

**INDICADORES DE QUALIDADE ESTRUTURAL  
NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO  
SOLO EM DECORRÊNCIA DA COLHEITA  
MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**EDUARDO DA COSTA SEVERIANO**

**2007**

**EDUARDO DA COSTA SEVERIANO**

**INDICADORES DE QUALIDADE ESTRUTURAL NA AVALIAÇÃO DA  
COMPACTAÇÃO DO SOLO EM DECORRÊNCIA DA COLHEITA  
MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

**Orientador**  
**Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira**

**LAVRAS**  
**MINAS GERAIS - BRASIL**  
**2007**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Severiano, Eduardo da Costa.

Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar / Eduardo da Costa Severiano. -- Lavras: UFLA, 2007.

71 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: Geraldo César de Oliveira.

Bibliografia.

1. Física do solo. 2. *Saccharum* sp. 3. Mecanização da colheita. 4. Pressão de preconsolidação. 5. Intervalo hídrico ótimo. 6. Latossolo. 7. Cambissolo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD - 631.43

**EDUARDO DA COSTA SEVERIANO**

**INDICADORES DE QUALIDADE ESTRUTURAL NA AVALIAÇÃO DA  
COMPACTAÇÃO DO SOLO EM DECORRÊNCIA DA COLHEITA  
MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

**APROVADA em 1º de agosto de 2007.**

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior	UFLA
Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFG

**Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira**  
**UFLA**  
**(Orientador)**

**LAVRAS**  
**MINAS GERAIS - BRASIL**

*A Deus, meu senhor, pela certeza de que estais comigo, pois...*

*“... minha alma, como terra árida, tem sede de vós (Salmo 142)”*

### **OFEREÇO**

*Aos meus avós, José e Teresinha, João e Beraldina (in memoriam),  
pelo carinho,*

*Aos meus pais, Divino e Fátima, pelo exemplo de  
humildade e companheirismo,*

*As minhas irmãs, Daniella e Anna Carolina,*

### **DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus e à nossa Senhora Aparecida, pela proteção durante a minha caminhada.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Geraldo César de Oliveira, pela orientação, mas, acima de tudo, pela confiança e amizade.

Ao Professor Moacir de Souza Dias Júnior, pela participação na banca examinadora, confiança e oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor José Maria de Lima, pela confiança dada.

Ao Professor Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pela amizade, participação na banca, críticas e sugestões.

Ao Professor Mozart Martins Ferreira, pela alegre convivência, participação na banca, críticas e sugestões.

À empresa Jalles Machado S.A., em nome do engenheiro agrônomo Rogério Augusto Bremm Soares e dos funcionários Geraldo Cabral e Uerley, pela amizade e apoio logístico.

A Kátia, pelo amor, carinho, amizade, cumplicidade e companheirismo, fundamentais durante a realização do curso.

Ao grande amigo Milton, por “ser simplesmente amigo”.

À Daniela Andrade, pela amizade e apoio logístico.

À moçada da república, Karina, Maria, Jessé, Ivan, Vanderley, Dudu Nobre, Fábio, Reni e Júlia, sempre proporcionando momentos de descontração eternizados na memória.

Ao graduando Matheus, pelo apoio logístico durante a condução do estudo.

Aos colegas do curso de pós-graduação, César, Bruno Pires, Ivoney, Ayodele, Arystides, Gigi, Silvio, Douglas, Cândido, Lucélia, Bruno Ribeiro, Ênio, Évio, Ciro, Anna, Vitória, Waldete Japiassú, Vico Mendes, Paula, Magalhães e a toda comunidade departamental, pelo agradável convívio.

Aos professores da UFLA: Moacir, Luiz Antônio, Faquin, Carlos Alberto, João José, Nilton Curi, Vicente Gualberto e Agostinho, pela participação na minha formação no mestrado.

A todos os professores e funcionários da Escola de Agronomia e Engenharia de alimentos da Universidade Federal de Goiás, responsáveis pela minha graduação em Agronomia.

A todos os funcionários do Departamento de Ciência do Solo, em especial, Dulce, Dellane e Márcia, e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

*“Eu não vim até aqui, pra desistir agora...”*

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1: Compactação do solo e desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Evolução da cultura da cana-de-açúcar no Brasil.....	3
2.2 Alterações estruturais em solos cultivados com cana-de-açúcar.....	5
2.3 Indicador de qualidade estrutural para o crescimento das plantas: intervalo hídrico ótimo (IHO).....	9
2.4 Indicador de trafegabilidade dos solos: comportamento compressivo dos solos.....	12
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
CAPÍTULO 2: Predição e quantificação da compactação de dois solos submetidos às operações de colheita da cana-de-açúcar.....	26
Resumo.....	27
Abstract.....	28
1 Introdução.....	29
2 Material e métodos.....	31
3 Resultados e discussão.....	35
4 Conclusões.....	43

5 Referências bibliográficas.....	44
CAPÍTULO 3: Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar.....	47
Resumo.....	48
Abstract.....	50
1 Introdução.....	51
2 Material e métodos.....	53
3 Resultados e discussão.....	58
4 Conclusões.....	67
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

## RESUMO GERAL

SEVERIANO, Eduardo da Costa. **Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar.** 2007. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.<sup>1</sup>

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar em conteúdos inadequados de água no solo tem sido responsável pela compactação do solo e a redução da produtividade nos ciclos posteriores da cultura. A identificação dos impactos da colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar sobre a estrutura do solo, em diferentes classes, pode se tornar uma importante estratégia de manejo para a minimização dos efeitos da compactação do solo. Nesse contexto, os objetivos deste estudo foram: a) avaliar o efeito das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra sobre a compactação do solo e; b) avaliar as alterações estruturais, a pressão de preconsolidação e o intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háptico (CX), em consequência das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra. Coletaram-se amostras indeformadas de solo na profundidade de 0 a 5 cm, para determinar os modelos de capacidade de suporte de carga e a quantificação da compactação do solo, as alterações estruturais e o IHO em decorrência da colheita mecanizada, nos meses de novembro de 2005, março e agosto de 2006, e colheita manual sem tráfego de máquinas em março de 2006, por ser a época de maior intensidade pluvial. O conteúdo de água no solo, durante a colheita da cana-de-açúcar, variou na seguinte ordem: agosto de 2006 < novembro de 2005 < março de 2006, e CX > LVA em cada época. O CX apresentou maior resistência à compactação em relação ao LVA. A colheita

---

<sup>1</sup> **Comitê de Orientação:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (Orientador); Prof. Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-orientador).

mecanizada da cana-de-açúcar realizada na zona de friabilidade causou compactação do solo enquanto que a colheita da cana-de-açúcar realizada manualmente não promoveu o mesmo efeito. A densidade do solo na pressão de preconsoidação foi um bom indicativo para diagnosticar a ocorrência de alterações estruturais. A macroporosidade do solo limitante apresentou restrições ao crescimento das plantas em níveis de compactação inferiores à densidade do solo crítica do IHO. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada em conteúdos de água no solo até 0,16 e 0,21 kg kg<sup>-1</sup>, para LVA e CX, respectivamente, não promoveu compactação excessiva dos solos.

## GENERAL ABSTRACT

SEVERIANO, Eduardo da Costa. **Indicators of structural quality in evaluation of soil compaction due to mechanized harvesting of sugarcane.** 2007. 71 p. Dissertation (Master Science in soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.<sup>1</sup>

The mechanized harvesting of sugarcane in inadequate water contents in the soil has been responsible for soil compaction and reduction of yield in the later cycles of the crop. The identification of the impacts of mechanized harvesting of the sugarcane crop on soil structure, in different classes can become an important cropping strategy for minimization of the effects of soil compaction. In this context, the objectives of this study were: a) to evaluate the effect of the cropping operations of sugarcane at different times of the crop on compaction and; b) to evaluate the structural changes, the preconsolidation pressure and the least limiting water range (LLWR) in a Red-Yellow Latosol (LVA) and a Haplic Cambisol (CX), due to the harvest operations of sugarcane at different times of the crop. Undisturbed soil samples were collected at 0-5 cm depth to determine the bearing capacity models and quantification of soil compaction, structural changes and the LLWR, due the mechanized harvesting in the months of november of 2005, march and august of 2006, and manual harvesting without machine traffics, in march of 2006, which is the time of higher rainfall intensity. The soil water content during the harvest of sugarcane varied in the following order: august of 2006<november of 2005<march of 2006, and CX>LVA in each time. CX presented larger resistance to compaction than the LVA. The mechanized harvesting of sugarcane in the range of friability caused soil compaction while the harvest of sugarcane accomplished manually

---

<sup>1</sup> **Guidance committee:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (adviser); Prof. Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-adviser).

did not promote the same effect. The bulk density in the preconsolidation pressure was a good indicative to diagnostic the occurrence of soil structural changes. Limiting soil macro porosity presented restrictions for plants growth at compaction levels smaller than the critical bulk density of LLWR. The mechanized harvesting of sugarcane accomplished in soil water contents up to 0.16 and 0.21 kg kg<sup>-1</sup>, for the LVA and CX, respectively, did not promote excessive soil compaction.

## **CAPÍTULO 1**

# **COMPACTAÇÃO DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A crescente busca por fontes alternativas de energia vem colocando o Brasil em posição de destaque mundial em relação à produção de etanol, levando à criação de novas situações sócio-econômicas e à expansão geográfica do cultivo da cana-de-açúcar. Por sua vez, essa expansão vem sendo acompanhada pela adoção de novas tecnologias de cultivo, entre elas a mecanização das operações de colheita da cana-de-açúcar.

Na região Centro-Sul, a safra canavieira se estende ao longo dos meses de abril a outubro (Horii, 2004), caracterizada por ser um período de baixas pluviosidades. Entretanto, em função do crescente aumento na demanda por produtos derivados da cana-de-açúcar, há uma tendência de redução do período de entressafra, estendendo a colheita de meados de março a novembro, caracterizada como época de elevadas precipitações e, conseqüentemente, maiores conteúdos de água no solo. Esse fato associado ao uso de maquinário que exerce elevadas pressões no solo potencializa os processos de compactação do solo, comprometendo, assim, a sustentabilidade da atividade por afetar diretamente a qualidade do solo e da água (Oliveira et al., 2003a).

Dessa forma, os objetivos deste estudo foram: a) avaliar o efeito das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra sobre a pressão de preconsoidação e b) avaliar as alterações estruturais e o intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Cambissolo Háplico submetidos à colheita mecanizada da cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Evolução da cultura da cana-de-açúcar no Brasil**

Tendo suas bases fortalecidas desde o Brasil colônia e juntamente com o extrativismo do pau-brasil, a canavicultura foi a primeira atividade economicamente organizada do país. Os primeiros cultivos registrados datam de meados de 1530. Em uma área restrita à faixa litorânea, que se estendia desde a capitania de São Vicente (SP) até a região nordeste, predominantemente nas capitanias de Pernambuco e Bahia de todos os Santos, a cultura encontrou, além de solos de elevada fertilidade natural e condições climáticas ideais, uma localização geográfica que favorecia o escoamento da produção para a Europa (Josino et al., 2005). A exploração da cana-de-açúcar como modelo de colonização imposto à colônia portuguesa se deu em função do curto ciclo de desenvolvimento da cultura, que possibilitava rápido retorno aos senhores de engenho e, principalmente, pela valorização do produto no mercado europeu (Brum, 2005).

Tal modelo de exploração mostrou-se promissor até meados do século XIX, quando a cana-de-açúcar sofreu sua primeira crise, em função da concorrência gerada pela produção de açúcar nas colônias holandesas e pelo açúcar de beterraba produzido na Europa, levando à redução nos preços do açúcar brasileiro. Em crise, a cana-de-açúcar deixou de ser o principal produto de exploração na colônia, porém, a sua importância permaneceu por toda a história do Brasil (Visão Agrícola, 2004).

Entretanto, foi justamente em outro produto derivado da cana-de-açúcar, em meados do século XX, que a exploração canavieira no Brasil teve sua recuperação: o etanol. Com os constantes aumentos dos preços dos combustíveis

fósseis na segunda metade desse século, surgiu a necessidade da busca de fontes alternativas de energia (Karan, 2007).

No Brasil, o governo federal instituiu o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), na década de 1970, destinado à produção de álcool anidro, para ser adicionado à gasolina. Este fato novamente impulsionou as explorações canavieiras, levando a uma grande expansão territorial da área cultivada. As limitações de recursos naturais para a produção da cana-de-açúcar levaram à sua migração para a região Centro-Sul, uma vez que as expedições do ouro e do café haviam iniciado o processo de interiorização do Brasil (Visão Agrícola, 2004).

Se, por um lado, na região Nordeste, as lavouras se localizavam em solos de elevada fertilidade química, o que favorecia a obtenção de elevadas produtividades (Bittar Filho, 2000), o predomínio do relevo suavizado dos solos potencializava a mecanização da cultura na região Centro-Sul, levando ao aumento do rendimento operacional das atividades agrícolas.

Com a recente inserção da tecnologia de veículos bicompostíveis, no início do século XXI, o setor sucroalcooleiro se consolidou, apresentando produções recordes a cada safra. A região Centro-sul concentra 85% da produção nacional de cana-de-açúcar, destacando-se os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Goiás entre os maiores produtores nacionais (Agrianual, 2007).

Entre os estados dessa região, aqueles localizados na região dos Cerrados se caracterizam por apresentar solos, em sua maioria, de baixa fertilidade química sob condições naturais (Lopes, 1992; Resck, 1996). Gradativamente, as limitações impostas pelos solos dos cerrados, que geralmente são muito intemperizados e com baixas reservas de nutrientes, foram superadas, tornando-a uma importante região produtora de cana-de-açúcar (ProCana, 2007).

O tema sustentabilidade ambiental, envolvendo qualidade do solo, ar e

água, tem sido a tônica atual das discussões, em toda a sociedade por ser indispensável para a sobrevivência do homem no planeta. Neste contexto, o setor canavieiro, passa por um processo conflitante no que diz respeito às modalidades de colheita manual e mecânica da cultura (Veiga Filho, 1999).

Do ponto de vista social, a colheita manual é a menos impactante pelo grande número de pessoas empregadas e, do ponto de vista ambiental o contrário acontece. Para facilitar a colheita, a cana-de-açúcar é queimada, o que traz grandes prejuízos, em termos de saúde pública (Lopes & Ribeiro, 2006) e de qualidade do solo (Ceddia et al., 1999; Centurion et al., 2007) e do ar (Campos, 2003).

Se a cana-de-açúcar é colhida mecanicamente, surge o problema do desemprego (Gonçalves, 1999). Por outro lado, a ausência da queima promove acúmulo do material orgânico à superfície do terreno, melhorando a qualidade física e química do solo (Canellas et al., 2003; Souza et al., 2005). Entretanto, o maquinário utilizado na colheita exerce grande pressão sobre o solo e conforme constatado em diversas culturas, pode resultar em uma série de alterações das propriedades físicas do solo (Dias Júnior et al., 2005; Silva et al., 2007), com conseqüente queda da produtividade das culturas e degradação ambiental (Cruz et al., 1993; Landers, 1997; Oliveira et al., 2003b).

## **2.2 Alterações estruturais em solos cultivados com cana-de-açúcar**

A expansão da canavicultura na região Centro-Sul do Brasil, após a década de 1970, vem sendo acompanhada pela intensificação das operações mecanizadas, principalmente durante a colheita da cana-de-açúcar. O seu cultivo envolve o uso de máquinas agrícolas em todas as etapas, desde o preparo do solo até a colheita (Paulino et al., 2004).

Segundo Adámoli et al. (1985), os Latossolos se destacam como a principal classe cultivada com cana-de-açúcar na região dos Cerrados, em função tanto do predomínio de seu recobrimento na paisagem (aproximadamente 50%) quanto pelas características favoráveis ao manejo mecanizado da cultura. Ocorrem, normalmente, sob uma topografia suave e são originalmente dotados de elevada estabilidade estrutural e friabilidade. Isso se deve principalmente a ação dos microorganismos sob a matéria orgânica em seus diversos estágios de decomposição (Moreira & Siqueira, 2006) e a proporções consideráveis de óxidos de ferro e alumínio na fração argila, que tendem a organizar as partículas microscopicamente promovendo a formação de uma estrutura próxima à granular, conferindo a estes solos elevada macroporosidade e fácil drenagem (Resende et al., 2007).

Por outro lado, com a expansão do setor canavieiro, houve grande demanda por novas áreas para a implantação da cultura e, assim, solos com menor aptidão para o cultivo intensivo, a exemplo dos Cambissolos, que na região estão associados a relevo mais movimentado (ondulado e forte ondulado), também vêm sendo incorporados ao processo produtivo (Canellas et al., 2003).

No cerrado, os Cambissolos correspondem a, aproximadamente, 3,1% (Adámoli et al., 1985) e constituem um grupo bastante heterogêneo, em termos de ambiente, embora apresentem relativa uniformidade morfológica. As rochas pelíticas e metapelíticas são os materiais de muitos Cambissolos álicos da região (Resende et al., 1988). A estrutura em forma de blocos (Resende et al. 2007) confere baixa macroporosidade em condições naturais (Oliveira et al., 1994), determinando um comportamento diferenciado em relação aos Latossolos, quando submetidos às operações mecanizadas da cana-de-açúcar.

A tecnologia de produção tem acompanhado as evoluções, no que se refere à utilização de máquinas, implementos, técnicas de manejo e de transporte. Para tanto, faz-se a opção por veículos de maior capacidade unitária

de carga (Iaia et al., 2006), provocando impactos adversos ao ambiente de produção, destacando-se o processo de compactação do solo (Dias Júnior, 2000).

A compactação tem sua origem na compressão do solo não saturado, durante a qual a densidade do solo ( $D_s$ ) sofre um incremento em função da redução no volume de poros ocupados pelo ar (Gupta & Almaras, 1987; Gupta et al., 1989) e a sua disseminação em agrossistemas canavieiros tem sido atribuída à colheita mecanizada em condições de elevados conteúdos de água no solo (Pankhurst et al., 2003).

A degradação do solo com a conseqüente queda de produção das culturas está diretamente relacionada com as práticas que promovem a alteração da estrutura do solo (Vieira, 1985) que, por sua vez, interage ou afeta uma série de atributos do solo a ela ligada. Marshall (1962) define a estrutura do solo como sendo o arrançamento de partículas do solo e o espaço poroso, incluindo, ainda, a forma, o tamanho e o arrançamento dos agregados formados pelas partículas primárias e que se agrupam em unidades com limites definidos. Esse espaço poroso tem sido classificado em macroporos (maior que 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro), o que caracteriza os poros de aeração e drenagem, e microporos (entre 0,5 e 50  $\mu\text{m}$ ), cuja função é o de armazenamento da água, fundamental para a vida das plantas e dos organismos do solo.

Para a cultura da cana-de-açúcar, conforme abordado por Casagrande (2001), os valores de macroporosidade limitantes situam-se em torno de 0,10  $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$  (Vomocil & Flocker, 1961), que são considerados limitantes para as culturas em geral (Kiehl, 1979; Oliveira et al., 2003a; Centurion et al., 2007; Oliveira et al., 2007).

As indagações sobre o processo de compactação do solo em agrossistemas canavieiros no Brasil iniciaram-se com o uso do penetrômetro de impacto desenvolvido por Stolf et al. (1983). Tais trabalhos visavam apenas a identificação de camadas do solo de diferentes resistências como subsídio à

recomendação do preparo do solo (Stolf & Faganello, 1983). Posteriormente, com base em critérios quantitativos para a avaliação da compactação do solo, se tornou possível a interpretação dos resultados obtidos por estes aparelhos (Stolf, 1991).

Os sintomas de compactação do solo podem ser observados tanto no solo quanto na planta (Dias Júnior, 2000). Avaliando a influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de solos de tabuleiros no estado de Alagoas, Silva & Ribeiro (1992) não encontram alterações expressivas na densidade do solo (Ds), na porosidade e na retenção de água. Ressalta-se que as áreas avaliadas foram submetidas a operações anuais de escarificação, não sendo informada a modalidade de colheita das mesmas. Entretanto, Centurion et al. (2007), avaliando as mesmas influências em Latossolos Vermelhos no município de Jaboticabal (SP), detectaram um aumento da Ds e redução da macroporosidade, à medida que aumentou o tempo de cultivo da cana-de-açúcar. As divergências podem estar relacionadas às diferenças no manejo em cada estudo ou, ainda, às diferentes características entre as classes de solos avaliadas.

Nas plantas, observam-se redução do estande, variação no tamanho das plantas, amarelecimento das folhas e sistema radicular mal formado, raso e horizontal (Ferreira & Dias Júnior, 1996). Em adição, Queiroz-Voltan et al. (1998) constataram um aumento da espessura do córtex das raízes de cana-de-açúcar em resposta à compactação do solo, avaliada pela análise da Ds.

O uso de indicadores de qualidade estrutural do solo tem sido sugerido para a quantificação das alterações nas propriedades físicas do solo (Imhoff, 2002; Horn, 2003; Oliveira et al., 2003a, b; Lapen et al., 2004; Oliveira et al., 2007; Tormena et al., 2007), particularmente as causadas pelas operações mecanizadas de colheita (Dias Júnior et al., 2003; Dias Júnior et al., 2005; Dias Júnior et al., 2007; Silva et al., 2007).

A qualidade do solo é definida como o funcionamento do solo dentro de limites do ecossistema que sustentem a produtividade biológica, mantenham a qualidade ambiental e promovam a saúde animal e vegetal (Soil Science Society of American, SSSA, 2007). Segundo Imhoff (2002), esta é intrínseca do solo, inferida a partir de suas características e propriedades ou por observações indiretas. A qualidade física deve incluir atributos físicos do solo relacionados com a magnitude com que a matriz do solo resiste à deformação e, ainda, com a sua capacidade em fornecer ar e água em proporções adequadas ao pleno desenvolvimento das plantas (Singer & Ewing, 2000).

Segundo Imhoff (2002), embora diversos atributos possam ser utilizados como indicadores de qualidade estrutural, há um consenso de que eles devem incluir atributos que influenciam diretamente a produção das culturas e aqueles que influenciam indiretamente, ao determinar parâmetros da capacidade de suporte de carga do solo. Espera-se que o uso de vários atributos em torno de um único indicador permita a interpretação global das alterações.

### **2.3 Indicador de qualidade estrutural para o crescimento das plantas: intervalo hídrico ótimo (IHO)**

O manejo inadequado do solo promove alterações em vários atributos físicos, os quais interagem entre si, com a conseqüente alteração no ambiente de crescimento das plantas. O conhecimento dessas interações sugere o uso de indicadores que integram diversos atributos físicos do solo relacionados com o crescimento das plantas em torno de um único parâmetro (Silva et al., 2001).

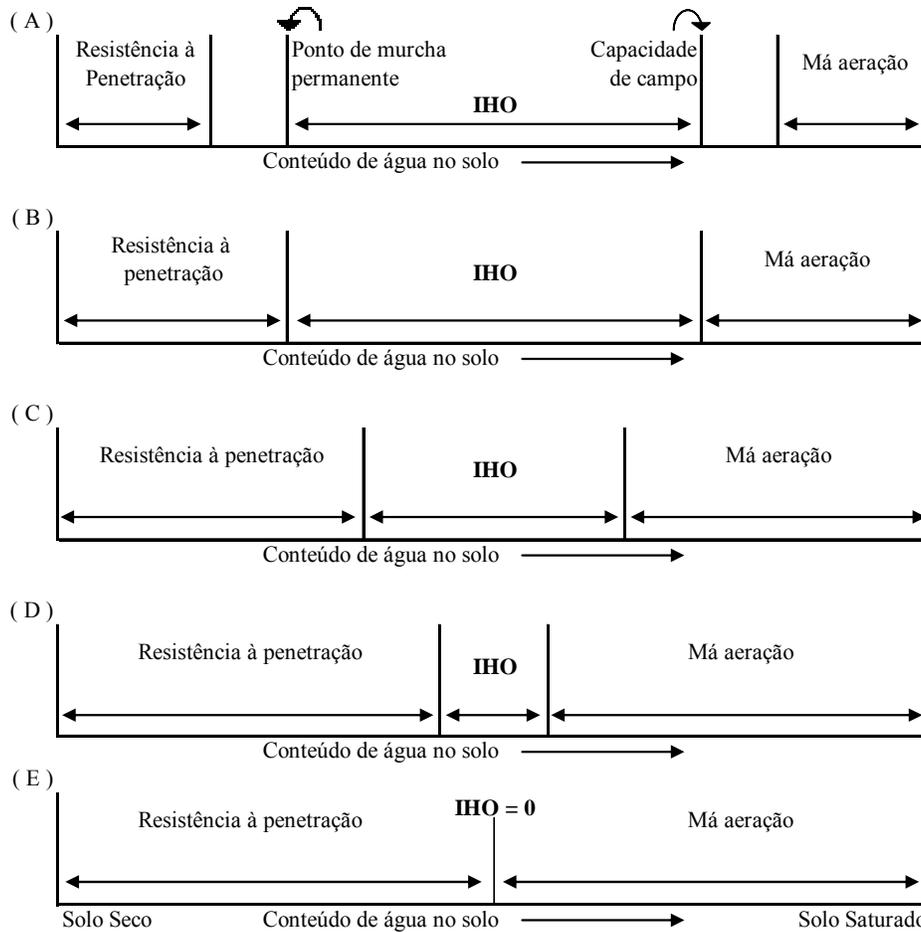
O IHO é definido como a amplitude do conteúdo de água no solo, na qual potencial mátrico, oxigênio e resistência mecânica não são limitantes para o crescimento de plantas (Silva et al., 1994). É considerado um indicador de

qualidade estrutural para o crescimento das plantas que abrange em torno de um único parâmetro, três fatores físicos que afetam diretamente na produtividade agrícola: água, ar e resistência à penetração do sistema radicular (Imhoff, 2002).

O risco de exposição das culturas às condições físicas do solo inadequadas depende dessa amplitude (Silva & Kay, 1997). Nesse cenário, o IHO significa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo o indicador que melhor se correlaciona ao crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

A quantificação do IHO exige a determinação dos limites superiores e inferiores de água disponível às plantas. Os limites superiores são determinados pelo conteúdo de água no solo referente à capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) ou à porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), e os limites inferiores, pelo conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) ou pelo conteúdo de água no solo que promove resistência do solo à penetração limitante ao desenvolvimento radicular ( $\theta_{RP}$ ). Silva et al. (2001) ressaltam que diferentes valores críticos podem ser utilizados sem alterar a aplicabilidade do conceito.

Se o solo apresentar estrutura ideal ao desenvolvimento das plantas, os limites superior e inferior serão respectivamente, a  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$ , correspondendo ao conteúdo de água disponível (AD) (Silva et al., 2001). Entretanto, com degradação estrutural do solo ocorre a substituição desses limites pela  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$ , reduzindo o IHO (Figura 1) (Tormena et al., 1998; Beutler et al., 2004; Leão et al., 2004), tornando-o assim um indicador mais sensível às alterações estruturais que a AD (Silva et al., 1994).



**FIGURA 1.** Relação entre o conteúdo de água no solo e os fatores físicos do solo que limitam o crescimento das plantas. A degradação estrutural e a redução na qualidade física do solo ocorrem de A para E. IHO: intervalo hídrico ótimo. Fonte: Adaptado de Silva et al. (2001).

A Ds na qual o IHO assume o valor nulo é considerada como densidade crítica ao desenvolvimento das plantas ( $D_{sc}$ ), uma vez que, para qualquer conteúdo de água no solo, ocorrerá limitação física para o desenvolvimento das plantas. Tormena et al. (1998) encontraram valores de  $D_{sc}$  igual a  $1,28 \text{ g cm}^{-3}$

para um Latossolo Argiloso, enquanto que valores para solos de textura média variaram de 1,55 a 1,62 g cm<sup>-3</sup> (Silva et al., 1994; Beutler et al., 2004) e, para solos arenosos, os valores assumiram a ordem de 1,70 g cm<sup>-3</sup> (Imhoff et al., 2001), o que demonstra a forte relação desse atributo à textura do solo.

Avaliando a qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa cultivado com cana-de-açúcar no município de Piracicaba, Imhoff et al. (2001) encontraram, como limites superior e inferior, para toda a faixa de Ds avaliada, o conteúdo de água no solo na capacidade de campo e o conteúdo de água no solo para resistência à penetração de 2,0 MPa. Em princípio, o oxigênio não foi considerado um fator limitante ao desenvolvimento da cultura, em função da elevada macroporosidade do solo em estudo, o que está relacionado com sua textura.

#### **2.4 Indicador da capacidade de suporte de carga do solo: comportamento compressivo**

O aumento do tráfego de máquinas sobre o solo promove uma série de alterações nas propriedades físicas, destacando-se o processo de compactação do solo, tornando-o uma preocupação universal (Larson et al., 1980). Este um fenômeno praticamente inevitável (Assouline et al., 1997) e considerado um dos mais importantes fatores limitantes à obtenção de maiores índices de produtividade das culturas exploradas (Kondo, 1998).

A compactação tem sua origem na compressão do solo não saturado, durante a qual a densidade do solo sofre um incremento em decorrência da deformação e do rearranjo das partículas sólidas e do deslocamento do ar presente nos poros (Gupta et al., 1989). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume dos macroporos (Hillel, 1982), podendo ou não ocorrer mudanças no volume de microporos (Oliveira et al., 2003b).

A facilidade com que o solo não saturado decresce de volume, quando sujeito à pressão, é chamada de compressibilidade (Gupta & Allmaras, 1987), a qual é dependente de fatores externos (Lebert & Horn, 1991). No caso desses últimos, destaca-se o tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada pelas máquinas agrícolas, como carga por eixo, área de contato do rodado com o solo, pressão de inflação dos pneus (Castro Neto, 2001). Os fatores internos estão relacionados com a história de tensão (Gupta et al., 1989; Dias Júnior, 1994), conteúdo de água no solo ou potencial matricial (Dias Júnior, 1994; Oliveira et al., 2003b), textura, estrutura e densidade inicial do solo (Larson et al., 1980; Gupta et al., 1989; Dias Júnior, 1994; Silva et al., 2001), mineralogia da fração argila, hidróxidos de alumínio livres e outros atributos, como pH e CTC (Assouline et al., 1997).

Para uma mesma condição de manejo do solo, o conteúdo de água no solo é o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer (Dias Júnior, 1994). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (Dias Júnior, 1994). Entretanto, qualquer compactação excessiva é prejudicial para as plantas, o que pode causar redução na produção.

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de excessivos conteúdos de água no solo (Dias Júnior & Pierce, 1996), devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo nessas condições. Assim, torna-se necessária a sua determinação antes que seja cultivado ou trafegado, bem como uma previsão quantitativa do prejuízo causado à sua estrutura, caso as pressões aplicadas pelas máquinas excedam a capacidade de suporte de carga do mesmo (Silva et al., 2007).

A curva de compressão do solo obtida em laboratório, por meio do ensaio de compressibilidade, tem sido utilizada para simular as reduções do

volume do solo (Stone & Larson, 1980; Dias Júnior, 1994; Dias Júnior & Pierce, 1996). Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e algum parâmetro relacionado ao arranjo das partículas, sendo comumente utilizada a  $D_s$  (Dias Júnior & Pierce, 1996).

Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, a curva de compressão é linear (Figura 2), denominada de reta de compressão virgem, em que a aplicação de qualquer pressão resultará em deformações não recuperáveis (Larson et al., 1980; Dias Júnior & Pierce, 1996), causando, portanto, compactação adicional (Dias Júnior, 1994).



**FIGURA 2.** Curva de compressão do solo quando este não sofreu nenhuma pressão prévia. Fonte: Dias Júnior & Pierce (1996).

Entretanto, quando o solo já sofreu pressões prévias, o mesmo adquire certo grau de compactidade, sofrendo deformações apenas quando submetidos a pressões superiores às anteriormente aplicadas (Dias Júnior & Pierce, 1996). O comportamento da curva de compressão do solo nessas condições é descrito em duas regiões características: uma de deformações elásticas e recuperáveis, denominada de curva de compressão secundária (portanto, não degradando a estrutura do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis,

denominada de curva de compressão virgem (região em que ocorre degradação estrutural) (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996) (Figura 3).



**FIGURA 3.** Curva de compressão do solo quando este já sofreu pressão prévia.  $\sigma_p$ : pressão de pré-consolidação. Fonte: Dias Júnior & Pierce (1996).

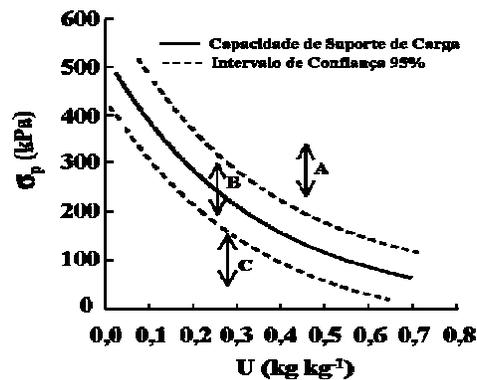
O ponto que divide as duas regiões é denominado de pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) (Figura 3) e seu uso como um indicador de qualidade estrutural do solo baseia-se no fato dele indicar a máxima pressão que pode ser exercida no solo sem que uma compactação adicional ocorra (Dias Junior & Pierce, 1996).

O desenvolvimento de estudos sobre o comportamento compressivo em diferentes classes de solo (Dias Junior et al., 2007), baseados no manejo e na variação do conteúdo de água no solo (Oliveira et al., 2003b) pode auxiliar no planejamento das atividades mecanizadas, de maneira a evitar ou minimizar a degradação da estrutura dos solos.

Avaliando a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho oxidico e um Cambissolo caulínico, originados de rochas pelíticas pobres na microrregião da Mantiqueira (MG), tendo como indicador de qualidade estrutural a pressão de pré-consolidação, Silva et al. (1999) verificaram que o Latossolo apresentou menor capacidade de suporte de carga para todas as

condições avaliadas, o que está relacionado à sua estrutura granular, ao passo que a estrutura em blocos do Cambissolo lhc conferiu maior resistência à compactação.

Para avaliar as alterações estruturais dos solos em função da realização das operações mecanizadas, com base na pressão de preconsolidação, Dias Júnior et al. (2005) dividiram o modelo de capacidade de suporte de carga em três regiões, conforme Figura 4. A região “A” corresponde às pressões de preconsolidação determinadas após as operações mecanizadas maiores que o limite superior do intervalo de confiança (IC), portanto, uma região em que a compactação adicional já ocorreu; a região “B” corresponde às pressões de preconsolidação entre os limites do IC, indicando que não ocorreu compactação adicional do solo, porém, há uma tendência de que ela ocorra se as próximas operações mecanizadas excederem a capacidade de suporte de carga do solo e a região “C” corresponde às pressões de preconsolidação determinadas após a realização das operações mecanizadas menores que o limite inferior do IC, portanto, uma região na qual não ocorreu compactação do solo.



**FIGURA 4.** Modelos de capacidade de suporte de carga do solo, segundo critérios adotados por Dias Júnior et al. (2005). A: com compactação adicional, B: com tendência a compactar e C: sem compactação.

Avaliando o efeito do tráfego das operações de colheita florestal na pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), durante um ciclo do eucalipto, Dias Júnior et al. (2007) confirmaram a validade desses critérios na quantificação das alterações estruturais, em função da realização da operação mecanizada.

Segundo Imhoff (2002), são necessários estudos que relacionam o indicador de qualidade estrutural para o crescimento das plantas com o indicador da capacidade de suporte de carga do solo, uma vez que a alteração de um deles ( $\sigma_p$ ) pode implicar numa redução do outro (IHO).

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G.; MADEIRA NETO, J. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1985. p.33-74.
- AGRIANUAL. Mercado & perspectivas. **Anuário da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP, 2007. 516p.
- ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.61, p.390-398, 1997.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.575-583, 2004.
- BITTAR FILHO, C.A. A apropriação do solo no Brasil colonial e monárquico: uma perspectiva histórico-jurídica. **Revista de Informação Legislativa**, Brasília, v.37, p.177-181, 2000.
- BRUM, A.J. **O desenvolvimento econômico brasileiro**. 24.ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2005. 571p.
- CAMPOS, D.C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. 2003. 103p. Doutorado (Doutorado em Microbiologia Agrícola)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, p.935-944, 2003.
- CASAGRANDE, A.A. Compactação e manejo na cultura da cana-de-açúcar. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. (Coord.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal, SP: FUNEP, 2001. p.150-197.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas.** 2001. 155p. Doutorado (Doutorado em Energia na Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.1467-1473, 1999.

CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER, A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.199-209, 2007.

CRUZ, J. C.; SANTANA, D.P.; BAHIA, F.G.F.T.C. PEREIRA FILHO, I.A.; AGUIAR, L.M.S. Sistema conservacionista no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 23., 1993, Goiânia. **Palestras...** Goiânia: SBCS, 1993. p.75-76.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.** 1994. 114p. Tese (Doutorado)-Michigan State University, East Lansing.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCAEFER, C.E.G.C. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n. 3, p.248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; WINTER, M.E.; PIRES, J.V.G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-amarelo cultivado com Eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.3, p.343-349, 2003.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n. 2, p.257-264, 2007.

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

FERREIRA, M.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 1996. 86p.

GONÇALVES, J.S. Avanço da mecanização da colheita e da exclusão social na produção canavieira paulista nos anos 90. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v.16, n.1, p.67-86, 1999.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v.6, p.65-100, 1987.

GUPTA, S.C.; HADAS, A.; SHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behavior during compacttion. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOOHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (Ed.). **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic, 1989. p.137-152.

HILLEL, D. **Introduction to soil physic**. San Diego: Academic, 1982. 364p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733p.

HORII, J. A cana-de-açúcar como matéria-prima. **Visão Agrícola**, Piracicaba, p. 88-93, 2004.

HORN, R. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v.116, p.77-88, 2003.

IAIA, A.M.; MAIA, J.C.S.; KIM, M.E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.523–530, 2006.

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

IMHOFF, S.D.C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

JOSINO, S.A.; COUTINHO, H.D.M.; PESSOA, H.L.F. Características de cultivo e da nutrição mineral em plantios de cana-de-açúcar. **Conceitos**, p.133-141, 2005.

KARAN, R. **Programa Nacional do Álcool (Proálcool)**. Disponível em: <[www.tvcultura.com.br/aloescola/historia/cenasdoseculo/nacionais/proalcool.htm](http://www.tvcultura.com.br/aloescola/historia/cenasdoseculo/nacionais/proalcool.htm)>. Acesso em: 21 jan. 2007.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KONDO, M.K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95p. Mestrado (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

LANDERS, J.N. A transformação da agricultura do cerrado pelo plantio direto. **Plantio Direto**, Passo Fundo, v.41, p.41-43, 1997.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.450-457, 1980.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p.415-423, 2004.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.

LOPES, A.S. **Solos sob “Cerrado”**. Manejo de fertilidade para produção agropecuária. São Paulo: Anda, 1992. 49p.

LOPES, F.S.; RIBEIRO, H. Mapeamento de internações hospitalares por problemas respiratórios e possíveis associações à exposição humana aos produtos da queima da palha de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.9, n.2, p.215-25, 2006

MARSHALL, T.J. The nature, development, and significance of soil structure. In: NEALE, G.J. (Ed.). **Transaction of joint meeting of commissions IV e V (ISSS)**. Palmerston North, New Zealand, 1962. p.243-257.

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

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

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.2, p.291-299, 2003b.

OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M.; CURTI, N. Caracterização físico-hídrica de Cambissolos da microrregião Campos da Mantiqueira (MG). **Ciência e Prática**, Lavras, v.18, n.4, p.341-348, 1994.

OLIVEIRA G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, p.265-270, 2007.

PANKHURST, C.E.; MAGAREY, R.C.; STIRLING, G.R. BLAIR, B.L.; BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v.72, p.125-137, 2003.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, M.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**, v.28, p.911-917, 2004.

PROCANA. Cana muda eixo da economia no Centro-Oeste. Disponível em: <[www.jornalcana.com.br/conteudo/noticia.asp](http://www.jornalcana.com.br/conteudo/noticia.asp)>. Acesso em: 10 jul. 2007.

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

RESCK, D.V.S. Uso e ocupação do solo no Brasil. In: \_\_\_\_\_. **Manejo integrado de solos em microbacias hidrográficas**. Londrina: IAPAR/SBCS, 1996. p.123-143.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S.B. de; CORRÊA, G.F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5.ed. Lavras: UFLA, 2007. 322p.

RESENDE, M.; CURTI, N.; SANTANA, D.P. **Pedologia e fertilidade do solo**: interações e aplicações. Lavras: UFLA/Piracicaba: Potafos, 1988.

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

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of American Journal**, v.61, p.977-883, 1997.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. (Coord.). **Qualidade física do solo**: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p.1-20.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.1, p.89-93, 2007.

SILVA, M.S.L.; RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.397-402, 1992.

SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.219-226, 1999.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p.271-298.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICAN. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <[www.soils.org/ssagloss](http://www.soils.org/ssagloss)>. Acesso em: 10 jul. 2007.

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.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetros de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

STOLF, R.; FAGANELLO, B.F. Utilização do penetrômetro de impacto, Modelo IAA/Planalsucar-Stolf, na recomendação do preparo de solo da Usina Nossa Senhora Aparecida (Pontal-SP). **Revista STAB**, Piracicaba, p.11-22, 1983.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf: recomendação para seu uso. **Revista STAB**, Piracicaba, v.1, n.3, p.18-23, 1983.

STONE, J.A.; LARSON, W.E. Rebound of five one dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.819-822, 1980.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.211-219, 2007.

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

VEIGA FILHO, A.A. Estudo do processo de mecanização do corte na cana-de-açúcar: o caso do estado de São Paulo, Brasil. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v.3, n.1, p.74-99, 1999.

VIEIRA, M.J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FRANCELLI, A.L.; TORRADO, P.V.; MACHADO, J. (Coord.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. p.163-79.

VISÃO Agrícola. **Cinco séculos de ativa participação histórica.** ESALQ/USP. Piracicaba. 2004.

VOMOCIL, J.A.; FLOKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, v.4, p.242-246, 1961.

## **CAPÍTULO 2**

### **PREDIÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE DOIS SOLOS SUBMETIDOS ÀS OPERAÇÕES DE COLHEITA DA CANA- DE-AÇÚCAR**

## RESUMO

SEVERIANO, Eduardo da Costa. Predição e quantificação da compactação de dois solos submetidos às operações de colheita da cana-de-açúcar. In: \_\_\_\_\_. **Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar.** 2007. Cap. 2, p.26-46. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>1</sup>

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar em conteúdos inadequados de água no solo tem sido responsável pela compactação do solo e a redução da produtividade nos ciclos posteriores da cultura. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra sobre a compactação em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háplico (CX). As amostras deformadas foram utilizadas na caracterização dos solos e as indeformadas na determinação dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo e na quantificação da compactação em decorrência da colheita mecanizada nos meses de novembro de 2005, março e agosto de 2006, e colheita manual sem tráfego, em março de 2006, por ser a época de maior intensidade pluvial. A porcentagem de amostras de solo, na região onde ocorre compactação adicional, indicou que o CX foi mais resistente à compactação que o LVA. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada na zona de friabilidade causou compactação do solo e a colheita realizada manualmente não promoveu o mesmo efeito. A colheita mecanizada deve ser realizada sob conteúdos de água no solo inferiores no LVA, em relação ao CX, de modo a evitar a compactação adicional.

---

<sup>1</sup> **Comitê de Orientação:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (orientador); Prof Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-orientador).

## ABSTRACT

SEVERIANO, Eduardo da Costa. Prediction and quantification from compaction of two soils submitted to harvest operations of sugarcane. In: \_\_\_\_\_ . **Indicators of structural quality in evaluation of soil compaction due to mechanized harvesting of sugarcane.** 2007. Chap. 2, p.26-46. Dissertation (Master Science in Soil Science)-Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.<sup>1</sup>

The mechanized harvesting of sugarcane in inadequate water contents in the soil has been responsible for soil compaction and reduction of yield in the later cycles of the crop. The objective of this study was to evaluate the effect of the cropping operations of sugarcane at different times of the crop on compaction in a Red-Yellow Latosol (LVA) and a Haplic Cambisol (CX). The disturbed samples were used in characterizing the soils and undisturbed samples in the bearing capacity models and quantification of the compaction due to mechanized harvesting in the months of november of 2005, march and august of 2006, and manual harversting with no traffic, in march of 2006, which is the time of higher rainfall intensity. The percentage of soil samples, in the region with additional soil compaction, indicated that the CX was the more resistance to the compaction to LVA. The mechanized harvesting of sugarcane in the range of friability caused soil compaction and harvest accomplished manually did not promote the effect. The mechanized harvesting of sugarcane should be accomplished in lower soil water contents in LVA in relation to CX in order to avoid additional compaction.

---

<sup>1</sup> **Guidance committee:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (adviser); Prof. Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-adviser).

## 1 INTRODUÇÃO

A aceitação internacional do etanol como combustível e a lucratividade alcançada pelo setor sucroalcooleiro têm trazido euforia aos produtores de cana-de-açúcar, com reflexos na intensificação e na expansão do seu cultivo. Dentre os fatores de produção relacionados com a modernização da canavieira brasileira, destaca-se o crescimento da demanda pela colheita mecanizada (Magalhães & Braunbeck, 1998). Entretanto, o tráfego de máquinas vem promovendo alterações nas propriedades físicas do solo (Souza et al., 2005) e aumentando o processo de compactação do mesmo (Vasconcelos, 2002), o que traz como conseqüências a queda de produtividade da cultura e o aumento dos processos erosivos (Oliveira et al., 2004).

Na região Centro-Sul do Brasil, a safra canvieira estende-se de abril a outubro (Horii, 2004) que se caracteriza por baixa intensidade pluvial. Por outro lado, observa-se tendência de redução do período de entressafra, o que possibilita o tráfego de máquinas durante a colheita em condições de elevados conteúdos de água no solo. Assim, torna-se necessário realizar a determinação da umidade do solo antes da realização das operações mecanizadas, pelo fato dela governar a capacidade de suporte de carga do solo (Kondo & Dias Júnior, 1999).

A disseminação da compactação dos solos em agrossistemas canvieiros tem sido atribuída à colheita mecanizada em condições de elevados conteúdos de água no solo (Pankhurst et al., 2003). Em condições inadequadas de colheita, a sustentabilidade agrícola e ambiental pode ser colocada em risco, por comprometer diretamente a qualidade estrutural do solo (Oliveira et al., 2003).

Os recentes estudos de modelagem da compactação de solos agrícolas (Imhoff et al., 2001; Dias Júnior et al., 2005; Silva et al., 2007), bem como o conhecimento da capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solo

(Dias Júnior et al., 2007), e da quantificação dos efeitos do tráfego em diferentes períodos da safra canavieira, podem se tornar a base necessária para a minimização dos impactos na estrutura dos solos inseridos nesses agrossistemas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra sobre a compactação em um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Cambissolo Háplico, no município de Goianésia, GO.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

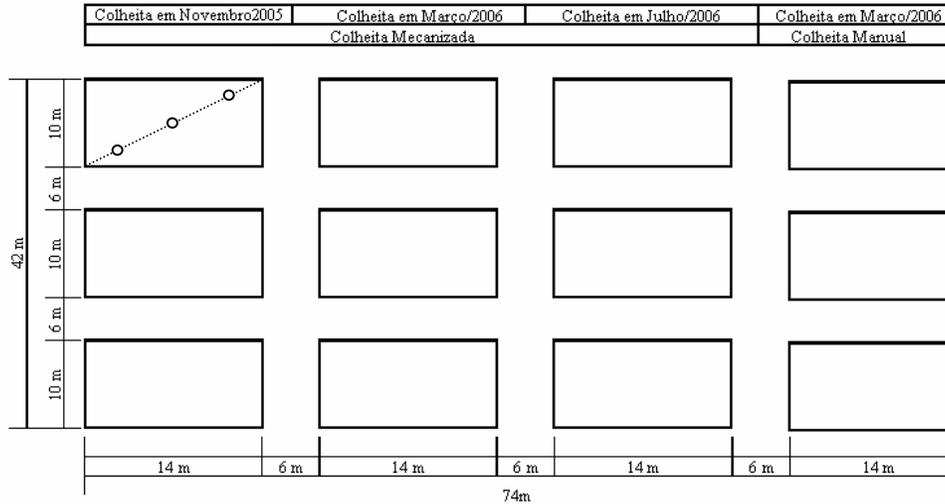
O estudo foi conduzido nas áreas experimentais pertencentes à empresa Jalles Machado S.A., localizada no município de Goianésia, GO, a 15°10'S de latitude e 49°15'W de longitude e 640 m de altitude. O clima local é classificado, segundo Köppen, como tropical de savana, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso (Aw), e média pluviométrica anual de 1.500 mm.

Na condução deste estudo selecionaram-se áreas experimentais em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háplico (CX) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, 2006). De acordo com a classificação de capacidade de uso (Lepsch, 1991), as terras onde se insere o LVA pertencem à classe III, tendo como maior limitação a baixa fertilidade natural, e as terras do CX à classe IV, sendo, nesse caso, a declividade o fator mais limitante.

Em março de 2004, por ocasião da renovação do canavial, após a rotação de cultura utilizando a soja, as áreas foram submetidas ao preparo do solo com as operações de aração e gradagens. Os solos foram sulcados, adubados e, na seqüência, foi realizado o plantio da cana-de-açúcar. Em setembro de 2005, foram demarcadas, em cada área, 12 parcelas com dimensões de 10 m de comprimento e 14 m de largura, com 10 linhas de cana-de-açúcar espaçadas em 1,40 m, possuindo carregadores de 6 m, em delineamento em blocos casualizados, conforme representado na Figura 1.

Antes das operações de colheita da cana-de-açúcar, foram feitas amostragens de solo em três pontos de uma linha diagonal dentro de cada parcela, distantes 6,6 m uma das outras e pontos extremos a 2 m da borda limítrofe da parcela (Figura 1). Foram coletadas, na posição das entrelinhas da cana-de-açúcar, 6 amostras de solo indeformadas em anéis com 6,40 cm de diâmetro e 2,50 cm de altura por parcela, na profundidade de 0 a 5 cm,

totalizando 144 amostras (6 amostras x 12 parcelas x 2 solos), as quais foram parafinadas no campo para a manutenção do conteúdo de água.



**FIGURA 1.** Esquema da área experimental.

As amostras deformadas obtidas das porções superiores e inferiores das seis amostras indeformadas de cada parcela foram misturadas para formarem uma amostra composta. Foram coletadas também quatro amostras deformadas na profundidade do horizonte diagnóstico de cada solo, utilizadas na caracterização química e física dos solos. A determinação dos limites de contração (LC), plasticidade (LP) e liquidez (LL) dos solos foi realizada apenas na profundidade de 0 a 5 cm, segundo proposto por Embrapa (1997).

Na determinação das curvas de retenção de água no solo, doze amostras indeformadas de cada solo foram saturadas e submetidas às tensões de 2, 4, 6 e 10 kPa na coluna de areia (Reinert & Reichert, 2006) e 33, 60, 80, 100, 500 e 1.500 kPa nos aparelhos extratores de Richards (Embrapa, 1997). As demais amostras indeformadas foram equilibradas a conteúdos de água variando entre

os teores correspondentes às tensões de 2 a 1.500 kPa, sendo, então, submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (Dias Junior, 1994). As pressões aplicadas em cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 120, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma delas aplicada até que se atingisse 90% da deformação máxima (Taylor, 1948) e somente então foi aplicada uma nova pressão. Em seguida, as amostras foram secadas em estufa a 105°C, por 48 horas, para a determinação da densidade do solo (Ds). A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) foi obtida segundo Dias Júnior & Pierce (1995).

Na seqüência, três parcelas em cada experimento foram submetidas à colheita mecanizada, consistindo no tráfego de duas passadas em cada entrelinha da cultura do seguinte maquinário: colhedora de cana Cameco, modelo CWH 2500 B, com tara de 16,5 Mg, trator Jonh Deere, modelo 6605, com tara de 4,5 Mg e transbordo Cameco, modelo SMR 8500, com tara de 6,4 Mg, carregados com 8 Mg de cana picada. As colheitas foram realizadas nos meses de novembro de 2005, março e agosto de 2006, possibilitando que os solos se encontrassem em diferentes conteúdos de água, por ocasião dessa operação. Para efeito comparativo dos efeitos da colheita mecanizada da cana-de-açúcar na compactação do solo, realizou-se a colheita manual de cana crua, sem tráfego de máquinas, em março de 2006, por ser esta a época de maior intensidade pluvial na região.

Após a colheita da cana-de-açúcar, coletaram-se amostras indeformadas e, no laboratório, procedeu-se a determinação do conteúdo de água no solo por ocasião da colheita, segundo metodologia proposta por Embrapa (1997) e ensaios de compressão uniaxial, conforme descrito anteriormente.

Para a obtenção das curvas características de água do solo, os conteúdos gravimétricos de água (U) foram ajustados de acordo com a tensão da água no solo ( $\psi_m$ ), segundo van Genuchten (1980), com o uso do software SWRC (Dourado Neto et al., 2001).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos solos foram obtidos ajustando-se a  $\sigma_p$  em função do conteúdo de água no solo, conforme Dias Junior (1994) e, as comparações das regressões foram feitas segundo Snedecor & Cochran (1989). Determinou-se o intervalo de confiança, a 95%, dos modelos de capacidade de suporte de carga e as três regiões propostas por Dias Junior et al. (2005) foram utilizados no monitoramento da compactação dos solos em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor de Ki inferior a 2,2 no CX o caracteriza como sendo muito intemperizado, segundo Embrapa (2006) (Tabela 1). Resende et al. (2007) justificam esses valores pela provável formação a partir do horizonte C de antigos Latossolos, cujos horizontes A e B foram erodidos em passado muito distante.

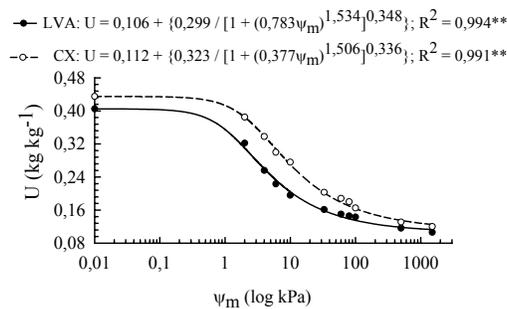
**TABELA 1.** Caracterização química e física do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e do Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO.

Prof. <sup>1</sup> (cm)	Dp <sup>2</sup> (kg dm <sup>-3</sup> )	Ataque sulfúrico <sup>3</sup>			Granulometria <sup>4</sup>				Ki	Kr
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	S	AF	AG		
Latossolo Vermelho (LVA)										
0-5	2,64				301	105	532	62		
60-80	2,70	128	170	50	352	132	458	58	1,27	1,08
Cambissolo Háplico (CX)										
0-5	2,67				266	206	489	39		
40-60	2,68	117	152	68	323	209	434	34	1,32	1,03

<sup>(1)</sup>: Profundidades correspondentes à camada superficial e horizonte B (diagnóstico) dos solos. <sup>(2)</sup>: Dp: Densidade de partículas pelo método do picnômetro (média de 12 repetições); <sup>(3)</sup>: Média de 4 repetições; <sup>(4)</sup>: Determinada pelo método da pipeta (média de 12 repetições); A: argila; S: silte; AF: areia fina; AG: areia grossa; Ki: relação molecular SiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Kr: relação molecular SiO<sub>2</sub>:(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

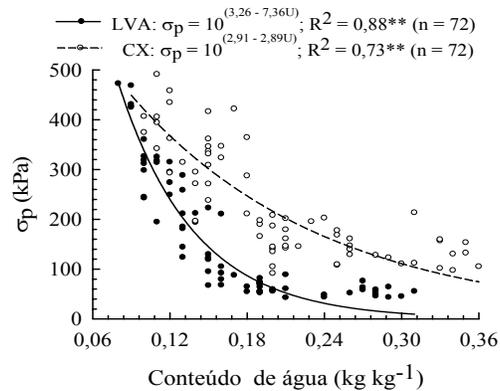
A mineralogia, a textura e a estrutura são citadas por Lebert & Horn (1991) como fatores internos que influenciam o processo de compactação do solo. Os valores de Kr superiores a 0,75, nos dois solos (Tabela 1), indicam que ambos são solos cauliniticos (Embrapa, 2006). Além da semelhança mineralógica, há grande semelhança granulométrica entre os solos (Tabela 1). Dessa forma, sugere-se forte participação do tipo, classe e grau da estrutura dos solos no processo de compactação dos mesmos.

O CX apresentou maior retenção de água (Figura 2), em função do maior ajuste entre as suas partículas que, segundo Jaccoud & Castro (1976), leva ao aumento das tensões de água no solo. Esse comportamento é observado particularmente nas baixas tensões, ao passo que sob altas tensões, há tendência de as curvas de retenção de água se aproximarem, devido à semelhança textural dos solos (Centurion & Andrioli, 2000) (Tabela 1).



**FIGURA 2.** Curva característica de água no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e no Cambissolo Háplico (CX) à profundidade de 0-5 cm, cultivados com cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO.

A utilização dos procedimentos estatísticos de Snedecor & Cochran (1989) mostrou diferenças entre o comportamento compressivo dos solos (Figura 3). A maior capacidade de suporte de carga do CX se deve ao maior ajuste entre as partículas inter e entre agregados em função, da classe de pequena a média dos blocos subangulares e do grau de moderado a forte da estrutura, em comparação a estrutura do LVA em blocos subangulares muito pequenos, com grau fraco de agregação, e que se desfazem em grânulos pequenos com forte grau de agregação (Santos et al., 2005). Esses resultados corroboram com aquelas encontrados por Silva et al. (1999) em classes de solos semelhantes às do estudo.



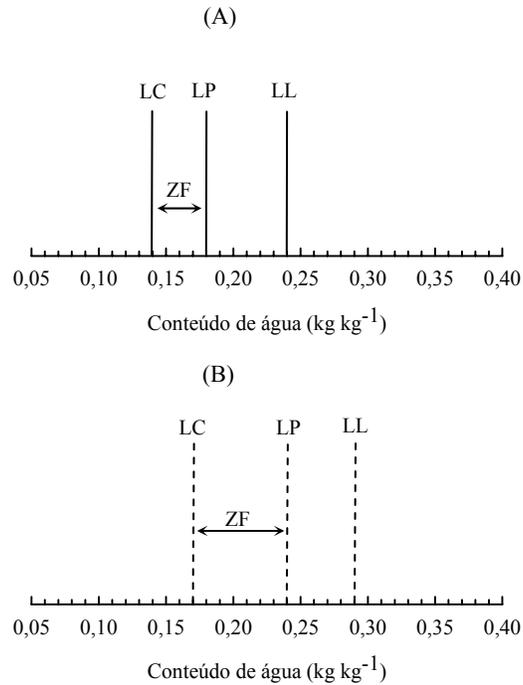
**FIGURA 3.** Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossoilo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar, na profundidade de 0-5 cm, no município de Goianésia, GO.

Se, por um lado, o CX apresenta maior resistência à compactação (Figura 3), pelo seu maior grau da estrutura, quantificado pela  $\sigma_p$ , o mesmo também apresenta maior retenção de água (Figura 2), sendo necessária maior cautela a respeito da melhor momento para a realização das operações mecanizadas no mesmo, a fim de se evitar a sua degradação estrutural (Kondo & Dias Júnior, 1999), uma vez que, em épocas de maior intensidade pluvial, o mesmo se encontrará em conteúdos de água no solo superior ao LVA.

Os valores de capacidade de suporte de carga do solo podem ser considerados baixos, particularmente sob altos conteúdos de água no solo, o que pode ser atribuído ao fato de o preparo do solo, por ocasião da renovação do canavial, ter provocado alívio das forças de coesão das partículas, em função da eliminação do histórico de uso do solo (Veiga et al., 2007).

Preconiza-se que a mecanização dos solos seja realizada quando seu conteúdo de água corresponder à zona de friabilidade (ZF), definida como o intervalo entre o conteúdo de água no limite de contração (LC) e no limite de plasticidade (LP). Observa-se que o CX apresenta maior ZF em comparação ao

LVA (Figura 4) e, nesta faixa de água no solo, sua capacidade de suporte de carga variou de 262 a 165 kPa, enquanto que, no LVA, foi de 170 a 86 kPa (Figura 3).



**FIGURA 4.** Limites de contração (LC), plasticidade (LP) e liquidez (LL) e zona de friabilidade (ZF) à profundidade de 0-5 cm de um (A) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um (B) Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar no município de Goianésia, GO.

Uma vez sendo  $\sigma_p$  a maior pressão que deve ser aplicada ao solo sem que ocorra compactação adicional e adotando-se os valores de pressão média aplicada aos solos pelas máquinas agrícolas entre 50 e 300 kPa (Lebert & Horn, 1991), observa-se uma maior possibilidade de ocorrer compactação, principalmente no LVA, mesmo em conteúdos de água no solo abaixo do preconizado pela ZF (Figuras 3 e 4) (Kondo & Dias Junior, 1999).

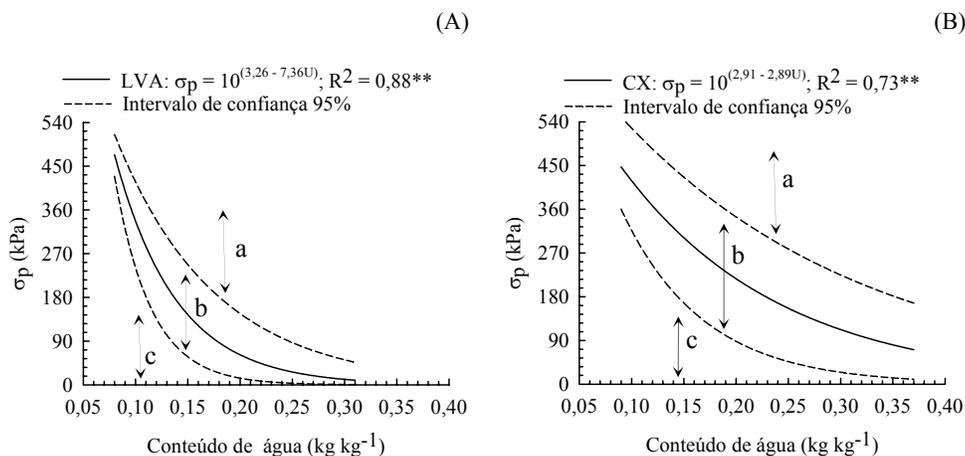
A realização da colheita da cana-de-açúcar em diferentes períodos da safra canavieira promoveu o tráfego das máquinas em diferentes conteúdos de água no solo (Tabela 2). Para as épocas avaliadas, no mês de novembro de 2005 os solos se encontravam na ZF e, em agosto de 2006, abaixo desta faixa (Figura 4), sendo esta a condição recomendada para o tráfego de máquinas (Kondo & Dias Júnior, 1999). Em março de 2006, o solo se encontrava com conteúdo de água no solo acima da faixa da ZF, considerada inadequada para o tráfego.

**TABELA 2.** Conteúdo de água nos solos, por ocasião da colheita da cana-de-açúcar na profundidade de 0-5 cm do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e do Cambissolo Háplico (CX)<sup>1</sup>.

Solo	Colheita Mecanizada			Colheita Manual
	11/05 <sup>2</sup>	03/06 <sup>3</sup>	08/06 <sup>4</sup>	03/06 <sup>3</sup>
	----- Conteúdo gravimétrico de água no solo (kg kg <sup>-1</sup> ) -----			
LVA	0,16 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )	0,19 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )	0,11 (± 4,7x10 <sup>-3</sup> )	0,19 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )
CX	0,22 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )	0,26 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )	0,16 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )	0,26 (± 2,4x10 <sup>-3</sup> )

<sup>(1)</sup> Média de 18 repetições. Épocas de colheita: <sup>(2)</sup>: novembro de 2005; <sup>(3)</sup>: março de 2006; <sup>(4)</sup>: agosto de 2006. Número entre parênteses: erro padrão da média (s<sub>x</sub>).

Para a avaliação dos efeitos decorrentes do tráfego de máquinas durante a colheita da cana-de-açúcar sobre a pressão de preconsolidação, a Figura 3 foi dividida em três regiões, de acordo com Dias Junior et al. (2005) e apresentada na Figura 5. Na região “A” a compactação adicional já ocorreu; Na região “B”, indica que não ocorreu compactação adicional do solo, porém há uma tendência desta ocorrência se as próximas operações mecanizadas excederem a capacidade de suporte de carga do solo e a região “C” é aquela onde não ocorreu compactação do solo.



**FIGURA 5.** Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (A) e um Cambissolo Háplico (CX) (B), e critérios utilizados para analisar os efeitos das operações de colheita da cana-de-açúcar. Região “a”: com compactação, “b”: com tendência a compactar e “c”: sem compactação, segundo Dias Júnior et al. (2005).

Observa-se que, no momento da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, à medida que se aumentou o conteúdo de água no solo, maiores foram os danos prováveis na sua estrutura (Tabela 3), corroborando com Dias Júnior et al. (2005). Por outro lado, a colheita manual, mesmo em elevados conteúdos de água no solo, não alterou a estrutura dos solos, devido à ausência de tráfego de máquinas.

Os menores incrementos na compactação adicional do CX se devem à sua maior capacidade de suporte de carga (Figura 3). Embora, em agosto de 2006, o CX se encontrasse com o mesmo conteúdo de água do LVA, em novembro de 2005, apenas no LVA foi observada a ocorrência de compactação adicional (Tabela 3). Analisando dentro de uma mesma época, apesar dos maiores conteúdos de água no CX, a porcentagem de compactação adicional no mesmo foi igual ou inferior à do LVA, sugerindo que o tráfego sobre este último

solo seja realizado em épocas da safra canvieira em que o mesmo apresente menores conteúdos de água.

**TABELA 3.** Valores médios de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), determinados após as operações de colheita da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háplico (CX), à profundidade de 0–5 cm e classificação das amostras, em porcentagem, de acordo com cada região apresentada na figura 5.

Região	Mecanizada			Manual	Mecanizada			Manual
	11/05 $\sigma_p$ (kPa)	03/06 $\sigma_p$ (kPa)	08/06 $\sigma_p$ (kPa)	03/06 $\sigma_p$ (kPa)	11/05 $\sigma_p$ (kPa)	03/06 $\sigma_p$ (kPa)	08/06 $\sigma_p$ (kPa)	03/06 $\sigma_p$ (kPa)
----- LVA -----								
a. Com compactação	256 <sup>3</sup>	265 <sup>2</sup>	-	-	33	100	0	0
b. Com tendência a compactar	162 <sup>4</sup>	-	292 <sup>2</sup>	59 <sup>2</sup>	67	0	100	100
c. Sem compactação	-	-	-	-	0	0	0	0
----- CX -----								
a. Com compactação	326 <sup>3</sup>	292 <sup>5</sup>	-	-	33	50	0	0
b. Com tendência a compactar	266 <sup>4</sup>	246 <sup>5</sup>	332 <sup>2</sup>	140	67	50	100	100
c. Sem compactação	-	-	-	-	0	0	0	0

(<sup>1</sup>): De acordo com os critérios proposto por Dias Júnior et al. (2005); (<sup>2</sup>) média de 18 amostras; (<sup>3</sup>) média de 6 amostras; (<sup>4</sup>) média de 12 amostras; (<sup>5</sup>) média de 9 amostras. 11/05: novembro de 2005; 03/06: março de 2006; 08/06: agosto de 2006.

Ressalta-se a ocorrência de compactação adicional nos dois solos no mês de novembro de 2005, ocasião em que o conteúdo de água em ambos se encontrava dentro da ZF (Figura 4), confirmando o alerta apontado por Kondo e Dias Júnior, 1999 e Oliveira et al. (2003) sobre a possibilidade de ocorrência de compactação, mesmo o solo sendo trabalhado na ZF. Sugere-se, portanto, além da modelagem da compactação de diferentes classes de solos, a necessidade de adoção de medidas preventivas para evitar a compactação do solo no manejo da

colheita mecanizada da cana-de-açúcar, como controle do nível de pressão por eixo das máquinas (Dias Júnior, 2000) ou, ainda, o tráfego sobre restos culturais (Silva et al., 2007).

Sendo a  $\sigma_p$  a máxima pressão aplicada ao solo no passado (Dias Junior 1994) e destacando que a carga dos maquinários excedeu a capacidade de suporte de carga dos solos nos meses de maiores conteúdo de água no solo, sugere-se que o maquinário de colheita da cana-de-açúcar aplique na camada superficial, pressões entre 256 e 326 kPa, por serem estes o menor e o maior valor de  $\sigma_p$  determinados após essas operações que se localizaram na região “a” (Dias Júnior et al., 2005) dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (Tabela 3).

Apesar de o CX em estudo apresentar maior flexibilidade para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar por possuir maior capacidade suporte de carga, salienta-se que esse solo está inserido em relevo movimentado, se enquadrando na classe de capacidade de uso IV, segundo Lepsch (1991), particularmente por este motivo, podendo apresentar sérios problemas de conservação, sugerindo a necessidade de cuidados especiais no seu uso. O uso inadequado do solo pode resultar em conseqüências ambientais desastrosas (Resende et al., 2007).

## 4 CONCLUSÕES

1. O Cambissolo apresentou maior resistência à compactação em relação ao Latossolo.

2. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada na zona de friabilidade provocou compactação do solo.

3. A colheita da cana-de-açúcar realizada manualmente não promoveu compactação do solo.

4. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar deve ser realizada sob conteúdos de água no solo inferiores no LVA, em relação ao CX, de modo a evitar a compactação adicional.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n.4, p.701-709, 2000.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science)-Michigan State University, East Lansing.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCAEFER, C.E.G.C. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.2, p.257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v.8, p.139-151, 1995.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMAN, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil Water Retention Curve (SWRC)**. Version 3.0, Piracicaba, 2001. Software.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

HORII, J. A cana-de-açúcar como matéria-prima. **Visão Agrícola**, Piracicaba, p. 88-93, 2004.

- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A.  
Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.11-18, 2001.
- JACCOUD, A.; CASTRO, A.F. Curvas de caracterização de umidade de solos da área da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, município de Itaguaí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.11, p.1-9, 1976.
- KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.211-218, 1999.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.
- LEPSCH, I.F. (Coord.). **Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175 p.
- MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O. A. Colheita da cana-de-açúcar: atualidades e perspectivas. In: BALBUENA, R.H.; BENEZ, S.H.; JORAJURÍA. (Ed.). **Ingeniería rural y macanización agrária em el ámbito latinoamericano**. La Plata, Editora de la Universidad Nacional de la Plata, 1998. v.1, p.262-273.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.2, p.291-299, 2003.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.28, p.327-336, 2004.
- PANKHURST, C.E.; MAGAREY, R.C.; STIRLING, G.R. BLAIR, B.L.; BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v.72, p.125-137, 2003.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. de; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5.ed. Lavras: UFLA, 2007. 322p.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, U.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG: SBCS, 2005. 92p.

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.1, p.89-93, 2007.

SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.219-226, 1999.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8<sup>th</sup>ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.

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.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700p.

VAN GENUCHTEN, M.T.H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140p. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

### **CAPÍTULO 3**

#### **PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADORES DE ALTERAÇÕES ESTRUTURAIIS DO SOLO EM DECORRÊNCIA DAS OPERAÇÕES DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

## RESUMO

SEVERIANO, Eduardo da Costa. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. In: \_\_\_\_\_. **Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar.** 2007. Cap. 3, p.47-71. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>1</sup>

A identificação dos impactos da colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar sobre a estrutura do solo, em diferentes classes, pode-se tornar uma importante estratégia de manejo para a minimização dos efeitos da compactação do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações estruturais, a pressão de preconsolidação e o intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háplico (CX), em consequência das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra. Coletaram-se amostras indeformadas de solo na profundidade de 0 a 5 cm para determinar a pressão de preconsolidação, densidade e porosidade do solo, agregação e o IHO e amostras deformadas para a caracterização química e física do solo. O CX apresentou maior resistência à compactação que o LVA. O conteúdo de água no solo durante a colheita da cana-de-açúcar variou na seguinte ordem: agosto de 2006 < novembro de 2005 < março de 2006 e CX > LVA em cada época. A densidade do solo na pressão de preconsolidação foi um bom indicativo para diagnosticar a ocorrência de alterações estruturais no solo. A macroporosidade do solo limitante apresentou restrições ao crescimento das plantas em níveis de compactação inferiores à densidade do solo crítica do IHO. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada em conteúdos de água no

---

<sup>1</sup> **Comitê de Orientação:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (orientador); Prof Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-orientador).

solo até 0,16 e 0,21 kg kg<sup>-1</sup>, para LVA e CX, respectivamente, não promoveu compactação excessiva dos solos.

## ABSTRACT

SEVERIANO, Eduardo da Costa. Preconsolidation pressure and least limiting water range as indicators of structural changes due to harvest operations of sugarcane. In: \_\_\_\_\_. **Indicators of structural quality in evaluation of soil compaction due to mechanized harvesting of sugarcane**. 2007. Chap. 3, p.47-71. Dissertation (Master Science in Soil Science)-Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.<sup>1</sup>

The identification of impacts of mechanized harvesting of sugarcane on soil structure, in different soil classes, can be an important strategy for minimization of effects of soil compaction. The objective of this work was to evaluate the structural changes, preconsolidation pressure and the least limiting water range (LLWR) in a Red-Yellow Latosol (LVA) and in a Haplic Cambisol (CX), due to the harvest operations of sugarcane at different times of the crop. Undisturbed soil samples were collected in the depth of 0 to 5 cm to determine preconsolidation pressure, bulk density and porous space, aggregation and the LLWR and disturbed samples for chemical and physical characterization of the soil. The CX presented a higher compaction resistance than LVA. The soil water content during the harvest of sugarcane varied in the following order: August of 2006 < November of 2005 < March of 2006, and CX > LVA at each time. The bulk density in the preconsolidation pressure was a good indicative of the diagnosis of occurrence of structural changes in the soil. Limiting soil macro porosity presented restrictions for plants growth at compaction levels smaller than the critical bulk density of LLWR. The mechanized harvesting of sugarcane accomplished in soil water contents up to 0.16 and 0.21 kg kg<sup>-1</sup>, for the LVA and CX, respectively, did not promote excessive soil compaction.

---

<sup>1</sup> **Guidance committee:** Prof. Geraldo César de Oliveira – DCS/UFLA (adviser); Prof. Moacir de Souza Dias Júnior – DCS/UFLA (Co-adviser).

## 1 INTRODUÇÃO

A compactação dos solos em áreas canavieiras tem ocorrido em virtude das operações de manejo que envolvem o tráfego de máquinas em conteúdos inadequados de água nos mesmos. O tipo de colheita da cana-de-açúcar pode influenciar a produção e a longevidade da cultura, nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e em danos ambientais (Souza et al., 2005).

A preservação da estrutura do solo garante condições físicas adequadas ao crescimento das plantas e pode ser alcançada pelo monitoramento das operações mecanizadas. As alterações nas relações massa/volume e na resistência mecânica do solo interagem entre si, alterando o ambiente radicular (Silva et al., 2001). Nesse contexto, o intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido sugerido como indicador de qualidade do solo que abrange a resistência à penetração, a disponibilidade de água e a aeração, os quais afetam diretamente a produtividade agrícola (Silva et al., 1994).

A amplitude do IHO indica o risco de exposição das culturas ao estresse físico do solo e a magnitude na qual a condição estrutural do solo restringe o desenvolvimento das plantas (Silva & Kay, 1997). Solos com estrutura preservada apresentam restrições apenas em termos de déficit hídrico. Entretanto, quando a compactação do solo atinge níveis excessivos, a aeração se torna deficiente, sob condições de elevados conteúdos de água no solo, e a resistência à penetração poderá restringir o desenvolvimento das plantas com o secamento do solo (Lapen et al., 2004). Nesse cenário, o IHO significa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo o indicador que melhor se correlaciona com o crescimento das plantas (Tormena et al., 2007).

As diferenças no arranjo das partículas do solo, derivadas dos processos pedogenéticos (Centurion et al., 2007), resultam em comportamento diferenciado quando o solo é submetido à compressão decorrente do tráfego de

máquinas. Dessa forma, para um correto planejamento agrícola, é necessário o conhecimento da capacidade de suporte de carga das diferentes classes de solo (Dias Junior et al., 2007). A minimização dos impactos na estrutura dos solos dependerá da adequação da trafegabilidade das máquinas sobre o solo às diferentes condições climáticas ao longo da safra canavieira.

O presente trabalho objetivou avaliar as alterações estruturais, a pressão de preconsolidação e o intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Cambissolo Háplico, no município de Goianésia, GO, submetidos às operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas da safra.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a condução deste estudo selecionaram-se duas áreas experimentais pertencentes à empresa Jalles Machado S.A., localizada no município de Goianésia, GO, a 15°10'S de latitude, 49°15'W de longitude e 640 m de altitude. O clima local é do tipo Aw, segundo Köppen, quente e úmido, com longa estação seca e precipitações anuais médias de 1.500 mm.

Os solos das áreas experimentais foram classificados, segundo Embrapa (2006), como Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso (LVA), pertencente à classe III do sistema de capacidade de uso, segundo classificação de Lepsch (1991), tendo como maior limitação a baixa fertilidade natural e um Cambissolo Háptico franco argilo-arenoso (CX), pertencente à classe IV do sistema de capacidade de uso, sendo a declividade do terreno o fator mais limitante para o manejo conservacionista.

Em março de 2004 procedeu-se a renovação do canavial, submetendo as áreas ao preparo do solo com uma aração e duas gradagens, e sulcados por ocasião do plantio da cana-de-açúcar. Em setembro de 2005, foram demarcadas, em cada área de solo, 12 parcelas com dimensões de 10 m de comprimento e 14 m de largura, com 10 linhas de cana-de-açúcar espaçadas em 1,40 m.

Antes da realização da colheita da cana-de-açúcar, foram feitas amostragens em 3 pontos de uma linha diagonal dentro de cada parcela, distantes 6,6 m uma das outras e pontos extremos a 2 m da borda limítrofe da parcela. Foram coletadas, na posição das entrelinhas da cana-de-açúcar, 6 amostras indeformadas por parcela, na profundidade de 0 a 5 cm, em cilindros com dimensões de 6,40 cm de diâmetro 2,50 cm de altura, totalizando 144 amostras (6 amostras x 12 parcelas x 2 solos), as quais foram parafinadas no campo para a manutenção do conteúdo de água. Os materiais de solo, obtidos das porções superiores e inferiores dos anéis coletados em cada parcela, foram

misturados para formar uma amostra composta. Foram coletadas também quatro amostras deformadas na profundidade do horizonte diagnóstico de cada solo. As amostras deformadas resultantes das sobras dos anéis foram submetidas à caracterização química e física dos solos (Tabela 1) e ao aparelho extrator de Richards à tensão de 1.500 kPa, para a determinação do ponto de murcha permanente, segundo Embrapa (1997).

**TABELA 1.** Caracterização química e física do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo Háplico (CX).

Prof. <sup>(1)</sup> (cm)	Dp <sup>2</sup> (kg dm <sup>-3</sup> )	Ataque sulfúrico <sup>3</sup>			Granulometria <sup>4</sup>				Ki	Kr
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	S	AF	AG		
----- (g kg <sup>-1</sup> ) -----										
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)										
0-5	2,64				301	105	532	62		
60-80	2,70	128	170	50	352	132	458	58	1,27	1,08
Cambissolo Háplico (CX)										
0-5	2,67				266	206	489	39		
40-60	2,68	117	152	68	323	209	434	34	1,32	1,03

<sup>(1)</sup>: Profundidades correspondentes à camada superficial e horizonte B (diagnóstico) dos solos. <sup>(2)</sup>: Dp: densidade de partículas (média de 12 repetições); <sup>(3)</sup>: média de 4 repetições; <sup>(4)</sup>: média de 12 repetições; A: argila; S: silte; AF: areia fina; AG: areia grossa; Ki: relação molecular SiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Kr: relação molecular SiO<sub>2</sub>: (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

As amostras indeformadas foram inicialmente saturadas e submetidas à tensão de 6 kPa, para a determinação da microporosidade e capacidade de campo (Embrapa, 1997; Mello et al., 2002). Posteriormente, essas amostras foram ajustadas a diferentes conteúdos de água e submetidas ao teste de penetrometria (Tormena et al., 1998) e ao ensaio de compressão uniaxial (Dias Junior, 1994). Em seguida, as amostras foram secadas em estufa, a 105°C, por 48 horas, para a determinação da densidade do solo (Ds). O volume total de poros (VTP) foi determinado pela expressão:  $VTP = (1 - Ds/Dp)$ , sendo Ds a densidade do solo e Dp a densidade de partículas. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre VTP e microporosidade, segundo Embrapa (1997). A

pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e a densidade do solo na pressão de preconsolidação ( $Ds\sigma_p$ ) foram obtidas da curva de compressão do solo segundo Dias Júnior & Pierce (1995). A relação das densidades ( $\Delta Ds$ ) foi obtida pela relação  $Ds / Ds\sigma_p$ .

Os valores de resistência à penetração (RP), obtidos em  $\text{kgf cm}^{-2}$ , foram multiplicados pelo fator 0,098 para transformação em MPa e ajustados a modelos não lineares, em função do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) e da  $Ds$  (Busscher, 1990). Empregando-se as equações 1 e 2, foram determinados os conteúdos de água no solo, cuja resistência à penetração assume valores limitantes ao desenvolvimento das plantas ( $\theta_{RP}$ ):

Eq. (1)

$$LVA : RP = 0,005\theta^{-2,22} Ds^{6,01}; R^2 = 0,73 **$$

$$CX : RP = 0,052\theta^{-0,86} Ds^{7,01}; R^2 = 0,70 **$$

Eq. (2)

Consideraram-se como limites superiores do IHO (Silva et al., 1994), o conteúdo de água no solo na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ou a porosidade de aeração adequada ao desenvolvimento da cultura ( $\theta_{PA}$ ), obtida pela fórmula:  $\theta_{PA} = (VTP - 0,1)$  (Silva et al., 2001). Os limites inferiores foram considerados como conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e/ou o conteúdo de água correspondente à resistência à penetração de 2,5 MPa ( $\theta_{RP}$ ) (Camargo & Alleoni, 1997).

Para a avaliação dos efeitos das operações de colheita da cana-de-açúcar sobre a estrutura do solo foi realizada a colheita mecanizada, utilizando-se os seguintes maquinários: tráfego de duas passadas em cada entrelinha da cultura do seguinte maquinário: colhedora de cana Cameco, modelo CWH 2500 B, com tara de 16,5 Mg; trator John Deere, modelo 6605, com tara de 4,5 Mg e transbordo Cameco, modelo SMR 8500, com tara de 6,4 Mg, carregados com 8 Mg de cana picada.

Procedeu-se a colheita em três parcelas de cada área de solo em cada época, nos meses de novembro de 2005, março e agosto de 2006, possibilitando que os solos se encontrassem em diferentes conteúdos de água por ocasião dessa operação. As operações de colheita manual de cana crua sem tráfego de máquinas foram realizadas em março de 2006, por ser esta a época de maior intensidade pluvial na região, para comparação com as prováveis alterações estruturais decorrentes da colheita mecanizada.

Após a colheita da cana-de-açúcar, coletaram-se amostras indeformadas e, no laboratório, procederam-se a determinação do conteúdo de água no solo por ocasião da colheita (Embrapa, 1997), macro e microporosidade, teste de penetrometria e limites do IHO, conforme já descritos.

Coletaram-se, ainda, 144 amostras indeformadas (3 amostras x 12 parcelas x 2 solos x 2 épocas) para a obtenção de materiais de solo com diâmetro entre 2,0 e 8,0 mm, conforme recomendações de Guedes (1997). A estabilidade de agregados foi determinada por peneiramento em água, sendo utilizado o diâmetro médio geométrico (DMG) como índice de agregação (Kemper & Rosenau, 1986). O teor de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983) foi determinado no material de solo obtido no preparo das amostras dos agregados.

Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) foi ajustada em função do conteúdo gravimétrico de água no solo (U), segundo modelo proposto por Dias Junior (1994), usando o software Sigma Plot 9.0. A comparação das regressões foi realizada seguindo os procedimentos de comparação entre regressões descritos por Snedecor & Cochran (1989).

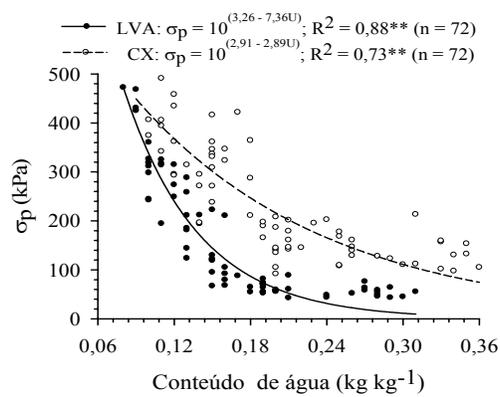
Os IHOs foram obtidos ajustando-se os limites do conteúdo volumétrico de água no solo em função da  $D_s$  (Silva et al., 1994). A densidade do solo crítica ao desenvolvimento das plantas ( $D_{sc}$ ), quando presente, foi considerada como o valor de  $D_s$  em que o  $IHO=0$ . A água disponível (AD) foi determinada pela

diferença entre os conteúdos volumétricos de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), quando estes foram os limites superiores e inferiores do IHO.

Os resultados dos atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento em blocos casualizados e parcelas subdivididas no tempo, sendo estas as avaliações realizadas antes e após as operações de colheita. As comparações das médias foram realizadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos estudados apresentaram comportamentos diferenciados em termos de capacidade de suporte de carga do solo (não homogêneo para as regressões,  $F = 50,17$ ;  $p < 0,001$  para o coeficiente linear e  $F = 134,80$ ;  $p < 0,001$  para o coeficiente angular). A maior capacidade de suporte de carga foi verificada no CX (Figura 1), o que está relacionado ao maior ajuste entre partículas provenientes de sua estrutura em blocos subangulares de classe pequena a média e grau moderado a forte (Santos et al., 2005), ao passo que a estrutura do LVA é do tipo blocos subangulares muito pequeno, com grau fraco de agregação. Essas características conferem ao LVA maior possibilidade de ajustes das partículas do solo quando submetido ao tráfego de máquinas, corroborando com Silva et al. (1999), apesar da semelhança mineralógica (caulinítica, para valores de  $K_r$  superior a 0,75, segundo Embrapa, 2006) e textural (Tabela 1), citadas por Lebert & Horn (1991) como fatores internos determinantes no processo de compactação.



**FIGURA 1.** Modelos de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e o Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar, na profundidade de 0-5 cm, no município de Goianésia, GO.

A capacidade de suporte de carga dos solos estudados pode ser considerada baixa, particularmente sob altos conteúdos de água (Figura 1). Para o LVA, a redução da pressão de preconsolidação com o incremento do conteúdo de água ocorreu de maneira abrupta, verificado pelo elevado coeficiente angular da regressão (7,36), sendo este o maior valor encontrado na literatura. Esse comportamento pode ser atribuído à eliminação da história de tensão do solo (Kondo & Dias Júnior, 1999), durante o seu preparo por ocasião da renovação do canal, exigindo, portanto, maior cautela a respeito do momento adequado para a realização das operações mecanizadas de colheita, a fim de se evitar a degradação estrutural do mesmo.

Apesar da maior densidade do solo inicial ( $D_{si}$ ) no LVA (Tabela 2), o mesmo apresentou menor capacidade de suporte de carga (Figura 1). Sugere-se, portanto, o grau da estrutura, quantificado por meio da pressão de preconsolidação, como sendo a principal característica da estrutura pedológica do solo relacionada à maior suscetibilidade ou resistência à compactação do solo.

**TABELA 2.** Volume total de poros (VTP), densidade do solo ( $D_s$ ), densidade do solo na pressão de preconsolidação ( $D_s\sigma_p$ ) e a relação dessas densidades ( $\Delta D_s$ ), na profundidade de 0-5 cm, do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar no município de Goianésia, GO<sup>(1)</sup>.

Solo	VTP ( $\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ )	$D_s$	$D_s\sigma_p$ ----- (kg $\text{dm}^{-3}$ ) -----	$\Delta D_s$
LVA	0,48 B ( $\pm 0,01$ )	1,37 A ( $\pm 0,02$ )	1,45 A ( $\pm 0,01$ )	1,07 A ( $\pm 0,01$ )
CX	0,52 A ( $\pm 0,01$ )	1,29 B ( $\pm 0,02$ )	1,39 B ( $\pm 0,02$ )	1,08 A ( $\pm 0,01$ )

<sup>(1)</sup> Para cada parâmetro analisado, médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média de 18 repetições). Números entre parêntese: intervalo de confiança (IC) da média.

A realização da colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas, promoveu o tráfego das máquinas em diferentes conteúdos de água no solo (Tabela 3).

**TABELA 3.** Distribuição temporal dos atributos físicos em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar, na profundidade de 0-5 cm, do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo Háplico (CX)<sup>1</sup>.

Solo	Antes do Tráfego	Colheita mecanizada			Colheita manual <sup>5</sup>
		11/05 <sup>2</sup>	03/06 <sup>3</sup>	08/06 <sup>4</sup>	
Conteúdo gravimétrico de água (kg kg <sup>-1</sup> )					
LVA	--	0,16 B (± 4x10 <sup>-3</sup> )	0,18 A (± 5x10 <sup>-3</sup> )	0,11 C (± 7x10 <sup>-3</sup> )	0,19 A (± 4x10 <sup>-3</sup> )
CX	--	0,22 B (± 6x10 <sup>-3</sup> )	0,26 A (± 3x10 <sup>-3</sup> )	0,16 C (± 6x10 <sup>-3</sup> )	0,26 A (± 5x10 <sup>-3</sup> )
Densidade do solo (Ds) (kg dm <sup>-3</sup> )					
LVA	1,37 D (± 0,02)	1,59 B (± 0,03)	1,71 A (± 0,03)	1,43 C (± 0,04)	1,32 D (± 0,02)
CX	1,29 C (± 0,02)	1,44 A (± 0,03)	1,47 A (± 0,01)	1,36 B (± 0,03)	1,26 C (± 0,02)
Macroporosidade (dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> )					
LVA	0,21 A (± 0,01)	0,10 C (± 0,02)	0,05 D (± 0,01)	0,16 B (± 0,02)	0,22 A (± 0,02)
CX	0,17 A (± 0,01)	0,10 B (± 0,01)	0,07 C (± 0,01)	0,14 B (± 0,02)	0,18 A (± 0,01)
Microporosidade (dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> )					
LVA	0,28 A (± 0,01)	0,30 A (± 0,01)	0,30 A (± 0,01)	0,30 A (± 0,01)	0,28 A (± 0,01)
CX	0,34 B (± 0,01)	0,35 B (± 0,01)	0,38 A (± 0,01)	0,35 B (± 0,01)	0,33 B (± 0,01)
Diâmetro Médio Geométrico (DMG) (mm)					
LVA	2,35 C (± 0,23)	3,73 A (± 0,59)	3,49 A (± 0,31)	2,97 B (± 0,35)	2,32 C (± 0,23)
CX	3,95 A (± 0,11)	4,17 A (± 0,24)	4,10 A (± 0,20)	4,26 A (± 0,05)	4,23 A (± 0,12)

<sup>(1)</sup> Para cada parâmetro analisado, em cada solo, nas diferentes épocas e modalidades de colheita, médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, nas linhas, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média de 18 repetições). Épocas de colheita: <sup>(2)</sup>: novembro de 2005; <sup>(3)</sup>: março de 2006; <sup>(4)</sup>: agosto de 2006; Números entre parêntese: Intervalo de confiança (IC) da média.

Em função do regime pluvial da região estudada, o incremento no conteúdo de água nos solos se deu na seguinte ordem: agosto de

2006<novembro de 2005<março de 2006. Por outro lado, o CX apresentou maiores conteúdos de água em todas as épocas avaliadas, o que poderia ser um fator determinante nas alterações estruturais desse solo dada a relevância da umidade no processo de compactação do solo (Dias Júnior, 1994).

As alterações estruturais nos solos provocadas pelas operações de colheita mecanizada da cana-de-açúcar ocorreram em função da capacidade de suporte de carga dos solos nas diferentes épocas (Figura 1 e Tabela 3), enquanto que a colheita manual de cana crua sem tráfego de máquinas manteve a estrutura inicial dos solos. As alterações estruturais dos solos sob tráfego não ocorreram de forma semelhante para todos os atributos, sendo elas o resultado da associação entre as propriedades e as características dos solos em análise (Assis & Lanças, 2005).

Observa-se, pelos dados da tabela 3, que a Ds e a macroporosidade do solo se comportaram de maneira inversa, o que se deve à forte correlação existente entre esses atributos (Oliveira et al., 2007), tendo as maiores alterações sido observadas no LVA. Os maiores valores de Ds no LVA determinados após as operações de colheita mecanizada da cana-de-açúcar estão relacionados, além da maior suscetibilidade à compactação (Figura 1), com os com a sua Dsi (Tabela 2).

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar aumentou a Ds em qualquer época ou solo analisado (Tabela 3), porém, quando o tráfego ocorreu no mês de agosto de 2006, os aumentos observados neste atributo não são indicativos de compactação adicional. Isso porque os valores de Ds foram inferiores àqueles observados na pressão de preconsolidação (Tabela 2), indicando que a deformação ficou restrita à curva de compressão secundária (Dias Júnior, 1994). Apesar da precisão no diagnóstico da compactação por meio da Ds, pelo fato de essa ser influenciada pelos constituintes do solo, como textura, estrutura e matéria orgânica, esse atributo apresenta correlação limitada com o crescimento

das plantas (Oliveira et al., 2003), o que dificulta a padronização de valores de referência (Camargo & Aleoni, 1997).

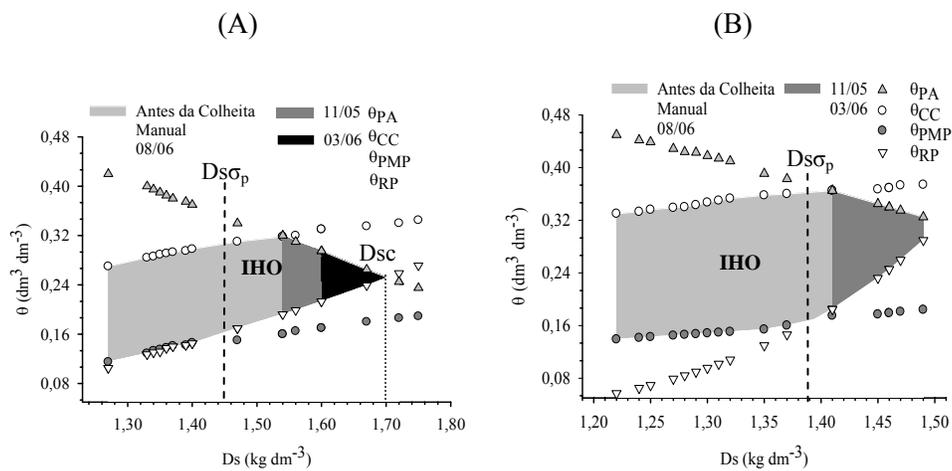
A microporosidade foi afetada apenas no CX e somente quando este foi submetido a colheita mecânica no mês de março de 2006 (Tabela 3). Ressalta-se que, apesar do aumento na microporosidade, a princípio, ser positivo por resultar em maior retenção de água, ele ocorre à custa da redução de parte dos macroporos (Oliveira et al., 2004). Dessa forma, salienta-se que, em função do relevo em que estão inseridos e devido aos impactos negativos provocados na estrutura do solo, particularmente nessa época do ano, é esperado um processo erosivo com conseqüências ambientais mais desastrosas no CX, comparado ao LVA, sendo sugeridos cuidados especiais com a mecanização do mesmo.

Os teores de matéria orgânica de cada solo diferiram pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, independente da época ou da modalidade avaliada ( $15\pm 0,5$  para o LVA  $27\pm 0,6$  g kg<sup>-1</sup> para o CX), permitindo considerar os efeitos sobre os agregados dos solos como decorrência do tráfego de máquinas.

O DMG no LVA aumentou à medida que se aumentou o conteúdo de água no solo durante a colheita mecanizada, o que está relacionado com a redução da capacidade de suporte de carga nessa situação. Esse fato pode ser explicado pela ação da compressão das partículas e o aumento do número de contatos entre cada agregado, levando ao seu rompimento e à formação de uma estrutura massiva do solo (Oliveira et al., 2004), sendo este material, portanto, constituído não por agregados, mas por torrões de solo. Nesse caso, o aumento no DMG no LVA indica uma degradação da estrutura do solo. Por outro lado, não houve alteração no DMG do CX, independente da época ou da modalidade de colheita, em função do seu elevado grau de estruturação, tendo reflexos, inclusive, na sua maior capacidade de suporte de carga (Figura 1).

As alterações estruturais também podem ser verificadas por meio do IHO. As avaliações realizadas antes do tráfego, depois da colheita manual e da

colheita mecanizada, realizada em agosto de 2006, não provocaram alterações significativas no IHO (Figura 2). Em novembro de 2005 e março de 2006 ocorreram reduções na amplitude do IHO, o que se deve à degradação estrutural (Figura 2) (Tormena et al., 2007). Com base nesse indicador de qualidade estrutural, observam-se menores reduções no IHO do CX, quando submetido à compressão da colheita (Figura 2B), o que se deve a sua maior resistência à compactação, corroborando com os resultados da Figura 1 e da Tabela 3.



**FIGURA 2.** Variação do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ,  $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ ) com a densidade do solo ( $D_s$ ), na profundidade de 0-5 cm, do (A) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e (B) Cambissolo Háplico (CX), para os limites críticos de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) e resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ). IHO = intervalo hídrico ótimo  $D_{sc}$ : densidade do solo crítica ao desenvolvimento das plantas;  $D_{s\sigma_p}$ : densidade do solo na pressão de preconsolidação; <sup>(1)</sup> Para épocas ou modalidades de colheita, IHO sob a mesma hachura não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. 11/05: novembro de 2005; 03/06: março de 2006; 08/06: agosto de 2006; Manual: colheita manual sem tráfego.

Torna-se necessária uma análise crítica a respeito do momento em que ocorre alteração nos limites do IHO (Leão et al., 2004). Ao analisar o IHO dos solos, observa-se que, para o LVA (Figura 2A), a  $\theta_{RP}$  assume o limite inferior do

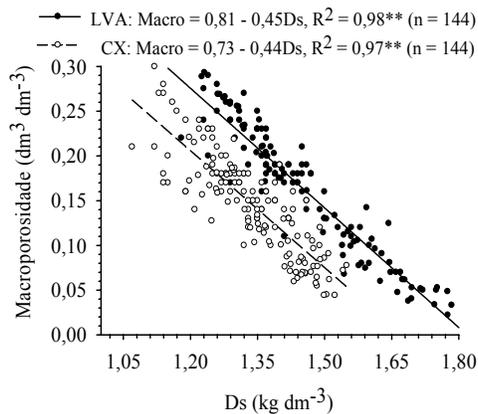
intervalo entre  $D_s$  de 1,40 e 1,46  $\text{kg dm}^{-3}$ , valores estes que incluem o intervalo de confiança da  $D_s\sigma_p$  ( $1,45 \pm 0,01 \text{ kg dm}^{-3}$ ; Tabela 2). Mesmo com a  $\theta_{RP}$  limitando o crescimento das plantas em conteúdos de água superiores a  $\theta_{PMP}$ , as alterações na estrutura do solo, até a  $D_s$  de 1,54  $\text{kg dm}^{-3}$ , não foram suficientes para provocar redução do IHO. O aumento linear na retenção de água na capacidade de campo do solo provoca um deslocamento do IHO, mantendo constante a sua amplitude.

Se, por um lado, a  $D_s\sigma_p$  do LVA promoveu restrições quanto à resistência à penetração, o valor de  $D_s$  de 1,54  $\text{kg dm}^{-3}$  (Figura 2A) também pode ser considerado um valor de alerta, uma vez que, a partir deste a  $\theta_{PA}$  assume o limite superior do IHO no LVA. As maiores reduções do IHO ocorridas na colheita mecanizada foram observadas em março de 2006, tendo a intersecção dos limites inferiores e superiores do IHO no valor de  $D_s$  1,70  $\text{kg dm}^{-3}$  ( $D_{sc}$ ) (Figura 2A). Observa-se, ainda, que o tráfego de máquinas nessas condições promoveu valores de  $D_s > D_{sc}$ , o que, segundo Tormena et al. (2007), indica severa degradação estrutural, restringindo o desenvolvimento dos ciclos posteriores da cana-de-açúcar em qualquer conteúdo de água em que o solo se encontrar.

O CX sofreu menor variação total de  $D_s$ , quando comparado ao LVA (Figura 2), o que se deve à sua maior resistência à compactação e menor  $D_{si}$  (Figura 1 e Tabela 2). Até a  $D_s\sigma_p$  ( $1,39 \pm 0,02$ ; Tabela 2), o IHO nesse solo assumiu a mesma amplitude da AD, demonstrando a sua excelente qualidade estrutural (Silva et al., 2001) (Figura 2B). Em conteúdos de água no solo superior àqueles encontrados em novembro de 2005, por ocasião do tráfego da colheita, a degradação da estrutura criou limitações ao desenvolvimento da cultura por oferecer restrições mecânicas ao sistema radicular, mesmo em elevados conteúdo de água no solo, corroborando com Oliveira et al. (2007), além de deficiência na aeração do solo, quando este se encontrar com o conteúdo

de água próximo a  $\theta_{cc}$  (Lapen et al., 2004) (Figura 2B). Entretanto, a colheita mecanizada não levou à Dsc, independente do conteúdo de água no solo, o que implica no menor risco de exposição das culturas a condições físicas inadequadas do solo.

O uso do IHO como indicador de qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas se baseia no fato de o manejo inadequado do solo alterar vários de seus atributos físicos, que interagem entre si, integrando-os em torno de um único parâmetro (Silva et al., 2001). Por outro lado, o uso da macroporosidade do solo limitante ao desenvolvimento das raízes tem grande aceitação entre os pesquisadores (Oliveira et al., 2004; Centurion et al., 2007; Oliveira et al., 2007). Com base na Figura 3, observa-se que a Ds correspondente à macroporosidade de  $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$  ( $1,44$  e  $1,59 \text{ kg dm}^{-3}$ , para o CX e LVA, respectivamente) se encontra dentro da amplitude de IHO ainda considerada positiva (Figura 2), embora, nessas condições, os solos já apresentem restrições quanto a aeração e a resistência à penetração.



**FIGURA 3.** Macroporosidade do solo, em função da densidade do solo (Ds), para o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e o Cambissolo Háplico (CX), cultivados com cana-de-açúcar, no município de Goianésia, GO.

A inserção do CX em relevo ondulado, associada à maior suscetibilidade ao encrostamento superficial do mesmo, em função do elevado teor de silte (Brandão et al., 2006) (Tabela 1), faz com que a manutenção da macroporosidade do solo em níveis adequados tenha um papel fundamental no processo de infiltração de água no solo (Sales et al., 1999), pois, além de prejudicar o desenvolvimento das plantas, a compactação excessiva do solo poderá potencializar as perdas de solo por erosão (Oliveira et al., 2004). Diante do exposto, sugere-se que a determinação da  $D_s$  limitante baseada na macroporosidade do solo, em contrapartida à  $D_{sc}$  (Tormena et al., 2007), além de proporcionar condições físicas do solo favoráveis à obtenção de produções satisfatórias, possa garantir também a sustentabilidade ambiental.

## 4 CONCLUSÕES

1. O Cambissolo Háplico apresentou maior resistência à compactação que o Latossolo Vermelho-Amarelo.

2. A densidade do solo na pressão de preconsolidação foi um bom indicativo do diagnóstico de ocorrência de alterações estruturais no solo.

3. A macroporosidade do solo limitante apresentou restrições ao crescimento das plantas em níveis de compactação inferiores à densidade do solo crítica do intervalo hídrico ótimo.

4. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada em conteúdos de água no solo até 0,16 e 0,21 kg kg<sup>-1</sup>, para LVA e CX, respectivamente, não promoveu a compactação excessiva dos solos.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.515-522, 2005.

BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.13-21, 2006.

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

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132p.

CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER, A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.199-209, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Tese (Doutorado)-Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.2, p.257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v.8, p.139-151, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306p.

GUEDES, H.M. **Efeitos de diferentes sistemas de manejo na distribuição de classes de agregados e nos teores de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso na região dos Cerrados.** 1997. 153p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade de Brasília, Brasília.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and Size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part. 1. p.425-442. (Agronomy, 9).

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo Hídrico Ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.415-423, 2004.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v.19, p.575-286, 1991.

LEPSCH, I.F. (Coord.). **Manual para levantamento utilitário de meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso: 4ª aproximação.** Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175 p.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA G.C.; RESCK, D.V.S.; LIMA J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, n.4, p.836-841, 2002.

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

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.327-336, 2004.

OLIVEIRA G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.265–270, 2007.

RAIJ, B.V; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 16p. (Circular, 63).

SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S.; CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.2091-2095, 1999.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, U.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG: SBCS, 2005. 92p.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of American Journal**, v.+61, p.977-883, 1997.

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

SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.219-226, 1999.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Intervalo Hídrico Ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, 2001. p.1-20.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.

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**, v.40, p.271-278, 2005.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.211-219, 2007.

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