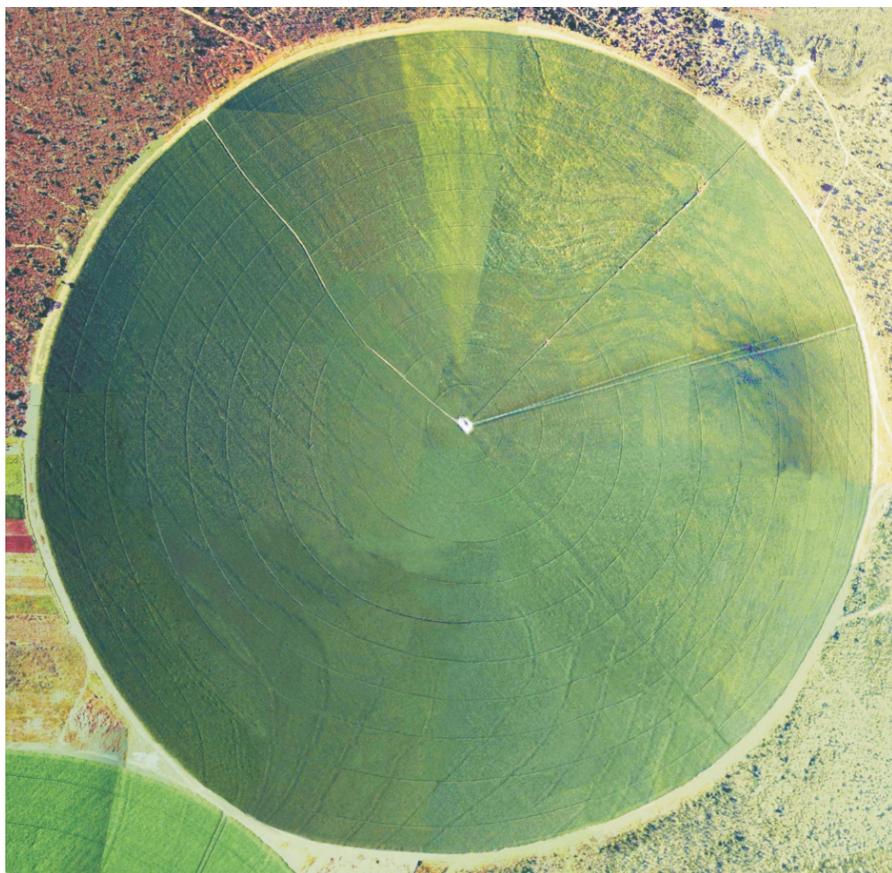


Compactação do Solo e Produtividade da Cultura da Soja em Área Irrigada no Cerrado



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 177

Compactação do Solo e Produtividade da Cultura da Soja em Área Irrigada no Cerrado

Marcos Aurélio Carolino de Sá

Luciano Shozo Shiratsuchi

Cláudio Alberto Bento Franz

João de Deus Gomes dos Santos Junior

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretário-Executivo: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Revisão de texto: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufê*

Tratamento de ilustrações: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Foto da capa: *Marina de Fátima Vilela*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*
Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Embrapa Cerrados

C736 Compactação do solo e produtividade da cultura da soja em área irrigada no Cerrado / Marcos Aurélio Carolino de Sá ... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2007. 31 p.— (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 177)

1. Compactação do solo. 2. Soja. I. Sá, Marcos Aurélio Carolino de. II. Série.

631.4 - CDD 21

© Embrapa 2007

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	13
Conclusões	26
Agradecimentos	27
Referências	27

Compactação do Solo e Produtividade da Cultura da Soja em Área Irrigada no Cerrado

Marcos Aurélio Carolino de Sá¹

Luciano Shozo Shiratsuchi²

Cláudio Alberto Bento Franz³

João de Deus Gomes dos Santos Junior⁴

Resumo

A compactação do solo foi avaliada e correlacionada com a produtividade de soja irrigada (safra 2006) sob plantio direto em dois solos: Latossolo Vermelho Amarelo textura média (LV) e Neossolo Quartzarênico (RQ) na região de Luis Eduardo Magalhães, Bahia, Brasil. Ensaio de campo e laboratório para determinação do Índice de Cone (IC) foram conduzidos, sendo ajustados modelos de IC em função de θ (conteúdo de água volumétrico), Ds (densidade do solo) e argila. Ensaio de laboratório proporcionaram modelos com R² mais elevados. Para caracterização da compactação do solo com base no IC, é importante estabelecer as relações matemáticas entre IC e atributos do solo, como Ds, θ e teor de argila. Tanto o LV quanto o RQ sob Cerrado apresentaram valores mais baixos de Ds e IC em conteúdo de água equivalente à capacidade de campo (Potencial de água no solo = -6 kPa). Na área cultivada com teor de argila superior a 160 g/kg (LV), apenas alguns locais apresentaram valores de IC superior a 2 MPa para o mesmo conteúdo de água no solo. Não foi constatada redução na produtividade de soja em função da compactação do solo.

Termos para indexação: mapeamento, índice de cone, agricultura de precisão

¹ Eng. Agrôn., D.Sc., Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

² Eng. Agrôn., M.Sc., Embrapa Cerrados, shozo@cpac.embrapa.br

³ Eng. Agríc., M.Sc., Embrapa Cerrados, franz@cpac.embrapa.br

⁴ Eng. Agrôn., D.Sc., Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

Soil Compaction and Soybeans Yield in an Irrigated Field at Cerrado

Abstract

Soil compaction was evaluated and correlated with soybeans yield under no-till system (2006 harvest). Two soil types, an Ustox (LV) and Quartzipsamment (RQ) from Luis Eduardo Magalhães region, Bahia, Brazil were studied. Field and laboratory trials were done to evaluate cone index (CI) that were used to adjust mathematical regression models of CI in function of three essential parameters like θ (volumetric soil water content), D_s (soil density) and clay content. The R^2 parameter of the models were larger in laboratory data than in field data. Soil compaction characterization by CI is possible when mathematics relationships between IC and soil attributes, like D_s , θ and clay content were known. LV and RQ under Cerrado vegetation have D_s e CI lower than agricultural cultivated fields, when θ is equal to field capacity (soil water potential = -6 kPa). In part of cultivated field, with clay content larger than 160 g/kg (LV) were detected some places with CI higher than 2 MPa at field capacity. There was no effect of soil compaction at soybeans yield.

Index terms: soil mapping, soil mechanical resistance, precision agriculture

Introdução

A necessidade de intensificar a produção de maneira competitiva tem resultado na utilização de máquinas cada vez maiores e com mais peso e potência, com maior capacidade operacional. A falta de critério técnico, como a desconsideração das características de cada solo ou mesmo o teor de água adequado para o tráfego, pode agravar os problemas de compactação. Em sistemas agrícolas de sequeiro, as camadas compactadas aumentam o risco de susceptibilidade das culturas a veranicos, comuns no Bioma Cerrado. Em sistemas irrigados, aumenta a necessidade de água para as culturas, resultando em maior consumo de água e energia. Também predispõe o solo à erosão, pela degradação da sua estrutura, que contribui para diminuição da infiltração de água e aumento do escoamento superficial. Nos casos mais drásticos, pode haver rompimento de terraços, resultando em perdas de água e solo e, conseqüentemente, assoreamento e poluição de cursos d'água.

Para caracterizar as camadas compactadas num perfil de solo, têm-se usado métodos empíricos, como a abertura de trincheiras, ou mesmo ensaios de resistência à penetração e avaliações de densidade. Entretanto, é necessário o conhecimento de uma série de fatores associados ao solo e ao crescimento de plantas para sua correta interpretação. A utilização de atributos físicos do solo que afetam indiretamente o crescimento de plantas (textura, agregação, densidade e porosidade do solo) contribui pouco para o entendimento de seus efeitos no crescimento vegetal, caso a relação com fatores que afetam diretamente esse crescimento (energia de retenção da água pelo solo, aeração, resistência à penetração, temperatura) não seja estabelecida ([LETEY, 1985](#)).

Cerca de 90 % da água disponível para as plantas está retida entre as tensões de 6 a 100 kPa. Apenas 24 mm de água são disponíveis numa camada de 30 cm de solo nos Latossolos e somente 9 mm nos Neossolos Quartzarênicos, quantidades insuficientes para contrapor as altas taxas de evapotranspiração em períodos de veranicos, muito freqüentes na estação chuvosa ([RESCK; SILVA, 1990](#)). Com a compactação desses solos, a quantidade de água disponível tende a diminuir ([SILVA; KAY, 1997](#)), por

causa da deterioração da estrutura ([PEDROTTI et al., 2001](#)). Nesse contexto, quando a compactação atinge níveis críticos, ela assume relevância nas relações físicas, químicas e biológicas do solo que afetam o crescimento de plantas ([BEUTLER; CENTURION, 2003](#)), resultando em menor produtividade das culturas ([UNGER; KASPAR, 1994](#)).

A caracterização da compactação e sua relação com o crescimento das raízes e produtividade apresenta limitações, pois a resistência à penetração expressa pelo índice de cone (IC) varia em função do teor volumétrico de água (θ), densidade do solo (Ds), teor de argila e matéria orgânica ([BUSSCHER, 1990](#); [BUSSCHER et al., 1997](#); [ROSOLEM et al., 1999](#); [IMHOFF et al., 2000](#)). O aumento de θ diminui o IC, em razão do efeito lubrificante da água ao redor das partículas de solo, enquanto o aumento da Ds - resultado da compactação e degradação da estrutura – aumenta o IC. No caso da textura, solos muito argilosos apresentam maior IC por apresentar maior coesão entre as partículas ([PEDROTTI et al., 2001](#)). Sendo o IC alterado por tantos fatores, alguns autores têm proposto modelos empíricos para descrevê-lo, no qual o mais utilizado é o de Busscher (1990), que propôs uma relação potencial do IC em função do teor de água e densidade: $IC = a\theta^{-b} Ds^c$, onde **a**, **b** e **c** são parâmetros da regressão. Uma vez estabelecida esta relação, ela será válida para um solo específico, ou solos com textura, mineralogia e teores de matéria orgânica semelhantes. Entretanto, a maioria das informações disponíveis na literatura diz respeito a solos de clima temperado ou de regiões brasileiras que não pertencem ao Bioma Cerrado.

Quanto à relação entre o IC e o crescimento radicular, ela depende da espécie vegetal ou mesmo da cultivar em estudo. Valores de 2 MPa são citados por [Spivey et al. \(1986\)](#) como limitantes, enquanto valores de 2,5 MPa por Unger e Kaspar (1994). Beutler e Centurion (2003) sugerem como limitantes valores de 1,3 a 4,0 MPa, mas constataram que a produção de grãos de soja é reduzida em valores de IC entre 1,66 MPa e 3,05 MPa. Sendo o IC variável em função da Ds e θ , surge o conceito de “densidade crítica”, que é a densidade cujo valor de IC limita o crescimento radicular em função de θ ([IMHOFF et al., 2000](#)). Considera-se o solo como degradado quando o IC apresenta valor limitante num teor de água próximo

à capacidade de campo. A interpretação de uma simples avaliação de resistência à penetração feita no campo requer o conhecimento de uma série de atributos do solo e suas inter-relações, principalmente se o objetivo for a tomada de decisão sobre a necessidade ou não de alguma operação para descompactação ou recuperação de sua boa condição física. Também, muitas vezes, o solo apresenta valores altos de resistência à penetração com raízes crescendo ao longo de bioporos, formados pela meso e macrofauna e por raízes mortas ([WILLIAMS; WEIL, 2004](#)). A resistência à penetração pode apresentar variabilidade espacial ao longo do perfil ([SANTI et al., 2005](#)), fato que pode limitar o crescimento de raízes em alguns pontos do perfil, mas permiti-lo em outros.

A variabilidade espacial do IC foi relatada em alguns trabalhos ([SILVA JÚNIOR; MOLIN, 2001](#); [SOUZA et al., 2006](#)). O conhecimento desta variabilidade, aliado às ferramentas da agricultura de precisão, possibilita o manejo localizado da compactação, o que apresentaria custos substancialmente menores quando comparado a uma operação em área total. Essa forma de manejo localizado é uma das vantagens que justificam a implementação da agricultura de precisão ([MOLIN, 2002](#); [LUCHIARI JÚNIOR et al., 2004](#)).

O objetivo deste trabalho é caracterizar e espacializar a compactação do solo em área de produção de grãos irrigada sob plantio direto, correlacionando-a com a produtividade de soja.

Material e Métodos

O estudo foi realizado na fazenda Maria das Águas Santas, Município de Luis Eduardo Magalhães, BA, com apoio do Clube de Plantio Direto do Oeste da Bahia. O clima é tipo Aw, segundo a classificação climática de Köppen, com temperatura média entre 19 °C e 28 °C e pluviosidade média inferior a 2.000 mm/ano ([AMBIENTE BRASIL, 2005](#)). O relevo é de suave ondulado a plano, e a região está localizada no quadrante nordeste do Bioma Cerrado. Foi avaliada uma área de produção comercial de grãos com 105 ha em sistema de plantio direto há 15 anos e irrigada por pivô central. Essa área está localizada a 11° 46' 55" Sul e 45° 40' 8" Oeste,

830 m de altitude, sob dois tipos de solos bem definidos, sendo aproximadamente 40 ha de Latossolo Vermelho-Amarelo textura média (LV) com teor de argila superior a 160 g/kg e 65 ha de Neossolo Quartzarênico (RQ), com teor de argila inferior a 160 g/kg (EMBRAPA, 1999) e declividade média em torno de 5 %.

Os ensaios de campo e as coletas de solo foram feitos na primeira quinzena de novembro de 2005, na área cultivada (pivô) e em duas áreas de Cerrado strictu-sensu adjacente (LV Cerrado e RQ Cerrado). Por ocasião da amostragem, na área do pivô estava plantada a cultura da soja, a qual se encontrava no estágio V2. Foram amostrados 21 pontos na área do pivô (Fig. 1A), sendo 9 no LV e 12 em RQ. No LV e RQ sob Cerrado, foram amostrados três pontos, respectivamente.

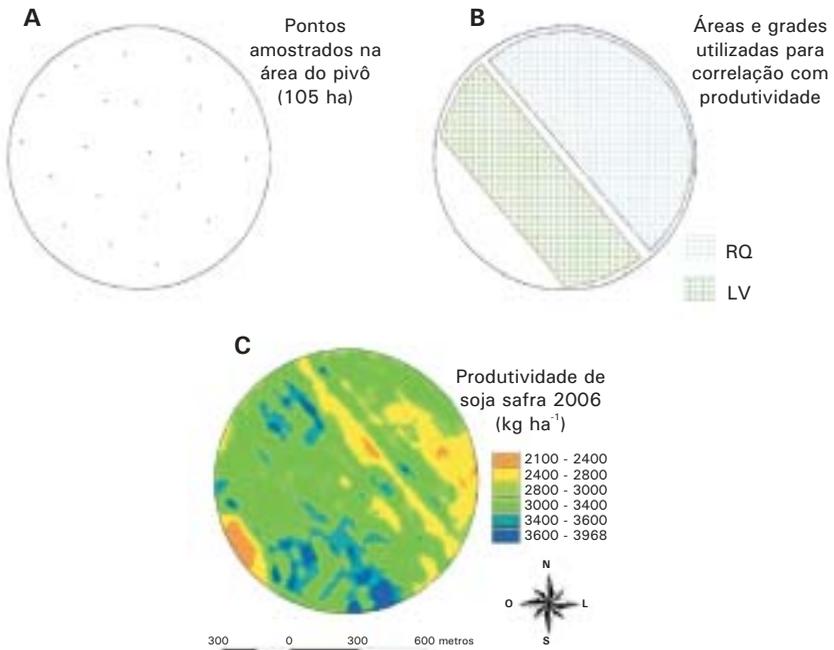


Fig. 1. Representação dos pontos amostrados no pivô de 105 ha (A) e das áreas utilizadas para correlação entre produtividade e atributos do solo no Latossolo e no Neossolo Quartzarênico (B) e mapa de produtividade de soja (C).

Em cada ponto amostrado, foram feitos ensaios de resistência à penetração, em três repetições, utilizando - se penetrógrafo dinamométrico com haste de 60 cm de comprimento e ponta cônica padrão ASAE, com semi-ângulo de 30° e base de 1,28 cm². A resistência à penetração foi determinada no perfil do solo a cada 5 cm de profundidade e expressa pelo índice de cone (IC) em MPa, sendo utilizada para análise dos dados as médias das três repetições em cada profundidade. O penetrógrafo utilizado permite leituras máximas de 7,5 MPa.

Em cada ponto, foram também coletadas amostras indeformadas em uma única repetição e a cada 5 cm de profundidade, para determinação da densidade (Ds) e conteúdo volumétrico de água (θ). Também foram coletadas amostras na camada 0 cm - 20 cm para determinação da textura e carbono orgânico, sendo os resultados multiplicados por 1,724 e expressos em matéria orgânica, conforme [Embrapa \(1999\)](#). Foram escolhidos três pontos na área cultivada (89, 138 e 211 g/kg de argila). Em cada ponto, foram coletados anéis volumétricos de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro nas camadas 2,5 – 7,5 cm; 12,5 – 17,5 cm; 22,5 – 27,5 cm e 32,5 – 37,5 cm, sendo cinco anéis por camada, perfazendo um total de 20 anéis volumétricos por ponto. Desses, um anel volumétrico de cada camada em cada ponto foi utilizado para determinação da curva característica de retenção de água no solo pelo método da centrífuga, conforme [Freitas Júnior e Silva \(1984\)](#). Os demais foram utilizados em ensaios de resistência à penetração em laboratório. Para tanto, as amostras foram saturadas por capilaridade em bandejas com água, pesadas e colocadas em câmara de Richards a um potencial mátrico (Ψ_m) de - 6 kPa (equivalente à capacidade de campo). Após equilíbrio, foram pesadas para determinação do conteúdo de água, sendo separadas uma amostra de cada ponto e profundidade para determinação imediata da resistência à penetração em laboratório. As demais foram colocadas para secar ao ar, sendo que, a cada três dias, uma amostra de cada ponto e profundidade foi pesada e submetida ao mesmo teste de resistência à penetração. Para tanto, foi utilizado um penetrômetro dinamométrico adaptado e calibrado para esta finalidade, conforme descrito em [Sá e Santos Junior \(2005\)](#). Após os ensaios, as amostras foram secadas em estufa a 105 °C por 24 horas para pesagem e cálculo da densidade (Ds) e conteúdo volumétrico de água (θ).

Para os dados oriundos dos ensaios de campo e laboratório, foram ajustados modelos matemáticos de regressão não linear, para IC em função de θ e ou D_s , conforme [Buscher \(1990\)](#). Considerando-se a variabilidade espacial do teor de argila na área cultivada (camada 0 cm – 20 cm), esse parâmetro foi adicionado aos modelos, visando melhorar seu ajuste. O mesmo não foi feito para o teor de matéria orgânica, uma vez que ela apresenta grande variação no perfil do solo em relação à profundidade ([RESENDE et al., 2002](#)), razão pela qual não foi incluída nos modelos. O ajuste dos modelos foi feito com o procedimento REGRGN do aplicativo estatístico SAEG5.EXE®, que utiliza algoritmo baseado no princípio de Gauss-Newton.

Para a área cultivada, foram estabelecidos mapas de argila e matéria orgânica na camada 0 cm – 20 cm, D_s e ICs, sendo estes últimos corrigidos para θ equivalente aos potenciais mátricos (Ψ_m) -6 kPa (capacidade de campo), -33 kPa e -1500 kPa (ponto de murcha permanente). Tais mapas foram criados apenas para as três profundidades onde foram constatados valores mais elevados de IC. Também foram estabelecidos mapas de IC acumulado ou IC_{ac} (somatório dos IC corrigidos para θ na capacidade de campo observados a cada 5 cm até a profundidade de 55 cm) e profundidade de ocorrência dos valores mais elevados de IC (Prof $IC_{m\acute{a}x}$), este também corrigido para θ equivalente à capacidade de campo. Para criação dos mapas, foi utilizado o aplicativo SSToolbox®, utilizando-se o inverso da distância (peso 2) para interpolação dos dados, uma vez que o número de pontos amostrados (menor do que 50) inviabiliza uma análise confiável por krigagem.

Para determinação da produtividade da soja ([Fig. 1](#)), foi utilizada uma colhedora MF 34 equipada com sensores de produtividade e GPS. Os sensores fazem medições da produtividade a cada 2 segundos, acoplado a cada medição a coordenada geográfica da produtividade, armazenando os dados em cartão de memória para geração de um mapa de produtividade a posteriori. Os mapas de produtividade foram interpolados pelo método da krigagem ordinária pontual. Foram estabelecidas correlações lineares de

Pearson entre produtividade e teor de argila e MO, IC_{ac} , e $ProfIC_{m\acute{a}x}$, Ds e IC, sendo os dois últimos nas três camadas avaliadas, tanto na área total do pivô quanto para as manchas de solo (LV e RQ cultivado). Os valores de produtividade utilizados para correlação foram obtidos da média de produtividade dos valores dos pixels de 5 m x 5 m dos mapas de produtividade num raio de 100 metros ao redor do ponto de amostragem de solo. Essa média foi calculada com o aplicativo SSToolbox®.

A correlação entre mapas (dados interpolados) foi feita em grades de 20 m x 20 m, nas áreas de LV cultivado, RQ cultivado e área total do pivô (LV+RQ) ([Fig. 1 B](#)). Neste caso, foi utilizada uma superfície de correlação menor para o LV cultivado em razão de problemas operacionais que resultaram na perda de dados de produtividade durante a colheita da soja, sendo eliminada a área onde ocorreu o problema (área em branco, [Fig. 1B](#)).

Resultados e Discussão

A representação gráfica do IC determinado a campo para o LV e RQ nas condições de solo cultivado e Cerrado nativo é apresentada na [Fig. 2 A](#), onde a linha pontilhada representa o valor de 2 MPa, no qual, segundo [Spivey et al. \(1986\)](#) e [Beutler e Centurion \(2003\)](#), ocorre impedimento ao crescimento de raízes para a maioria das culturas. De maneira geral, os valores mais elevados de IC para as condições em que foram realizados os ensaios foram observados para o LV sob Cerrado, e os mais baixos para o RQ sob Cerrado, ficando o LV e o RQ cultivados em posição intermediária. A análise dos dados de IC sem correção para conteúdo de água do solo poderia levar à falsa conclusão de que o LV sob Cerrado estaria mais compactado. Entretanto, ao se observar o comportamento da densidade do solo nos perfis estudados ([Fig. 2B](#)), constata-se que os valores foram substancialmente mais elevados nos perfis de solo cultivados em relação à condição nativa, o que pode ser atribuído ao uso/manejo do solo, conforme relatado em diversos estudos ([KLEIN et al., 1998](#); [COSTA et al., 2003](#); [OLIVEIRA et al., 2003](#); [CAVALIERI et al., 2006](#)).

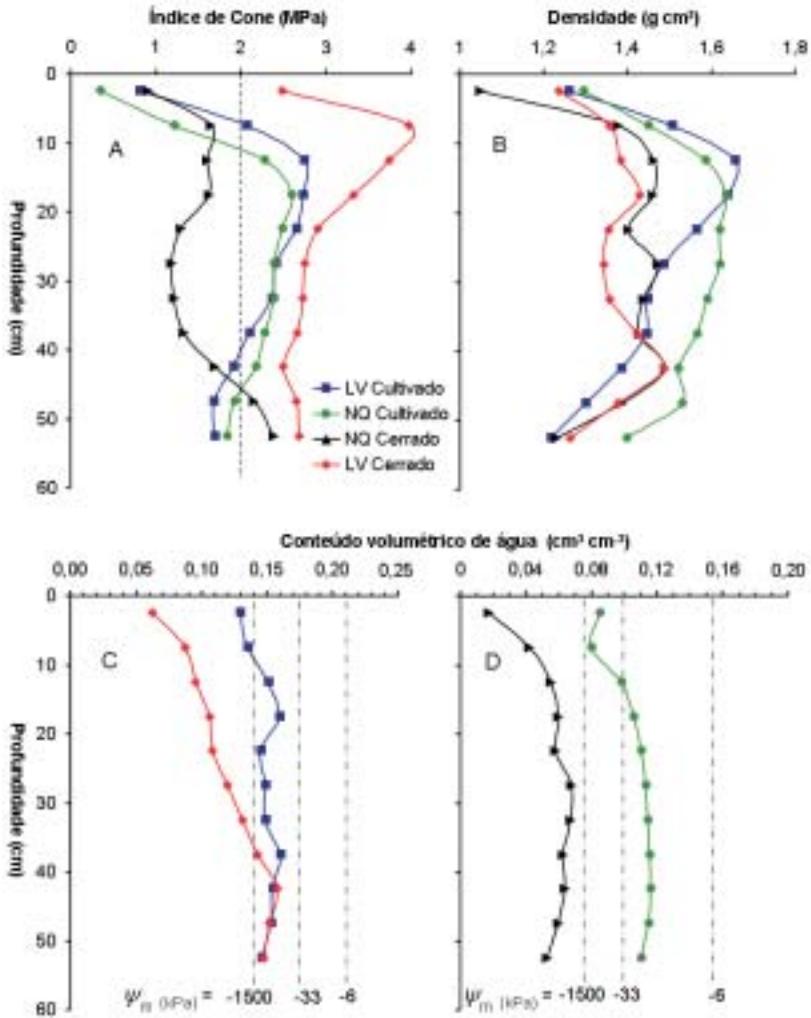


Fig. 2. Representação gráfica no perfil do solo do índice de cone determinado a campo, onde a linha pontilhada representa o limite ao crescimento de raízes (A), da densidade aparente (B), e do conteúdo de água no solo durante a realização dos ensaios, no Latossolo Vermelho-Amarelo (C) e no Neossolo Quartzarênico (D), onde as linhas pontilhadas representam o potencial mátrico em cada solo (ψ_m em kPa). Cada curva representa a média de 9 observações no LV cultivado; 12 observações no RQ cultivado e 3 observações RQ e LV Cerrado.

A relação entre a resistência mecânica do solo à penetração expressa pelo IC é inversamente proporcional ao conteúdo de água e diretamente proporcional a densidade do solo, fato amplamente relatado na literatura ([BUSSCHER, 1990](#); [BUSSCHER et al., 1997](#); [KLEIN et al., 1998](#); [IMHOFF et al., 2000](#); [LEÃO et al., 2004](#); [CAVALIERI et al., 2006](#)). Assim, os valores mais elevados de IC observados para o LV sob Cerrado podem ser explicados pelos valores de θ mais baixos em relação ao LV cultivado. Nos 35 cm superficiais, o LV sob Cerrado apresentou valores de θ mais baixos do que os valores equivalentes ao ponto de murcha permanente ($\Psi_m = -1500$ kPa), enquanto no LV cultivado, por efeito da irrigação, o conteúdo de água volumétrico na maior parte do perfil do solo se apresentava em potenciais entre -33 e -1500 kPa ([Fig. 2C](#)).

O RQ sob Cerrado apresentou em todo o perfil avaliado valores de θ mais baixos do que os observados no ponto de murcha, contrário ao RQ cultivado. Entretanto, mesmo com θ tão baixo no RQ sob Cerrado, os valores de IC nesta condição foram substancialmente menores do que os observados para o LV sob Cerrado, o que pode ser atribuído às diferenças nos teores de argila ([Fig. 2A](#)). [Rosolem et al. \(1999\)](#) também constataram maior resistência à penetração em solos com teor de argila mais elevado. De acordo com [Pedrotti et al. \(2001\)](#), isso ocorre porque a fração argila contribui para aumentar a coesão entre as demais partículas do solo, o que aumenta a resistência à penetração.

Visando à interpretação correta dos valores de IC, foram ajustados modelos matemáticos para sua estimativa em função de θ , Ds e teor de argila do solo. Os momentos estatísticos dessas variáveis são apresentados na [Tabela 1](#), onde o número de dados (N) oriundos dos ensaios de campo foi superior aos de laboratório. Entretanto, a amplitude dos dados dos ensaios de laboratório, principalmente para IC, foi maior. No caso da Ds, os valores mínimos constatados nos ensaios de campo foram substancialmente menores do que os observados nos ensaios de laboratório. Os valores mais baixos correspondem à camada 0 cm – 5 cm, provavelmente em virtude da maior quantidade de raízes, visualmente observada nesta camada e teores de matéria orgânica mais elevados, proporcionados pela grande quantidade de resíduos vegetais existentes sobre o solo do pivô.

Tabela 1. Distribuição estatística das variáveis físicas do solo obtidas nos ensaios de campo e laboratório utilizadas nos ajustes dos modelos.

Solo	Variável	N	Média	Desvios	Mínimo	Máximo
..... Ensaios de campo						
RQ	IC	159	1,91	0,85	0,07	4,67
	Ds	159	1,50	0,16	0,86	1,74
	θ_r	159	0,10	0,03	0,01	0,15
	Argila	159	111,20	17,1	89,0	138,0
IV	IC	130	2,31	0,79	0,09	4,63
	Ds	130	1,42	0,17	0,95	1,8
	θ_r	130	0,14	0,03	0,05	0,19
	Argila	130	19,81	1,03	180,0	216,0
RQ+LV	IC	289	2,08	0,85	0,07	4,67
	Ds	289	1,47	0,17	0,86	1,80
	θ_r	289	0,12	0,04	0,01	0,19
	Argila	289	150,10	44,74	89,00	216,00
..... Ensaios de laboratório						
RQ	IC	40	2,76	2,98	0,27	11,13
	Ds	40	1,69	0,08	1,58	1,88
	θ_r	40	0,13	0,05	0,02	0,19
	Argila	40	118,40	24,31	89,00	138,00
IV	IC	20	4,10	3,74	0,86	11,00
	Ds	20	1,66	0,11	1,49	1,86
	θ_r	20	0,17	0,07	0,05	0,25
	Argila	20	211,00	-	-	-
RQ+LV	IC	60	3,20	3,28	0,27	11,13
	Ds	60	1,68	0,09	1,49	1,88
	θ_r	60	0,14	0,06	0,02	0,25
	Argila	60	149,27	48,25	89,00	211,00

IC: Resistência do solo à penetração, expressa pelo índice de cone (MPa); θ_r : Conteúdo de água volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Ds: Densidade do solo (g cm^{-3}); Argila: teor de argila (g kg^{-1}); RQ: Neossolo Quartzarênico; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; RQ+LV: Dados de toda a área do pivô; N: número de dados; Desvios: desvio-padrão.

Durante a realização dos ensaios de laboratório, houve um controle mais eficiente da D_s , θ e IC, os quais foram avaliados na mesma amostra, favorecendo a obtenção de coeficientes R^2 mais elevados para os modelos ajustados a partir destes dados (Tabela 2). Nos ensaios de campo, esse controle não foi possível, uma vez que a resistência à penetração foi determinada em pontos ao redor do local onde foram coletadas amostras para D_s e θ . Nesse caso, a maior dispersão observada nos dados pode ter sido um efeito de variabilidade espacial do IC não só vertical, mas também horizontal, conforme citado por [Santi et al. \(2005\)](#). Outro problema que pode ser associado à penetrometria realizada no campo, em se tratando de penetrômetros dinamométricos, é a dificuldade em se manter uma velocidade constante de penetração durante o ensaio, o que influi na precisão dos resultados ([KLEIN et. al., 1998](#)), fato que não ocorreria com um penetrômetro de impacto ([STOLF, 1991](#)) ou com mecanismo para controle de velocidade. O penetrômetro utilizado no laboratório permite maior controle dessa velocidade.

Para os ensaios de laboratório, os modelos de IC ajustado em função de θ apresentaram valores de R^2 mais elevados do que quando ajustados em função da D_s , o que evidencia para as condições estudadas um efeito mais pronunciado de θ do que da D_s no IC. O modelo $IC = a\theta^b$ apresentou R^2 de 0,61 para o RQ e 0,65 para o LV (Tabela 2). Entretanto, no modelo ajustado para os dados dos dois solos, o R^2 diminuiu para 0,46. Com a incorporação da D_s no modelo $IC = a\theta^b D_s^c$, conforme proposto por [Busscher \(1990\)](#), a mesma tendência foi observada, porém com valores de R^2 substancialmente mais elevados. Todavia, o parâmetro a não apresentou significância nos modelos ajustados para RQ, LV e RQ+LV, ($P > 0,22$; 0,17 e 0,19, respectivamente).

Essa diminuição nos valores de R^2 dos modelos ajustados de IC em função de θ ou θ e D_s para os dados do LV + RQ pode ser atribuída às diferenças no teor de argila entre os dois solos. Sendo assim, o teor de argila foi incorporado ao parâmetro a da equação de Busscher (1990). O modelo $IC = aArg \theta^b D_s^c$ apresentou R^2 de 0,91 para os dados do RQ, onde o teor de argila variou entre 89 e 138 g/kg. Entretanto, nesse caso, o parâmetro a não apresentou nível de significância adequado (Tabela 2). Para o LV, esse ajuste não foi feito, pois foi coletado apenas um ponto, com teor de argila 211 g/kg. Para os dados do RQ + LV, o R^2 apresentou um valor de 0,85, sendo significativos todos os coeficientes (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes (Cf) e significância (signif) para os modelos de resistência do solo à penetração ajustados para cada solo a partir dos dados obtidos nos ensaios de campo e laboratório.

Modelo	Cf.	RQ ⁽¹⁾		IV ⁽²⁾		RQ+LV ⁽³⁾	
		Valor	Signif.	Valor	Signif.	Valor	Signif.
..... Ensaios de campo							
IC = a θ^b	a	7,89765	0,00004	1,38372	0,00010	2,08539	0,00010
	b	0,60167	0,00010	-0,25627	0,01473	0,00000	0,50000
	R ²	0,18757	0,00001	0,03141	0,04367	0,00001	0,50000
IC = aDs ^c	a	0,76946	0,00010	1,56867	0,00010	1,31001	0,00010
	c	2,18875	0,00010	1,08937	0,00010	1,20896	0,00010
	R ²	0,21302	0,00001	0,14820	0,00001	0,11852	0,00000
IC = a θ^b Ds ^c	a	0,76836	0,00010	0,36747	0,00035	1,30983	0,00010
	b	-0,00005	0,50000	-0,62862	0,00010	-0,00005	0,49494
	c	2,19123	0,00010	1,65110	0,00010	1,20874	0,00010
	R ²	0,21301	0,00001	0,29269	0,00001	0,11850	0,00002
IC = aArg θ^b Ds ^c	a	0,00742	0,00282	0,00183	0,00043	0,00293	0,00010
	b	-0,00348	0,48629	-0,62592	0,00010	-0,36536	0,00010
	c	1,97326	0,00010	1,70083	0,00010	1,96680	0,00010
	R ²	0,22943	0,00001	0,27212	0,00001	0,20952	0,00002

Continua...

Tabela 2. Continuação...

Modelo	Cf.	RQ ⁽¹⁾		LV ⁽²⁾		RQ+LV ⁽³⁾	
		Valor	Signif.	Valor	Signif.	Valor	Signif.
..... Ensaios de laboratório							
IC = a θ^b	a	0,25609	0,00848	0,44077	0,03653	0,48070	0,00189
	b	-1,00054	0,00001	-1,09972	0,00002	-0,85288	0,00001
	R ²	0,61309	0,00001	0,65939	0,00001	0,46297	0,00000
IC = aDs ^c	a	0,12126	0,30169	0,66284	0,28326	0,29864	0,22990
	c	5,87122	0,04869	3,54526	0,13997	4,50821	0,03603
	R ²	0,06271	0,11924	0,05961	0,30001	0,0463	0,09920
IC = a θ^b Ds ^c	a	0,01844	0,22351	0,00968	0,17827	0,06003	0,19308
	b	-1,02919	0,00001	-1,24233	0,00001	-0,86742	0,00001
	c	4,99387	0,01149	6,98759	0,00013	3,99908	0,01977
	R ²	0,74568	0,00001	0,85150	0,00001	0,53454	0,00001
IC = aArg θ^b Ds ^c	a	0,00014	0,10589	-	-	0,00034	0,04905
	b	-1,06175	0,00001	-	-	-0,98414	0,00001
	c	4,99922	0,00013	-	-	3,99940	0,00007
	R ²	0,91267	0,00001	-	-	0,85462	0,00001

IC: Resistência do solo à penetração, expressa pelo índice de cone (MPa); θ : Conteúdo de água volumétrico (cm³ cm⁻³); Ds: Densidade do solo (g cm⁻³); Arg: teor de argila (g kg⁻¹); ¹ RQ: Neossolo Quartzarênico; ² LV: Latossolo Vermelho-Amarelo; ³ RQ+LV: Dados de toda a área do pivô.

Desse modo, o IC foi estimado para os conteúdos volumétricos de água equivalentes aos potenciais -6 , -33 e -1500 kPa a partir dos dados de Ds e argila determinados nos pontos amostrados nas áreas do pivô e de Cerrado, cujos valores médios são apresentados na Fig. 3. De maneira geral, quando os solos estudados encontram-se com θ equivalente à capacidade de campo ($\Psi_m = -6$ kPa), valores de IC superiores a 2 MPa são observados apenas para o LV cultivado nas profundidades 12,5 cm e 17,5 cm, o que caracterizaria restrição ao crescimento de raízes com provável efeito na produção, conforme relatado por [Spivey et al \(1986\)](#) e [Beutler e Centurion \(2003\)](#). À medida que estes solos secam ($\Psi_m = -33$ kPa), o IC aumenta para valores superiores a 2 MPa no LV cultivado na camada de 10 cm - 22,5 cm e para o RQ cultivado na camada 15 cm - 30 cm. No entanto, nessas condições, ambos os solos sob Cerrado ainda não apresentaram IC limitante.

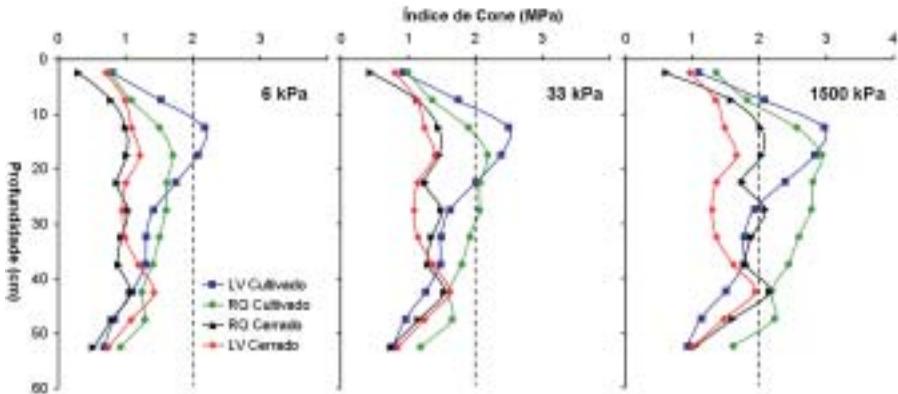


Fig. 3. Representação gráfica no perfil do solo da resistência à penetração, expressa pelo índice de cone (IC) estimado em função do teor de argila e conteúdo de água no solo, nos potenciais mátricos 6, 33 e 1500 kPa. A linha pontilhada representa o índice de cone limitante ao crescimento de raízes. Cada curva representa a média de 9 observações no LV cultivado; 12 observações no RQ cultivado e 3 observações RQ e LV Cerrado.

No ponto de murcha ($\Psi_m = -1500$ kPa), a principal limitação é o fato de não haver água disponível ([SILVA et al., 1994](#); [LEÃO et al., 2004](#)). Entretanto, nessa condição, o IC também apresenta valores limitantes na

maior parte dos perfis de solo cultivados avaliados, bem como para o RQ sob Cerrado, onde quase todo o perfil do solo apresentou IC próximo de 2 MPa. O mesmo não ocorreu para o LV sob Cerrado (Fig. 3), confirmando o fato de que os valores mais elevados observados nessa condição sob θ de campo (Fig. 2A) não estão relacionados à compactação, mas sim aos baixos valores de θ durante a realização dos ensaios.

Essa discussão ressalta que, para se caracterizar a compactação do solo com base no IC, é importante o conhecimento das suas relações com atributos do solo, tais como Ds e θ , conforme demonstrado também por outros autores (KLEIN et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; BEUTLER et al., 2004; LEÃO et al., 2004) e também do teor de argila do solo, concordando com Rosolem et al. (1999) e Pedrotti et al. (2001). Para tanto, a modelagem dessas relações com base em modelos de regressão não lineares se apresenta como uma ferramenta adequada para os solos do Cerrado estudados.

Contudo, ao se analisar dados de atributos de solo mediante métodos estatísticos clássicos, são ignoradas as conseqüências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade média dos valores das amostras (SOUZA et al., 2006). No caso da compactação do solo, isso pode dificultar a tomada de decisões no âmbito de fazenda, ou mesmo levar à recomendação de operações para descompactação em área total dos talhões, com custos elevados e, muitas vezes, desnecessários. Sendo assim, foram criados mapas de ICs em três condições de conteúdo de água no solo ($\Psi_m = -6, -33$ e -1500 kPa), para as camadas 10 - 15 cm; 15 - 20 cm e 20 - 25 cm (Fig. 4), bem como mapas de Ds nas mesmas profundidades (Fig. 5). Tais profundidades foram escolhidas uma vez que nelas foram constatados valores mais elevados de IC e Ds (Fig. 2 e 3).

Estando os solos da área do Pivô na capacidade de campo ($\Psi_m = -6$ kPa), apenas a área com teor de argila superior a 160 g kg^{-1} (LV – Fig. 6A) resultou em valores de IC superiores a 2 MPa nas profundidades 10 a 15 cm, 15 a 20 cm e 20 a 25 cm (respectivamente Fig. 4 A, B e C). Tais áreas seriam as mais críticas com relação à compactação, uma vez que o valor de IC considerado como limitante ocorre na capacidade de campo

(KLEIN et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; BEUTLER et al., 2004). Para a profundidade 10 cm a 15 cm, apenas o mecanismo sulcador da semeadora poderia solucionar o problema.

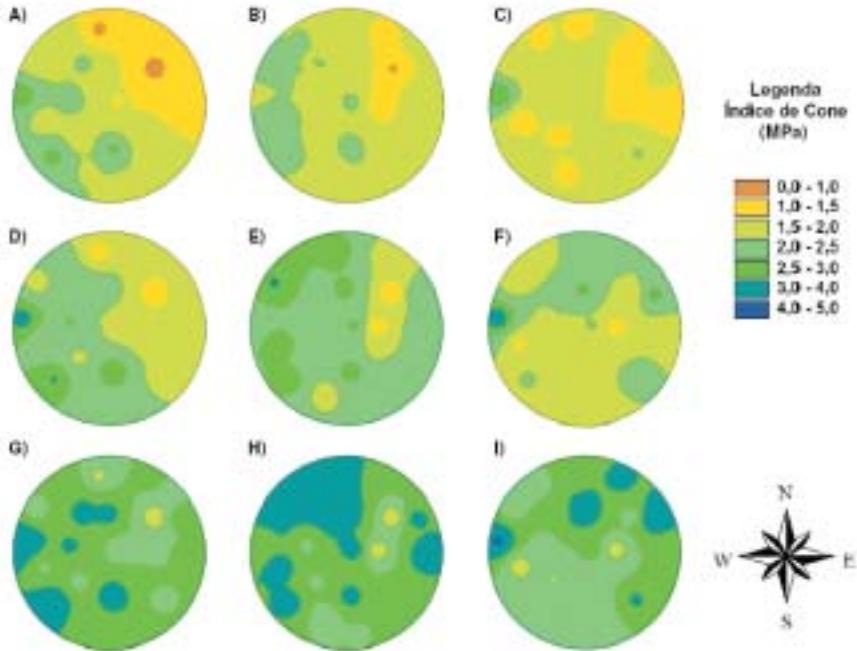


Fig. 4. Mapas de índice de cone estimados para conteúdo de água no solo equivalente à capacidade de campo nas camadas 10 cm a 15 cm (A), 15 cm a 20 cm (B) e 20 cm a 25 cm (C); para conteúdo de água equivalente a 33 kPa nas camadas 10 cm a 15 cm (D), 15 cm a 20 cm (E) e 20 cm a 25 cm (F) e para conteúdo de água equivalente ao ponto de murcha nas camadas 10 cm a 15 cm (G), 15 cm a 20 cm (H) e 20 cm a 25 cm (I).

Para teores de água mais baixos ($\Psi_m = -33$ kPa), aproximadamente toda a área do pivô sob LV apresentou IC superior a 2 MPa na camada 10 cm a 15 cm (Fig. 4 D). Para a camada 15 cm a 20 cm, praticamente toda a área do pivô (LV+RQ) apresentou IC superior a 2 MPa (Fig. 4 E). Na camada 20 cm a 25 cm, apenas uma pequena área apresentou IC acima de 2 MPa (Fig. 4 F). Guerra et al. (2003) utilizaram como critério para iniciar a irrigação a leitura de $\Psi_m = -40$ kPa em tensiômetros instalados a 10 cm de

profundidade. Sendo assim, no solo com θ ao Ψ_m de -33 kPa, as plantas apresentam condições hídricas para desenvolvimento vegetativo e produção. Entretanto, se nessas condições houver limitações ao crescimento de raízes impostas pela compactação do solo, conforme observado em parte da área do pivô, elas podem ser compensadas pela irrigação, pelo aumento no conteúdo de água no solo, que funciona como agente lubrificante, favorecendo o crescimento de raízes (PEDROTTI et al., 2001). Entretanto, isso pode implicar em redução do turno de rega, o que significa maior consumo de água e energia. Em condições de sequeiro, poderia representar prejuízos, em decorrência da redução na produtividade. Quando o conteúdo de água dos solos atinge o ponto de murcha (Ψ_m de -1500 kPa), praticamente toda a área do pivô apresentou IC limitante (Fig. 4 G, H, I).

De acordo com os mapas de densidade, a maior parte da área apresenta D_s menor do que $1,6$ g dm⁻³ para as camadas avaliadas (Fig. 5 A, B, C). No Estado de São Paulo, Beutler et al. (2004) observaram em solo com 271 g/kg de argila que a produtividade começa a ser reduzida quando a densidade supera o valor de $1,62$ g kg⁻¹. O teor de argila dos solos avaliados no presente estudo está abaixo do observado pelos autores, razão pela qual podem apresentar valores de densidades críticas ainda mais elevados. Entretanto, é preciso cautela na avaliação da estrutura do solo com base apenas na densidade, uma vez que esse atributo pode apresentar baixa correlação com o crescimento de plantas (LETEY, 1985; OLIVEIRA et al., 2003).

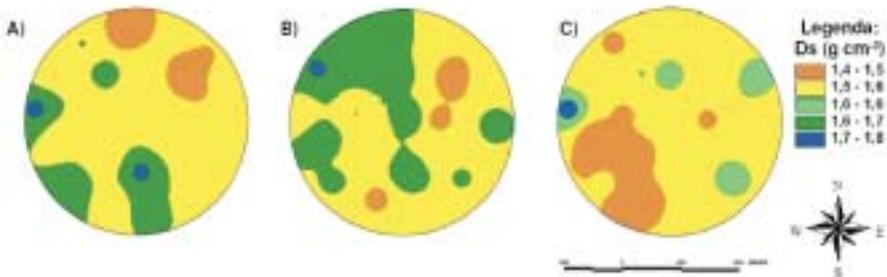


Fig. 5. Mapas de densidade do solo nas camadas 10 cm a 15 cm (A); 15 cm a 20 cm (B) e 20 cm a 25 cm (C).

Quanto ao IC_{ac} , ele apresentou valores mais elevados na área do LV (Fig. 6 C), o que corrobora com os valores de ICs mais elevados nesta parte da área. Além da compactação do solo, isso pode também ser atribuído ao teor de argila mais elevado, o qual está associado ao aumento na coesão entre partículas, conforme relatado por [Pedrotti et al. \(2001\)](#). Com relação à profundidade onde ocorrem valores máximos de IC ($ProfIC_{máx}$), estes são mais elevados acima de 17,5 cm na área do pivô correspondente ao LV (Fig. 6 D). Apenas duas pequenas áreas, uma no RQ e outra no LV, apresentaram $IC_{máx}$ abaixo de 30,5 cm. De acordo com a literatura, solos cultivados tendem a apresentar aumento superficial na densidade e conseqüentemente IC em relação aos solos sob condição natural ([KLEIN et al., 1998](#); [COSTA et al., 2003](#); [OLIVEIRA et al., 2003](#); [CAVALIERI et al., 2006](#)), conforme já discutido anteriormente.

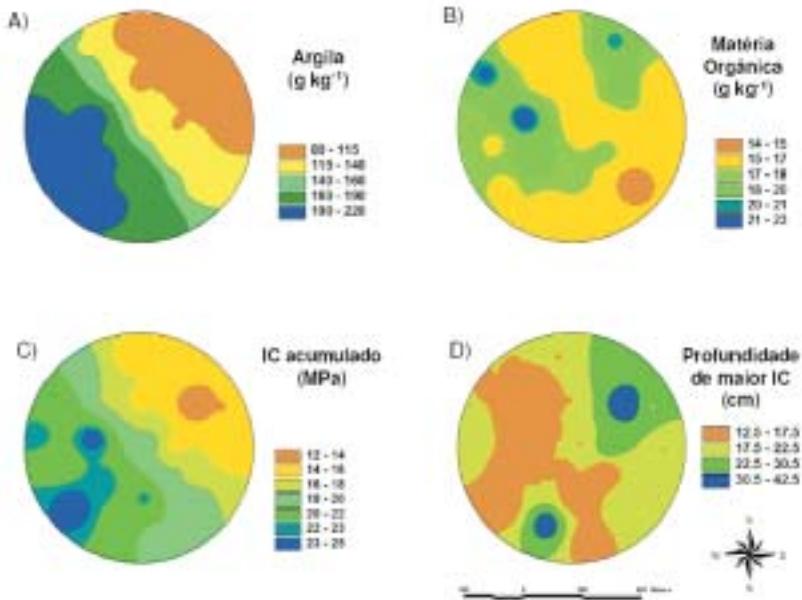


Fig. 6. Mapas de teor de argila na camada 0 cm - 20 cm (A); teor de matéria orgânica na camada 0 cm a 20 cm (B); Índice de cone (IC) no conteúdo de água equivalente à capacidade de campo acumulado no perfil do solo até a profundidade de 55 cm (C) e profundidades onde se observou maiores valores de IC no conteúdo de água equivalente à capacidade de campo (D).

Os coeficientes de correlação entre a produtividade de soja na safra 2006 e atributos do solo são apresentados na [Tabela 3](#). As correlações entre produtividade e D_s , IC em diferentes θ e IC_{ac} foram positivas e significativas, indicando que estes não apresentaram efeito na redução da produtividade tanto na área total do pivô quanto no RQ. Da mesma forma, o teor de argila apresentou correlações positivas mais elevadas com a produtividade da soja na área do pivô e RQ. Entretanto, na área do LV, a maioria dos coeficientes foram negativos, porém baixos e não significativos. No entanto, foi observado coeficiente de $-0,77^{**}$ entre produtividade de soja e teor de argila e $-0,66^{**}$ entre produtividade e IC acumulado. Entretanto, parte dos dados de produtividade da soja na área do LV ficaram comprometidos em razão de uma falha ocorrida no sensor de produtividade (área em branco, [Fig. 1 B](#)), conforme descrito no item material e métodos. Nesse caso, na correlação entre mapas no LV, onde a área em que ocorreu a falha foi eliminada, foram constatados coeficientes bastante baixos entre produtividade e argila ($-0,06^*$) e entre produtividade e IC_{ac} ($-0,19^{**}$). No caso da argila, esta correlação baixa pode ser explicada pela pequena amplitude na área do LV, entre 180 e 216 g kg⁻¹ ([Tabela 1](#)).

Para o IC acumulado, embora a correlação tenha sido baixa, o valor negativo pode ser explicado principalmente pela ocorrência de valores de IC acima de 2 MPa na capacidade de campo e -33 kPa na área do LV. De acordo com [Silva Júnior e Molin \(2001\)](#), mesmo baixos, coeficientes negativos entre IC e produtividade indicam que essa apresentou uma tendência de redução com a compactação, o que pode ter ocorrido no LV. Isso é corroborado pelo fato de que boa parte dos valores de IC maiores que 2 MPa corrigidos para conteúdo de água na capacidade de campo tenha sido constatada na área do LV ([Fig. 4 A, B, C](#)).

Quanto à relação entre o IC e o crescimento radicular, ela depende da espécie vegetal ou mesmo cultivar em estudo. Valores de 2 MPa são citados por [Spivey et al. \(1986\)](#) como limitantes, enquanto valores de 2,5 MPa por [Unger e Kaspar \(1994\)](#). Para a cultura da soja, [Beutler e](#)

[Centurion \(2003\)](#) constataram que a produção de grãos é reduzida em valores de IC acima de 2 MPa, podendo o limite crítico chegar até 3 MPa em solos do Estado de São Paulo. Sendo assim, a definição desses limites para diferentes culturas e tipos de solo, principalmente os do Bioma Cerrado, deve ser objetivo de estudos futuros.

Tabela 3. Coeficientes de correlação (R^2) entre a produtividade de soja e atributos de solo.

Atributo	Pontos ⁽¹⁾			Mapas ⁽²⁾		
	Pivô	RQ	IV	Pivô	RQ	IV
Ds a 12,5 cm	0,48**	0,47 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,43**	0,16**	0,15**
Ds a 17,5 cm	0,08 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,12**	0,09**	-0,01 ^{ns}
Ds a 22,5 cm	-0,29 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,35**	-0,10**	-0,13**
IC CC 12, 5 cm	0,58**	0,62**	-0,17 ^{ns}	0,53**	0,25**	0,03 ^{ns}
IC CC 17, 5 cm	0,37 *	0,41 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	0,40**	0,20**	-0,12**
IC CC 22, 5 cm	0,10 ^{ns}	0,23 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	0,12**	0,09**	-0,25**
IC 33 kPa 12,5 cm	0,43 *	0,36 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,45**	0,13**	0,02 ^{ns}
IC 33 kPa 17,5 cm	0,08 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	0,16**	0,06 *	-0,13**
IC 33 kPa 22,5 cm	-0,23 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-0,24**	-0,11**	-0,26**
IC EM 12, 5 cm	0,27 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,31**	0,06**	0,00 ^{ns}
IC EM 17, 5 cm	-0,14 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	-0,08**	0,00 ^{ns}	-0,15**
IC EM 22, 5 cm	-0,42 *	-0,31 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	-0,43**	-0,16**	-0,28**
Teor de argila	0,68**	0,76**	-0,77**	0,57**	0,31**	-0,06 *
Teor de mat. orgânica	0,02 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,43 ^{ns}	0,12**	-0,03 ^{ns}	-0,31**
Prof. IC máximo	-0,26 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,32**	-0,12**	-0,02 ^{ns}
IC acumulado até 55 cm	0,65**	0,69**	-0,66 *	0,55**	0,29**	-0,19**
n	21	12	9	2028	1156	872

¹ Correlações entre os atributos determinados nos pontos amostrados com as respectivas médias de produtividade num raio de 100 m ao redor do ponto. ² Correlações entre dados interpolados numa grade de 20 m x 20 m. N: número de dados utilizados para análise de correlação.

Conclusões

- Para a caracterização da compactação do solo com base em resistência à penetração, é necessário conhecer as relações matemáticas entre IC e atributos do solo, como Ds, θ , e teor de argila. Para tanto, a modelagem dessas relações com base em modelos de regressão não lineares se apresenta como ferramenta promissora.

- O IC é influenciado pela θ , Ds e teor de argila. Os modelos ajustados com dados dos ensaios de laboratório apresentam valores de R^2 mais elevados do que os ajustados com dados de campo.
- Tanto o LV quanto o RQ sob Cerrado apresentam valores mais baixos de Ds e IC em conteúdo de água equivalente à capacidade de campo comparado aos mesmos solos sob cultivo. Apenas parte da área cultivada sob LV apresenta valores de IC superiores a 2 MPa na capacidade de campo, não sendo necessário operações para descompactação em área total.

Agradecimentos

Ao Clube de Plantio Direto do Oeste da Bahia, pelo apoio à realização deste trabalho, ao técnico agrícola José Carlos Costa Gonçalves Rocha pelo auxílio nos trabalhos de campo, aos acadêmicos do curso de Agronomia da UPIS Hugo Nogueira Pereira Cardoso e Fernando José da Silveira pelo auxílio em parte dos trabalhos de laboratório.

Referências

ALVES, V. G.; ANDRADE, M. J. B.; CORRÊA, J. B. D.; MORAES, A. G.; SILVA, M. V. Concentração de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da compactação e classes de solos.

Ciência e Agrotecnologia, v. 27, n. 1, p. 44-53, 2003.

AMBIENTE BRASIL. **Classificação dos climas do Brasil**. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./natural/index.html&conteudo=./natural/clima.html>>. Acesso em: 01 nov. 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima para a produtividade de soja em Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 843-849, 2005.

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

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.

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

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 137-147, 2006.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212 p.

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

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa SPI, 1999. 412 p.

FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, 1984.

GUERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; ROCHA, O. C.; EVANGELISTA, W. **Necessidade hídrica no cultivo de feijão, trigo milho e arroz sob irrigação no Bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 15 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 100).

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

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água.

Engenharia Agrícola, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 415-423, 2004.

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

LUCHIARI JÚNIOR, A.; SILVA, A. D.; BUSCHINELLI, C. C. A.; HERMES, L. C. CARVALHO, J. R. P.; SHANAHAN, J; SCHEPERS, J. S. Agricultura de precisão e meio ambiente. In: MACHADO, P. L. O.A.; SILVA, C. A.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.) **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: CNPS, 2004. p.19-35.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compreensivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 291-299, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. da. Soil organic matter dynamics under different tillage systems in the Cerrados region in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., Kyoto, Japan. **Transaction...** Kioto: International Society of Soil Science, 1990. v. 6. p. 325-326.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 2002. 338 p.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

SÁ, M. A. C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos. **Compactação do solo: conseqüências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 25 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 136).

SANTI, G. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A.; STÜRMER, S. L. K. Variabilidade tridimensional da resistência do solo à penetração e crescimento radicular da cultura da soja. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Solos, sustentabilidade e qualidade ambiental**. Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD ROM.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 740-752, 2005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 884-888, 1997.

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

SILVA JÚNIOR, R. L. da; MOLIN, J. P. Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **[Anais]**. Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1 CD-ROM.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALVANTE, I. 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**, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

SPIVEY, L. D.; BUSSCHER, W. J.; CAMPBELL, R. B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils. **Soil and Tillage Research**, v. 6, p. 351-363, 1986.

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

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

WILLIAMS, S. M; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1403-1409, 2004.