANDO, S. Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdan, v.142, p.294-307, 2007.
- CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A.Sistemas de colheita de cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.8, p.1467-1473, 1999.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açucar 2012/2013**: primeiro levantamento. Brasília, 2012.
- CUNHA, J.P.A.R, Resistência Mecânica do Solo a Penetração sob Diferentes Densidades e Teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1/4, 2002.
- DOMSCH, H.; EHLERT, D.; GIEBEL, A., WITZKE, K. Evaluation of the soil penetration resitance along a transect to determine the loosening depth. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.7, p.309-326, 2006.
- FERRERO, A.; USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.84, p.127-138, 2005.
- FIGUEIREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2010.
- GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.;TOPP G.C. (Ed.), **Methods of Soil Analysis, IV**. Physical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p.201-225.
- HAMMAD, E.A.; DAWELBEIT, M.I. Effect of tillage and field condition on soil physical properties, cane and sugar yields in Vertisols of Kenana Sugar Estate, Sudan. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.62, p.101-109, 2001.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.82, p.121-145, 2005.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.16, p.105-120, 1990.
- HENDERSON, C.; LEVETT, A.; LISLE, D. The effects of soil water content and bulk density on the compactibility and soil penetration resistance of some western Australian sandy soils. **Australian Journal of Soil Research**, Oxford, v.26, p.391-400, 1988.

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.40, n.3, p.497-508, 1989.

HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.4, p.1320-4, 2002.

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

JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.66, p.261-265, 1997

KOCH, H.J.; HEUER, H.; TOMANOVÁ, O.; MÄRLÄNDER, B. Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.101, p.69-77, 2008

LIBARDI, P.L.; LIER, Q.J.V. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. IN: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1999, Aracaju. **Anais...** Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999, p.47-56.

LÓPEZ, M.V.; ARRÚE, J.L.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragón. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, p.251-271, 1996.

MACHADO, W.; TELLES, T.S.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F.; ALVES, G.B., BORGES, L.B.; Physical properties of a Rhodic Haplustox under two sugarcane harvesting systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1803-1809, 2010.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils from Alberta. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.46, p.193-202, 1998.

MIRREH, H. F.; KETCHESON, J. W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. **Canadian Journal of Soil Science**, v.52, p.477-483, 1972.

OLIVEIRA, V.S.; ROLIN, M.M.; VASCONCELOS, F.B.; COSTA, Y.D.J.; PEDROSA, E.M.R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.9, p.914-920, 2010.

ORSUNBITAN, J.A.; OYEDELE, D.J.; ADEKALU, K.O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, p.57-64, 2005.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, C.B.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A.; MURATA, I.M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.911-917, 2004.

PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.31, p.547-551, 2000.

PERUMPRAL, J.V. Cone penetrometer: a review. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.30, p.939-944, 1987.

QUEIROZ-VOLTAN, R.; PRADO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.1, 1998.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2011. url: {<http://www.R-project.org>}.

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

REINERT, D.J.; COLLARES, G.L.; REICHERT, J. M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.304-316, 2007.

ROQUE, A.A. O.; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1419-1427, 2008.

SHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.J.; STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.75, p.75-86, 2004.

SHARMA, P.K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.60, p.143-152, 2001.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1-10, 2008.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.921-930, 2006.

SMITH, D.L.O.; DICKSON, J.W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.46, p.13-29, 1990.

SOARES, J.L.N.; ESPÍNDOLA, C.R.; FOLONI, L.L. Alteração física e morfologia em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.353-359, 2005.

- SOJKA, R.R.; BUSSCHER, W.J.; LERSCH, G. A. *In situ* strength, bulk density, and water content relationships of a durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Science**, Philadelphia, v.166, n.8, p.520-529, 2001.
- SOUZA, Z.M., MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006a.
- SOUZA, Z.M.; CAMPOS, M.C.C.; CAVALCANTE, Í.H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L.G.; SOUZA, S.R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, 2006b.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BENTO, J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.51-58, 2004a.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.1, 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782010000100009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782010000100009&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 10 maio 2012.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.937-944, 2004b.
- SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- SPIVEY JUNIOR, L.D.; BUSSCHER, W.J.; CAMPBELL, R.B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.6, p.351-363, 1986.
- STOCK, O.; DOWNES, N.K. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.99, p.191-201, 2008.
- SUN., Y.; LIN, J.; M.A, D.; ZENG, Q.; LAMMERS SCHULZE, P. Measurement of penetration force using a Hall-current-sensor. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.92, p.264-268, 2006.
- TO, J.; KAY, B. D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, Amsterdam, v.126, p.261-276, 2004.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Moagem da cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol: safra 2011/2012**. São Paulo, 2012.
- UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, p.193-202, 2001.

WARRICK, A.W. Spacial variability. In: HILLEL, D. (Ed.). **Enviromental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655-675.

WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; GREGORY, A.S.; MOONEY, S.J.; CLARK, L.J.; WHITMORE, A.P. The effect of soil strength on the yield of wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.306, p.237-247, 2008.

YAVUZCAN, H. G. Wheel traffic impact on soil conditions as influenced by tillage system in Central Anatolia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.54, p.129-138, 2000.



ANEXOS



## ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continua)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICMan								
dia 1								
0,96	1,43	1,48	0,46	0,74	0,92	0,37	0,36	0,37
0,90	0,81	1,16	0,99	0,72	1,22	0,37	0,34	0,36
0,56	1,12	1,47	0,45	0,86	1,32	0,38	0,35	0,33
0,82	1,03	2,24	1,14	0,58	0,82	0,37	0,36	0,33
1,12	1,31	1,85	0,68	1,04	0,95	0,37	0,34	0,37
0,98	1,04	1,36	0,53	0,93	1,44	0,36	0,34	0,34
0,70	1,51	1,92	0,49	0,59	1,15	0,35	0,38	0,37
1,00	1,74	2,25	0,66	1,04	2,01	0,36	0,29	0,24
0,58	1,01	2,12	0,35	1,03	1,24	0,26	0,39	0,35
0,60	0,99	1,49	0,77	0,90	1,23	0,31	0,34	0,31
0,59	1,09	1,62	0,68	1,40	2,05	0,37	0,36	0,31
1,02	1,71	1,83	0,88	0,58	0,81	0,36	0,33	0,32
0,71	1,00	1,46	0,48	0,72	1,28	0,34	0,30	0,34
dia 2								
1,05	1,48	2,07	0,77	1,05	1,38	0,30	0,22	0,26
0,81	1,48	1,17	1,00	0,97	1,00	0,24	0,31	0,35
1,08	1,77	1,54	0,75	1,16	0,99	0,36	0,34	0,35
0,30	0,90	1,99	0,27	0,67	1,00	0,23	0,26	0,30
0,88	1,29	1,54	0,91	0,92	1,66	0,23	0,27	0,32
1,20	1,55	1,71	0,44	0,70	1,52	0,30	0,29	0,32
0,74	1,31	1,61	0,62	0,80	1,80	0,27	0,33	0,28
1,37	1,30	1,75	1,18	1,69	1,27	0,30	0,29	0,27
1,54	1,48	1,42	1,28	1,01	1,17	0,30	0,23	0,31
0,96	1,17	1,51	0,86	0,82	0,96	0,29	0,31	0,32
1,27	1,16	2,18	0,67	0,82	0,92	0,33	0,32	0,36
0,83	1,25	1,90	0,98	2,06	1,57	0,33	0,30	0,31
1,65	1,10	1,32	1,34	1,24	1,26	0,35	0,33	0,28
dia 3								
2,96	2,58	2,18	1,44	1,41	1,42	0,24	0,30	0,31
2,32	1,61	1,59	1,91	1,16	1,07	0,27	0,32	0,34
3,03	1,60	1,39	1,44	2,78	1,58	0,21	0,27	0,30
0,90	1,68	1,33	1,10	1,62	1,23	0,23	0,34	0,33
1,16	1,61	1,51	1,26	1,16	1,14	0,24	0,28	0,24
1,28	1,25	1,48	0,57	0,91	0,98	0,24	0,29	0,31
0,35	0,93	1,32	2,25	1,78	1,44	0,19	0,27	0,28
1,77	1,69	1,43	1,16	1,50	1,23	0,15	0,23	0,33
1,09	1,15	1,42	1,01	0,89	0,78	0,19	0,24	0,34
1,43	1,25	1,43	1,98	1,35	1,01	0,17	0,30	0,29

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICMan								
dia 3								
1,27	1,38	1,58	1,01	1,44	1,35	0,19	0,23	0,29
2,31	1,72	2,06	1,44	1,55	2,05	0,18	0,26	0,31
2,18	1,51	2,21	1,43	0,86	1,20	0,15	0,26	0,28
dia 4								
1,59	1,57	1,50	0,95	1,15	1,43	0,25	0,28	0,28
3,29	1,72	2,71	1,67	0,91	1,11	0,19	0,25	0,28
2,60	1,61	1,92	1,14	0,98	0,96	0,18	0,28	0,29
2,26	1,71	1,44	1,51	1,02	1,47	0,25	0,28	0,30
1,80	1,30	1,43	1,24	1,44	1,07	0,25	0,28	0,31
2,38	2,05	1,92	1,85	1,08	1,21	0,20	0,24	0,29
2,23	1,68	1,91	2,39	1,11	1,56	0,21	0,31	0,31
1,66	1,71	2,05	1,93	1,12	1,13	0,24	0,32	0,29
1,59	1,37	1,84	1,65	1,22	1,28	0,26	0,35	0,27
1,70	1,12	2,06	1,48	0,88	1,23	0,20	0,27	0,29
1,02	1,40	1,58	0,97	1,03	1,21	0,24	0,26	0,32
1,50	1,62	1,57	1,41	1,03	1,42	0,19	0,25	0,30
2,66	1,84	1,75	1,95	1,54	1,36	0,18	0,27	0,33
dia 5								
1,97	2,83	2,86	1,64	1,71	1,71	0,11	0,19	0,23
6,81	4,78	3,49	7,67	10,16	8,53	0,13	0,19	0,20
5,10	5,56	3,52	3,03	4,45	2,27	0,16	0,21	0,21
3,72	4,11	4,90	8,57	2,83	2,06	0,12	0,15	0,19
0,81	2,11	2,40	2,76	2,58	1,48	0,13	0,20	0,23
6,28	3,74	2,70	4,37	4,78	3,26	0,11	0,16	0,23
4,09	5,88	4,62	4,23	2,89	3,06	0,15	0,19	0,19
2,75	3,00	2,96	3,12	2,86	2,28	0,15	0,17	0,24
6,51	6,80	4,46	5,15	3,74	2,76	0,12	0,19	0,21
7,91	6,47	4,00	10,27	5,34	3,95	0,16	0,14	0,18
5,26	6,80	3,91	6,07	3,68	2,73	0,15	0,20	0,25
6,47	4,60	2,29	1,11	4,92	2,91	0,17	0,21	0,26
6,35	11,79	6,04	1,48	3,67	5,94	0,14	0,20	0,22
dia 6								
7,03	7,10	4,09	7,23	9,41	2,32	0,16	0,16	0,20
5,70	5,17	3,66	5,58	3,79	1,96	0,16	0,16	0,28
7,02	5,04	3,74	6,55	5,56	4,06	0,12	0,16	0,21
7,01	5,83	3,81	3,38	3,26	3,46	0,15	0,16	0,24
7,70	5,23	3,89	11,19	5,47	2,68	0,16	0,22	0,20
6,80	8,76	3,17	12,41	6,03	3,74	0,12	0,16	0,20
4,71	5,44	2,59	6,28	7,65	2,71	0,14	0,17	0,19

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICMan								
dia 6								
1,65	3,12	2,25	2,31	3,65	4,18	0,13	0,17	0,19
6,31	4,47	3,77	6,95	4,08	3,87	0,12	0,15	0,16
5,19	6,24	3,71	6,27	5,17	4,42	0,12	0,19	0,23
2,77	3,97	3,16	3,22	3,70	3,86	0,12	0,20	0,22
5,62	5,47	3,02	2,55	5,88	3,61	0,15	0,17	0,30
4,16	4,77	3,16	7,99	5,71	3,71	0,12	0,20	0,20
dia 7								
6,26	5,40	3,72	2,20	5,21	3,06	0,11	0,19	0,18
6,93	8,87	4,22	9,35	9,66	4,57	0,15	0,20	0,22
7,12	6,72	4,75	9,22	7,43	3,49	0,16	0,18	0,22
4,58	6,54	4,07	6,50	5,01	2,70	0,16	0,19	0,28
5,68	7,07	5,37	3,72	8,32	5,76	0,14	0,20	0,25
9,41	5,57	4,54	4,65	4,52	4,24	0,16	0,21	0,23
6,25	5,77	4,32	5,97	4,02	2,73	0,17	0,24	0,20
5,18	5,07	2,61	3,05	4,99	4,23	0,11	0,16	0,23
9,26	6,60	4,00	8,55	6,16	4,88	0,14	0,24	0,27
8,45	5,38	3,61	9,24	4,28	3,10	0,17	0,29	0,26
4,34	8,58	3,75	8,85	5,57	3,37	0,15	0,16	0,22
8,82	8,72	5,66	10,82	7,03	4,44	0,14	0,19	0,26
5,51	8,63	6,52	11,63	8,57	4,47	0,14	0,18	0,26
dia 8								
7,33	6,14	3,31	7,36	5,10	3,07	0,18	0,16	0,17
4,86	3,98	2,64	5,30	4,24	2,97	0,16	0,16	0,22
8,48	7,91	4,56	8,41	10,90	4,68	0,16	0,19	0,21
7,18	6,37	3,89	5,12	4,31	6,10	0,18	0,19	0,16
9,19	6,84	4,57	7,91	6,36	5,30	0,16	0,20	0,18
7,91	8,98	3,51	7,65	7,59	6,41	0,15	0,17	0,18
3,34	7,70	6,28	8,78	10,13	7,02	0,16	0,15	0,16
6,82	5,03	5,17	3,22	5,99	5,96	0,14	0,15	0,22
8,69	9,28	4,98	9,43	8,99	5,19	0,16	0,14	0,15
8,10	6,88	5,00	9,45	10,03	5,26	0,15	0,18	0,15
5,76	4,71	2,62	7,33	3,40	1,67	0,11	0,15	0,21
8,93	6,30	3,66	6,44	7,94	5,07	0,10	0,13	0,18
7,14	5,02	3,62	4,37	7,60	5,12	0,11	0,21	0,24
dia 9								
2,11	2,15	2,36	1,31	1,52	1,93	0,29	0,29	0,27
2,38	2,17	1,74	2,21	1,66	1,36	0,31	0,31	0,30
1,29	1,97	1,99	1,14	2,03	1,73	0,25	0,30	0,29
0,81	1,26	1,94	1,22	1,26	1,96	0,31	0,29	0,34

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICMan								
dia 9								
0,80	1,55	2,17	0,99	1,43	1,78	0,28	0,33	0,31
0,72	1,12	1,91	0,70	1,15	1,86	0,22	0,27	0,34
1,11	1,67	2,23	0,94	1,21	1,70	0,25	0,25	0,29
0,63	1,58	1,78	0,61	1,26	2,32	0,21	0,29	0,34
1,13	1,89	2,12	0,94	1,67	1,16	0,22	0,30	0,31
1,00	1,56	2,00	1,31	1,53	1,95	0,26	0,23	0,41
1,01	1,94	2,49	0,77	1,17	1,59	0,24	0,28	0,36
0,55	1,51	1,61	0,62	1,60	1,71	0,17	0,37	0,32
0,92	1,72	2,31	0,94	1,18	1,37	0,24	0,29	0,29
dia 10								
2,25	2,17	2,29	3,54	1,80	1,85	0,24	0,30	0,28
3,25	2,50	2,21	3,73	2,62	2,63	0,21	0,28	0,26
2,65	3,18	3,36	2,71	1,94	2,19	0,27	0,28	0,34
2,24	2,78	2,48	3,03	2,65	2,01	0,25	0,34	0,39
1,59	2,29	3,40	1,08	2,52	3,66	0,30	0,27	0,36
2,73	2,19	2,99	4,97	3,73	2,36	0,17	0,21	0,30
2,03	2,15	2,56	1,52	1,34	1,63	0,19	0,29	0,31
2,33	2,78	2,34	1,86	2,79	2,21	0,24	0,28	0,37
2,53	1,85	2,16	1,91	1,58	1,30	0,22	0,28	0,31
1,47	1,48	2,67	1,44	1,50	2,26	0,24	0,29	0,32
2,01	1,71	2,11	1,41	1,32	1,47	0,19	0,29	0,31
3,04	1,96	2,19	2,38	1,17	1,29	0,24	0,23	0,30
3,44	4,10	2,97	2,94	2,79	1,43	0,21	0,24	0,29
dia 11								
1,06	2,21	2,19	4,11	2,67	1,89	0,24	0,27	0,34
2,50	1,65	2,45	1,89	1,49	1,67	0,21	0,34	0,26
1,65	2,72	2,52	2,83	2,48	2,34	0,25	0,30	0,38
3,44	2,37	3,06	2,85	2,34	2,14	0,24	0,27	0,33
2,37	2,23	2,28	2,92	2,42	1,66	0,23	0,26	0,33
3,72	3,19	3,51	1,34	1,92	2,06	0,23	0,27	0,34
3,98	2,86	2,79	4,81	2,63	1,57	0,21	0,26	0,31
6,23	3,27	2,76	4,55	3,08	1,86	0,22	0,28	0,34
2,81	3,22	2,66	3,72	2,18	1,40	0,21	0,32	0,37
4,93	3,76	2,09	4,03	2,78	2,20	0,20	0,26	0,34
4,51	2,67	1,87	4,29	2,67	1,62	0,23	0,26	0,30
2,83	2,35	2,13	3,60	2,89	2,46	0,24	0,30	0,39
5,67	3,35	3,08	3,20	2,65	2,23	0,23	0,28	0,30

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICMan								
dia 12								
1,78	2,89	2,45	1,58	2,94	3,27	0,38	0,33	0,37
1,25	2,08	2,80	0,88	1,85	2,45	0,33	0,33	0,30
0,78	2,33	2,76	0,73	1,70	2,18	0,38	0,31	0,35
1,95	2,49	2,64	2,61	3,15	3,11	0,38	0,30	0,36
1,32	2,21	3,25	0,95	1,94	2,52	0,34	0,33	0,40
2,02	3,56	2,93	1,17	2,13	2,16	0,39	0,34	0,30
0,89	2,61	3,16	1,64	2,23	3,27	0,34	0,35	0,33
1,94	3,84	2,60	1,13	1,60	1,22	0,36	0,32	0,28
0,71	1,16	2,19	1,01	1,58	2,28	0,37	0,37	0,37
1,07	1,86	2,18	0,87	1,54	1,96	0,38	0,34	0,29
1,34	1,92	1,89	0,54	1,03	1,69	0,40	0,36	0,30
0,72	1,83	2,90	1,31	3,39	2,52	0,36	0,34	0,31
0,88	2,26	2,86	0,57	1,31	1,59	0,38	0,33	0,30
dia 13								
1,38	2,13	2,09	1,01	1,64	1,63	0,30	0,32	0,33
2,26	1,87	2,34	1,87	1,99	2,49	0,31	0,33	0,28
1,70	2,06	2,55	1,57	1,70	2,03	0,28	0,26	0,31
1,15	1,80	2,47	1,52	1,23	1,19	0,34	0,28	0,35
1,30	1,77	1,89	1,11	1,14	1,14	0,25	0,25	0,33
0,91	1,48	1,65	1,13	1,22	1,21	0,32	0,33	0,30
1,28	1,35	1,61	0,63	0,91	1,40	0,18	0,35	0,36
2,07	2,53	2,36	1,14	1,33	1,88	0,35	0,36	0,34
0,73	1,49	2,12	0,49	0,86	1,21	0,35	0,33	0,34
1,10	1,32	1,63	0,75	0,77	1,14	0,37	0,35	0,40
0,51	1,50	2,87	0,49	0,93	1,92	0,33	0,36	0,36
1,18	1,69	2,14	0,98	1,34	1,55	0,34	0,38	0,37
1,02	2,05	2,44	1,36	2,20	2,18	0,36	0,38	0,34
dia 14								
3,52	2,80	2,40	1,71	2,47	2,58	0,25	0,21	0,24
1,78	1,90	1,94	1,65	2,00	1,67	0,19	0,21	0,26
1,27	1,84	2,07	0,94	1,88	2,55	0,17	0,29	0,28
1,48	1,71	2,76	0,91	1,30	2,60	0,16	0,25	0,23
1,02	2,42	3,09	1,17	2,84	3,36	0,24	0,33	0,26
0,88	1,45	1,53	0,69	1,04	1,52	0,23	0,35	0,37
1,01	3,28	3,53	0,91	2,10	3,29	0,19	0,28	0,31
0,96	1,52	2,03	1,66	1,81	1,51	0,25	0,32	0,31
2,14	1,78	1,55	2,14	1,61	1,03	0,23	0,27	0,31
1,34	1,45	2,57	1,90	1,95	2,74	0,18	0,32	0,35
1,60	1,87	2,15	2,65	1,53	1,96	0,29	0,23	0,35
1,41	2,15	2,26	0,85	2,02	2,45	0,26	0,32	0,32
3,07	1,88	1,77	1,71	2,49	2,54	0,25	0,26	0,28

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICM								
dia 1								
1,66	2,11	2,35	1,70	1,13	1,58	0,38	0,36	0,38
1,12	1,13	1,87	1,12	1,92	2,47	0,34	0,33	0,35
1,17	1,10	1,94	0,84	1,83	1,97	0,29	0,34	0,35
1,17	1,76	2,64	1,24	1,61	2,49	0,31	0,34	0,27
1,05	1,11	1,77	0,77	2,27	1,35	0,34	0,34	0,31
1,16	2,30	2,38	0,98	1,89	1,56	0,33	0,35	0,32
1,19	1,86	1,85	1,27	1,81	1,83	0,32	0,34	0,34
1,02	2,04	2,91	1,22	1,16	2,91	0,33	0,36	0,35
1,04	1,51	3,09	0,66	1,12	3,30	0,31	0,33	0,27
1,21	1,68	1,98	1,37	0,96	1,91	0,34	0,36	0,31
1,45	1,49	2,61	1,34	2,03	2,19	0,35	0,33	0,35
1,37	2,81	2,74	1,04	2,19	3,26	0,34	0,28	0,25
0,93	1,94	1,80	1,41	1,47	1,43	0,36	0,35	0,34
dia 2								
1,95	2,10	1,75	0,92	1,50	1,67	0,34	0,37	0,31
1,52	2,23	2,50	1,17	2,00	1,52	0,28	0,34	0,35
1,21	1,57	1,82	1,28	0,70	1,92	0,30	0,30	0,34
1,43	1,83	2,13	1,06	1,73	1,80	0,32	0,30	0,26
1,29	1,85	2,37	0,81	1,88	1,83	0,35	0,36	0,35
0,60	1,40	1,67	0,81	1,39	1,32	0,29	0,25	0,32
0,97	1,95	2,00	1,51	1,36	1,70	0,25	0,31	0,31
0,79	1,68	2,27	0,82	1,77	1,95	0,28	0,28	0,31
0,92	1,39	2,26	0,72	1,34	1,77	0,28	0,23	0,29
1,04	1,65	2,08	0,90	1,28	1,34	0,32	0,27	0,30
0,99	1,69	1,88	1,12	1,30	1,72	0,34	0,31	0,31
1,14	1,38	1,59	1,45	1,18	1,85	0,32	0,25	0,25
1,19	1,42	1,46	1,07	1,09	1,26	0,31	0,33	0,30
dia 3								
1,09	1,74	1,69	0,76	2,09	1,47	0,30	0,35	0,33
1,04	1,60	1,82	1,21	1,65	1,55	0,25	0,31	0,33
1,04	1,84	1,72	1,01	1,17	1,09	0,28	0,35	0,34
1,35	2,00	1,99	1,43	1,36	1,44	0,29	0,32	0,32
1,33	1,55	1,74	0,80	0,69	0,97	0,33	0,29	0,32
1,45	1,67	1,72	0,74	1,57	1,68	0,32	0,34	0,32
1,09	1,33	1,38	0,74	1,33	1,18	0,34	0,30	0,32
1,21	1,69	1,82	1,25	1,39	1,41	0,32	0,30	0,33
1,95	1,88	1,47	1,01	1,57	1,29	0,30	0,31	0,29
0,97	1,30	1,71	0,94	1,37	1,35	0,27	0,31	0,29

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICM								
dia 3								
0,98	1,39	1,47	0,73	1,61	1,73	0,29	0,32	0,34
1,32	1,52	1,45	1,59	1,77	1,47	0,22	0,27	0,30
0,99	2,16	2,42	0,65	2,07	2,06	0,31	0,28	0,32
dia 4								
1,40	2,35	2,82	1,34	1,57	1,15	0,30	0,34	0,39
1,47	1,54	2,47	1,57	1,17	1,78	0,30	0,32	0,35
1,51	1,49	1,92	1,10	1,27	1,55	0,28	0,31	0,27
1,42	1,58	1,80	1,00	1,66	1,37	0,31	0,27	0,31
2,04	1,84	2,74	1,14	1,95	1,47	0,28	0,32	0,35
2,07	2,19	3,16	2,61	1,83	1,67	0,25	0,28	0,33
1,63	1,66	2,04	1,34	1,00	1,24	0,33	0,33	0,33
1,48	1,58	2,96	0,99	0,73	2,27	0,26	0,26	0,27
1,79	2,37	2,61	1,38	1,87	1,58	0,31	0,33	0,34
1,06	1,68	1,81	1,17	1,91	1,75	0,34	0,31	0,31
1,58	2,41	2,07	1,44	1,51	2,13	0,29	0,33	0,33
1,64	2,29	2,36	0,99	1,33	1,47	0,31	0,33	0,29
0,94	1,48	2,00	0,72	1,21	1,34	0,32	0,33	0,31
dia 5								
4,66	3,49	3,00	5,65	3,54	2,69	0,15	0,26	0,30
2,74	3,15	2,46	1,75	2,15	2,15	0,18	0,25	0,30
3,04	3,45	3,06	3,77	2,97	2,15	0,12	0,26	0,28
1,68	1,85	2,26	3,82	1,89	1,41	0,15	0,33	0,34
3,21	1,66	2,14	3,07	2,17	2,14	0,12	0,22	0,27
3,81	3,55	2,74	5,62	5,49	4,36	0,10	0,18	0,25
3,77	3,02	3,00	2,45	2,24	2,57	0,16	0,25	0,24
2,63	4,78	3,24	2,21	4,35	2,86	0,11	0,22	0,26
2,29	3,44	2,31	4,27	4,22	2,59	0,10	0,23	0,27
3,56	3,55	3,16	3,80	2,44	2,87	0,13	0,19	0,27
4,00	3,99	3,39	2,87	3,79	2,75	0,12	0,25	0,25
3,26	3,01	2,55	2,31	2,99	2,80	0,14	0,23	0,26
2,07	3,48	2,63	2,20	3,34	2,69	0,13	0,24	0,23
dia 6								
7,02	8,62	3,92	7,91	6,80	3,63	0,14	0,18	0,29
5,40	3,63	2,84	4,84	3,84	2,29	0,16	0,19	0,27
7,04	5,58	5,36	4,27	2,90	2,55	0,15	0,15	0,27
4,74	4,15	2,82	3,71	3,91	2,57	0,15	0,17	0,25
5,99	5,51	3,79	4,39	4,32	2,72	0,12	0,21	0,26
3,80	4,43	2,60	5,29	3,89	3,46	0,13	0,20	0,34
7,08	3,14	2,29	4,69	1,39	1,81	0,15	0,21	0,27

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICM								
dia 6								
6,04	3,57	2,43	7,11	2,63	2,52	0,15	0,23	0,31
1,75	3,30	2,57	4,15	3,15	2,38	0,15	0,23	0,24
6,52	6,52	5,11	2,64	1,53	1,54	0,13	0,20	0,28
6,97	6,27	5,12	4,03	3,68	4,85	0,15	0,22	0,25
6,60	6,50	5,06	5,08	5,41	4,23	0,11	0,19	0,27
7,47	5,90	3,65	5,60	4,67	4,24	0,15	0,19	0,22
dia 7								
5,95	5,27	3,52	7,42	4,64	3,55	0,15	0,27	0,26
4,11	4,40	4,00	4,61	4,46	3,98	0,16	0,25	0,27
4,62	3,76	3,53	3,71	2,71	2,86	0,16	0,25	0,28
7,66	5,96	5,43	3,12	3,64	3,22	0,17	0,25	0,27
5,49	5,27	3,81	3,32	3,30	2,89	0,14	0,31	0,26
4,10	3,01	2,38	2,92	3,36	2,39	0,15	0,24	0,24
5,85	4,51	3,91	3,40	3,88	2,99	0,16	0,23	0,34
6,02	3,73	3,33	5,38	3,80	2,78	0,15	0,24	0,26
5,45	4,09	3,73	3,52	3,98	2,71	0,13	0,26	0,32
5,93	4,30	3,93	7,28	4,01	2,57	0,16	0,25	0,25
6,34	5,00	3,04	3,42	3,16	2,36	0,18	0,23	0,30
6,58	4,30	3,07	6,11	6,80	4,29	0,17	0,27	0,25
8,17	6,48	4,40	9,63	7,10	6,50	0,15	0,18	0,23
dia 8								
4,99	5,28	2,80	3,93	4,54	3,22	0,18	0,26	0,27
4,72	4,79	2,64	3,49	4,52	3,00	0,17	0,22	0,31
5,85	7,10	3,81	5,60	6,75	4,81	0,17	0,25	0,29
4,05	5,79	3,57	4,86	5,03	4,10	0,18	0,23	0,29
3,50	5,67	3,60	4,36	3,11	2,87	0,16	0,22	0,26
5,32	4,45	2,53	4,16	3,40	2,59	0,18	0,27	0,24
5,31	3,95	3,21	7,09	4,50	2,27	0,25	0,22	0,31
3,48	4,11	3,08	4,04	2,86	2,93	0,24	0,24	0,30
7,42	6,38	4,19	2,88	5,24	3,59	0,16	0,22	0,26
2,85	2,64	2,35	2,23	2,63	2,46	0,28	0,33	0,31
4,62	3,14	2,10	2,99	2,93	2,09	0,18	0,32	0,33
3,39	3,27	2,51	2,42	2,78	2,32	0,18	0,27	0,33
5,45	3,14	3,15	3,82	3,05	2,37	0,18	0,34	0,39
dia 9								
1,08	1,59	2,34	1,04	2,18	2,20	0,31	0,35	0,40
0,95	1,45	2,53	1,00	1,10	1,73	0,21	0,31	0,36
0,96	1,94	3,20	0,80	1,46	1,78	0,31	0,34	0,36
1,22	2,20	2,56	0,86	1,65	1,95	0,27	0,35	0,38

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICM								
dia 9								
1,15	1,83	3,02	0,67	1,21	1,91	0,29	0,36	0,41
1,01	2,73	2,83	0,70	1,78	1,95	0,32	0,36	0,32
1,03	1,66	1,97	0,62	1,40	1,75	0,28	0,37	0,39
1,06	2,41	3,35	0,94	1,71	1,92	0,28	0,36	0,34
0,94	1,65	2,51	0,62	2,28	2,64	0,31	0,42	0,37
1,08	2,31	3,14	0,86	1,57	1,72	0,28	0,30	0,36
0,74	1,66	2,96	0,73	1,63	1,68	0,25	0,38	0,37
1,29	2,47	2,47	0,94	1,62	1,56	0,36	0,35	0,41
1,10	2,84	3,47	1,08	1,98	1,90	0,35	0,39	0,38
dia 10								
2,97	2,23	2,22	2,30	2,08	1,62	0,26	0,40	0,36
1,71	2,33	2,41	1,67	1,88	2,23	0,26	0,37	0,38
2,13	2,70	2,20	2,18	2,64	2,45	0,26	0,35	0,34
1,62	2,44	2,32	1,92	1,83	1,52	0,25	0,35	0,30
2,09	1,86	2,52	2,27	1,92	1,52	0,26	0,31	0,33
1,42	1,74	2,10	1,27	1,11	1,51	0,28	0,34	0,30
1,48	2,19	2,32	1,37	1,54	1,83	0,25	0,35	0,37
1,71	2,49	2,26	1,59	2,19	2,38	0,24	0,35	0,32
1,42	1,67	2,46	1,32	1,58	2,64	0,23	0,34	0,36
1,56	2,02	2,32	1,42	1,86	2,26	0,27	0,34	0,34
1,51	2,06	2,38	1,07	1,57	2,01	0,28	0,34	0,35
3,32	4,65	4,00	2,34	2,05	1,98	0,24	0,32	0,33
1,87	2,68	2,36	1,95	1,68	1,64	0,27	0,35	0,41
dia 11								
2,35	2,15	1,67	1,57	2,64	2,42	0,25	0,34	0,38
2,73	2,72	2,90	2,22	1,84	2,15	0,23	0,30	0,34
4,46	4,22	3,53	3,31	3,13	1,70	0,23	0,34	0,39
3,32	2,35	2,42	2,76	2,47	2,09	0,19	0,33	0,35
3,31	2,99	2,61	1,74	1,28	1,74	0,19	0,30	0,38
2,78	2,84	2,99	2,23	1,46	1,93	0,22	0,28	0,38
1,69	2,00	1,96	2,36	1,81	1,65	0,20	0,32	0,34
2,18	3,01	3,02	2,53	2,65	2,22	0,22	0,36	0,36
2,08	2,78	2,97	2,12	2,60	2,45	0,21	0,32	0,37
1,81	2,85	2,68	2,05	2,41	2,42	0,26	0,33	0,35
2,60	3,23	4,06	2,14	1,96	3,04	0,29	0,39	0,38
3,14	3,59	2,64	1,83	2,07	2,28	0,21	0,37	0,38
1,60	1,68	1,71	1,54	1,84	2,52	0,27	0,35	0,37
dia 12								
0,50	1,23	2,52	0,94	1,83	1,95	0,31	0,32	0,34

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
ICM								
dia 12								
1,52	2,48	3,03	0,91	1,66	1,90	0,41	0,42	0,41
0,89	2,02	2,65	1,08	2,01	2,16	0,42	0,40	0,39
0,78	1,76	2,35	0,69	1,67	2,12	0,37	0,35	0,39
0,87	2,49	3,16	0,69	1,86	1,75	0,38	0,36	0,34
1,35	2,17	2,62	1,19	2,56	2,64	0,37	0,40	0,37
0,82	2,52	2,92	1,03	1,77	2,22	0,37	0,34	0,38
0,81	1,91	3,09	0,75	1,26	2,15	0,37	0,37	0,37
0,80	1,69	2,06	1,26	1,60	2,00	0,30	0,39	0,38
0,77	1,79	2,05	0,41	1,82	2,05	0,30	0,32	0,37
1,95	2,52	2,36	1,03	2,06	2,05	0,34	0,36	0,40
0,94	1,85	2,41	1,05	2,19	2,13	0,35	0,39	0,42
1,27	2,28	2,75	1,70	2,34	2,53	0,37	0,37	0,39
dia 13								
1,43	1,62	1,85	0,92	1,58	1,24	0,23	0,29	0,33
1,29	1,86	1,55	1,10	1,14	1,42	0,32	0,29	0,35
1,32	2,65	2,80	1,00	2,08	1,92	0,32	0,36	0,38
1,12	1,97	3,29	1,08	1,25	2,53	0,26	0,24	0,32
1,15	2,05	2,52	1,22	1,51	2,11	0,28	0,33	0,35
0,46	1,10	2,01	0,82	1,54	1,89	0,26	0,30	0,34
1,08	2,12	2,04	1,71	1,88	1,91	0,28	0,27	0,36
1,10	1,79	2,49	0,55	1,30	1,74	0,28	0,33	0,31
1,23	1,92	2,29	0,94	1,36	1,21	0,31	0,34	0,35
0,84	1,41	1,77	1,08	1,21	1,36	0,25	0,28	0,37
1,30	1,80	2,50	1,08	1,11	1,62	0,24	0,24	0,32
1,04	3,02	2,89	1,08	2,99	2,00	0,21	0,34	0,37
1,06	2,06	2,39	1,16	2,03	1,44	0,25	0,28	0,26
dia 14								
1,68	2,82	2,05	1,49	2,02	1,84	0,23	0,35	0,36
1,57	2,25	2,88	1,55	2,30	2,68	0,23	0,32	0,31
1,50	2,24	2,56	1,26	1,69	1,50	0,25	0,30	0,36
1,37	1,94	2,68	1,19	1,91	2,23	0,27	0,34	0,33
1,32	1,95	2,25	1,53	1,45	1,93	0,25	0,30	0,32
1,27	1,81	2,24	1,17	1,81	1,59	0,17	0,34	0,37
1,11	1,35	1,93	1,06	1,32	1,87	0,26	0,32	0,30
1,18	1,60	1,96	1,44	1,71	1,67	0,28	0,33	0,37
1,10	1,55	1,96	0,92	1,53	1,68	0,25	0,35	0,33
1,26	1,78	2,62	1,43	2,55	2,63	0,19	0,19	0,34
1,40	1,93	1,79	1,50	2,03	2,24	0,25	0,30	0,36
1,78	2,19	1,82	2,67	2,39	2,01	0,32	0,33	0,33
1,20	2,77	2,48	1,42	2,42	2,34	0,26	0,32	0,32

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
3CM								
dia 1								
0,73	1,25	1,92	0,41	1,57	1,55	0,30	0,37	0,31
0,34	3,07	7,18	0,62	3,13	5,39	0,30	0,32	0,21
0,53	1,40	2,38	0,55	1,64	2,16	0,36	0,36	0,36
0,38	1,22	2,70	0,24	1,25	2,53	0,31	0,29	0,25
0,64	1,86	3,00	0,46	1,31	2,58	0,31	0,33	0,32
0,51	1,43	3,45	0,79	0,86	2,98	0,34	0,33	0,30
0,41	1,70	3,35	0,48	2,60	3,98	0,31	0,30	0,26
0,57	1,42	3,85	0,35	1,55	4,22	0,35	0,36	0,26
0,86	3,82	5,63	0,44	3,02	6,36	0,30	0,24	0,16
0,82	2,59	3,15	0,44	2,11	3,10	0,33	0,27	0,27
0,77	2,44	3,15	0,45	2,45	3,02	0,34	0,30	0,28
0,61	1,23	2,80	0,37	0,66	1,48	0,35	0,33	0,26
0,67	2,78	4,77	0,59	2,69	4,38	0,33	0,23	0,24
dia 2								
1,86	2,56	2,12	1,56	1,01	0,92	0,36	0,29	0,30
1,66	1,68	2,66	1,14	1,77	1,46	0,34	0,31	0,30
2,22	2,30	2,89	1,01	1,69	1,86	0,24	0,27	0,30
1,68	2,01	2,62	0,75	1,67	1,83	0,29	0,30	0,31
0,85	1,32	1,24	0,60	0,97	1,09	0,33	0,30	0,32
1,06	1,77	1,46	1,03	1,23	1,23	0,24	0,25	0,31
1,42	1,76	1,92	0,66	0,89	1,58	0,27	0,28	0,32
0,67	1,20	1,46	0,95	1,13	1,16	0,26	0,33	0,35
0,89	1,53	2,05	0,81	1,33	1,44	0,28	0,34	0,33
2,03	1,43	1,88	1,58	1,77	1,79	0,34	0,33	0,38
1,07	1,33	1,33	1,09	1,02	1,43	0,32	0,37	0,32
0,85	1,73	1,82	0,69	0,87	1,10	0,25	0,27	0,25
0,70	0,89	0,90	0,45	0,68	1,06	0,35	0,31	0,32
dia 3								
1,28	1,97	2,14	0,62	0,87	1,02	0,28	0,34	0,33
0,82	1,69	1,70	1,59	1,39	1,26	0,28	0,31	0,34
0,87	1,40	1,35	0,88	0,97	1,25	0,29	0,31	0,29
1,01	1,54	1,59	0,80	0,93	1,16	0,32	0,34	0,35
0,86	1,40	1,29	0,68	1,18	0,94	0,31	0,35	0,38
0,50	1,42	2,30	0,88	1,64	1,48	0,28	0,37	0,34
1,40	1,53	1,47	1,12	1,27	1,11	0,36	0,36	0,38
2,34	2,28	2,09	1,04	1,54	0,92	0,32	0,37	0,36
1,17	1,58	1,90	1,17	1,21	1,21	0,35	0,39	0,39
1,03	1,88	1,86	1,01	1,68	1,28	0,27	0,33	0,36

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
3CM								
dia 3								
0,74	1,33	1,91	1,15	1,22	0,95	0,33	0,35	0,38
0,81	1,39	1,62	0,78	1,23	1,51	0,31	0,30	0,37
2,44	1,72	1,25	1,80	0,86	1,45	0,29	0,33	0,29
dia 4								
2,66	2,67	2,78	2,17	1,35	1,18	0,21	0,27	0,26
1,29	1,91	1,97	1,61	1,71	2,06	0,23	0,29	0,24
1,48	2,46	2,08	0,94	1,27	1,72	0,30	0,34	0,34
2,35	1,74	1,32	1,87	1,34	0,97	0,21	0,29	0,32
1,24	1,55	1,14	1,25	0,78	0,67	0,26	0,35	0,32
1,24	1,57	1,87	0,78	1,06	1,28	0,17	0,29	0,32
1,04	1,46	1,97	0,74	0,93	0,99	0,15	0,23	0,35
1,29	1,64	1,70	1,63	1,66	1,61	0,17	0,26	0,26
1,11	1,00	2,09	1,25	1,96	1,15	0,29	0,26	0,31
1,57	1,79	1,49	1,64	1,83	0,87	0,22	0,26	0,27
1,91	1,99	1,84	4,23	2,32	1,95	0,20	0,26	0,26
1,14	1,57	2,50	2,35	1,15	1,16	0,20	0,27	0,26
0,84	1,27	1,80	0,90	1,23	2,48	0,22	0,25	0,30
dia 5								
7,60	9,76	8,91	3,18	6,00	6,65	0,16	0,23	0,23
4,32	3,60	3,63	1,42	1,82	1,99	0,13	0,17	0,27
1,11	1,73	2,97	3,99	6,18	3,02	0,13	0,22	0,26
3,93	9,99	6,79	5,92	9,10	6,66	0,13	0,21	0,14
7,96	7,13	8,09	9,48	7,32	6,01	0,15	0,21	0,22
6,66	7,08	6,02	5,85	6,24	6,07	0,15	0,22	0,28
3,21	2,33	3,03	3,20	2,51	2,05	0,11	0,19	0,25
5,24	8,64	7,04	5,00	9,71	7,30	0,15	0,22	0,23
2,91	5,08	3,28	3,75	2,49	4,36	0,14	0,18	0,27
3,50	6,08	5,16	4,84	7,71	4,62	0,14	0,18	0,26
6,36	10,61	4,60	6,32	8,24	3,84	0,12	0,19	0,25
3,78	2,49	5,12	1,76	3,90	5,75	0,17	0,16	0,20
2,59	2,07	4,17	4,60	4,35	5,00	0,15	0,18	0,23
dia 6								
6,96	6,45	5,18	2,83	3,04	2,79	0,14	0,19	0,26
3,74	4,52	3,33	6,88	4,71	2,07	0,13	0,18	0,19
8,02	6,16	4,98	8,11	4,99	4,25	0,13	0,20	0,20
8,12	0,20	3,56	6,05	9,38	4,84	0,13	0,14	0,18
5,69	5,23	3,01	3,31	3,51	3,38	0,15	0,18	0,19
5,76	7,92	7,84	7,68	7,23	6,16	0,11	0,16	0,18
11,12	9,29	5,99	7,82	9,00	6,48	0,19	0,25	0,31

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
3CM								
dia 6								
5,41	7,38	5,67	9,59	8,71	6,81	0,19	0,20	0,21
6,47	8,03	4,38	6,51	5,65	3,59	0,21	0,26	0,23
5,67	6,97	5,44	9,19	8,37	5,09	0,09	0,19	0,22
8,11	5,34	3,07	8,04	8,22	5,03	0,16	0,19	0,25
6,58	7,73	4,41	1,32	4,58	6,38	0,11	0,17	0,24
2,87	3,80	2,63	7,25	6,38	3,82	0,10	0,21	0,20
dia 7								
9,16	10,27	11,52	4,82	10,31	11,41	0,11	0,17	0,19
6,80	7,56	7,08	12,10	12,64	7,56	0,16	0,17	0,18
6,87	11,98	8,09	9,62	10,76	7,07	0,15	0,14	0,14
7,74	7,58	8,61	4,71	5,98	8,40	0,14	0,16	0,18
8,89	11,37	5,05	4,36	7,28	8,07	0,14	0,21	0,22
5,17	8,48	7,93	7,34	12,55	7,31	0,13	0,15	0,21
8,03	8,22	6,55	7,07	9,19	6,49	0,13	0,22	0,22
7,60	8,20	5,04	6,56	10,72	6,77	0,14	0,16	0,19
5,31	8,50	7,68	4,82	3,00	3,30	0,11	0,18	0,19
8,99	9,21	10,27	6,33	4,22	2,58	0,13	0,15	0,14
7,78	6,86	4,74	3,45	2,55	3,22	0,13	0,15	0,26
3,85	6,23	8,05	6,76	5,82	6,51	0,12	0,15	0,14
5,23	6,65	4,49	4,30	3,58	2,07	0,12	0,20	0,26
dia 8								
9,70	6,19	6,08	9,56	5,36	3,62	0,15	0,16	0,21
4,17	4,74	4,76	9,16	12,02	9,70	0,13	0,20	0,20
10,21	10,34	7,67	10,83	10,64	5,12	0,14	0,18	0,20
8,73	9,90	8,98	10,05	10,18	5,03	0,13	0,17	0,22
7,45	3,76	2,78	9,53	6,55	6,40	0,16	0,16	0,20
1,80	6,52	5,53	5,63	8,44	6,36	0,13	0,16	0,23
9,03	10,48	5,66	11,44	8,78	5,45	0,13	0,17	0,23
5,87	7,93	3,54	4,50	6,90	6,62	0,13	0,19	0,20
8,75	9,20	5,05	3,32	4,49	4,23	0,13	0,18	0,21
7,81	9,67	6,60	3,04	5,47	6,51	0,14	0,15	0,19
4,97	7,76	4,91	9,88	10,21	5,99	0,15	0,13	0,16
7,93	11,88	9,30	2,10	6,05	4,62	0,14	0,12	0,19
2,25	3,56	5,42	1,99	4,50	5,05	0,10	0,15	0,17
dia 9								
1,76	2,60	1,66	1,19	1,91	1,60	0,30	0,31	0,35
1,42	2,53	2,07	1,06	1,64	1,72	0,30	0,35	0,35
1,46	1,52	1,68	1,12	1,25	1,32	0,31	0,33	0,32
1,08	1,90	2,53	0,73	1,40	1,60	0,18	0,28	0,34

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
3CM								
dia 9								
0,75	1,88	2,98	0,82	2,15	1,82	0,32	0,36	0,35
0,81	2,09	2,65	0,84	1,40	2,26	0,28	0,36	0,34
0,54	1,55	2,07	0,80	1,34	1,67	0,31	0,40	0,38
0,97	1,56	2,60	0,57	1,07	1,48	0,29	0,31	0,31
0,89	1,41	2,28	0,83	1,16	1,84	0,27	0,35	0,34
0,92	1,68	2,89	0,93	1,71	1,77	0,24	0,33	0,34
0,79	2,18	2,37	0,69	1,92	1,90	0,23	0,33	0,38
1,17	2,01	2,49	0,92	1,87	2,79	0,34	0,32	0,35
1,62	1,90	2,99	1,29	1,77	2,19	0,31	0,29	0,37
dia 10								
2,10	2,16	2,62	2,21	2,14	1,74	0,28	0,30	0,24
1,64	1,86	2,24	1,45	2,36	1,74	0,22	0,30	0,30
3,27	4,28	3,37	4,51	2,75	1,42	0,23	0,28	0,24
2,47	2,34	1,70	2,70	1,63	1,57	0,22	0,30	0,29
2,05	1,99	1,92	1,51	1,40	2,05	0,31	0,28	0,38
1,32	1,54	1,97	2,14	2,14	2,50	0,26	0,29	0,36
1,56	1,89	2,72	1,17	1,64	1,72	0,17	0,29	0,31
1,94	1,71	2,09	1,47	1,30	2,10	0,23	0,29	0,30
1,10	1,45	2,29	1,09	2,30	1,81	0,18	0,26	0,39
1,89	2,26	2,39	1,01	2,21	2,19	0,18	0,29	0,28
0,99	1,59	2,35	1,92	1,54	2,45	0,24	0,31	0,33
1,56	1,52	1,98	1,30	1,36	1,87	0,21	0,30	0,32
1,57	1,24	2,97	1,96	1,34	2,39	0,24	0,30	0,37
dia 11								
2,37	3,35	4,29	1,19	2,88	3,67	0,41	0,38	0,37
2,02	3,22	3,27	1,59	2,53	3,39	0,34	0,34	0,39
1,25	2,74	3,41	1,29	2,02	2,66	0,38	0,38	0,36
1,63	3,02	3,65	1,66	2,56	2,92	0,35	0,36	0,31
1,27	2,02	2,67	1,13	1,61	2,65	0,33	0,36	0,39
1,35	2,21	2,97	1,19	1,69	2,27	0,38	0,36	0,35
1,22	1,83	2,27	1,01	1,69	2,01	0,32	0,32	0,33
1,19	1,64	1,52	0,80	1,15	2,01	0,35	0,35	0,37
1,48	2,71	2,87	0,90	1,25	2,04	0,36	0,34	0,35
1,37	1,66	2,04	1,12	1,28	2,49	0,30	0,25	0,33
1,43	1,71	2,08	1,15	1,09	1,78	0,40	0,37	0,34
1,32	2,15	3,33	0,81	1,05	1,64	0,32	0,35	0,31
1,02	1,22	2,40	1,12	1,51	2,38	0,31	0,34	0,38
dia 12								
1,10	1,92	2,27	0,60	0,83	1,35	0,30	0,32	0,34

ANEXO A – Medições de RP de todas as parcelas para cada dia e profundidade.(Continuação)

Profundidade (m)								
0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3	0 a 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,3
Manual			Automático			$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
RP (Mpa)								
3CM								
dia 12								
1,00	1,63	2,45	0,86	1,55	2,28	0,32	0,35	0,36
1,13	2,20	3,00	0,94	1,28	2,23	0,34	0,37	0,39
1,16	1,80	3,25	2,02	2,61	1,81	0,33	0,32	0,37
1,10	2,03	2,45	0,49	1,33	1,62	0,28	0,34	0,34
1,83	1,59	2,58	1,41	2,78	3,82	0,34	0,35	0,36
1,68	4,96	4,77	1,64	3,84	3,06	0,30	0,36	0,32
1,98	3,69	3,28	2,04	2,71	2,50	0,28	0,36	0,32
3,39	3,54	3,26	1,25	1,66	1,70	0,28	0,33	0,35
1,08	1,77	2,56	0,48	2,55	3,53	0,31	0,33	0,30
1,01	1,75	2,56	1,23	1,87	1,93	0,36	0,26	0,29
0,91	1,53	3,20	0,73	1,79	1,47	0,29	0,31	0,28
0,79	2,35	3,22	0,82	2,38	2,29	0,28	0,32	0,35
dia 13								
2,65	1,97	2,26	2,51	2,98	2,59	0,27	0,28	0,38
1,25	2,23	2,09	1,21	1,42	1,46	0,27	0,36	0,32
2,07	4,46	4,46	1,28	2,22	3,38	0,27	0,24	0,31
1,81	2,37	2,68	1,61	2,05	2,15	0,17	0,33	0,29
1,60	1,37	1,84	2,44	1,83	1,16	0,26	0,33	0,35
1,45	2,03	2,65	1,83	2,42	2,20	0,32	0,34	0,37
1,45	1,91	2,99	1,18	1,18	2,12	0,29	0,34	0,36
1,90	2,25	2,57	1,49	1,25	2,11	0,28	0,32	0,38
1,06	1,47	2,68	0,85	1,16	1,69	0,30	0,33	0,38
0,59	1,67	2,59	2,13	2,54	2,70	0,26	0,26	0,26
1,36	1,74	2,76	1,41	1,94	1,90	0,31	0,32	0,30
2,37	2,62	3,79	1,71	1,24	1,85	0,33	0,33	0,32
1,66	1,95	2,54	1,50	1,39	1,30	0,33	0,35	0,41
dia 14								
1,19	2,09	2,22	1,56	2,23	2,35	0,22	0,29	0,31
1,24	3,78	4,52	1,22	2,77	3,53	0,24	0,29	0,27
2,60	2,80	4,01	1,46	2,21	2,46	0,20	0,26	0,24
2,02	1,46	1,84	1,98	1,34	1,09	0,21	0,29	0,31
0,69	1,38	2,45	0,88	1,54	2,27	0,18	0,32	0,34
1,63	3,43	3,14	1,52	4,26	3,36	0,20	0,31	0,27
0,70	1,53	2,57	1,46	1,58	1,43	0,15	0,28	0,25
1,40	1,92	1,88	1,19	1,46	1,66	0,28	0,36	0,32
1,85	1,77	1,87	0,46	1,76	1,52	0,14	0,34	0,37
3,76	2,85	2,48	2,07	2,44	1,25	0,22	0,24	0,21
0,97	2,44	2,31	1,22	1,65	1,71	0,18	0,31	0,33
2,25	2,50	2,69	1,96	2,17	1,07	0,25	0,32	0,32
1,89	3,19	3,52	1,49	2,82	3,01	0,23	0,34	0,33

ANEXO B – Dados de temperatura, precipitação, armazenamento, evapotranspiração real, déficit hídrico e excedente hídrico do período das medições de RP no ano de 2012

Período (Semana)	Temperatura Média	Precipitação	Armazenamento	Evapotranspiração Real	Déficit Hídrico	Excedente Hídrico
	(°C)			(mm)		
26/12 a 01/01	24,0	34,3	73,0	30,0	0,0	0,0
02/01 a 08/01	24,1	29,0	72,0	30,0	0,0	0,0
09/01 a 15/01	23,3	37,0	81,0	28,0	0,0	0,0
16/01 a 22/01	23,7	81,1	125,0	30,0	0,0	7,0
23/01 a 29/01	23,0	72,2	125,0	28,0	0,0	45,0
30/01 a 05/02	24,1	0,0	98,0	27,0	3,0	0,0
06/02 a 12/02	25,9	90,0	125,0	34,0	0,0	29,0
13/02 a 19/02	23,7	21,0	118,0	28,0	0,0	0,0
20/02 a 26/02	24,5	14,6	104,0	29,0	2,0	0,0
27/02 a 04/03	25,6	37,6	108,0	33,0	0,0	0,0