

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU-SP

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM SUBSOLADOR DE HASTES  
COM CURVATURA LATERAL (“PARAPLOW”), EM FUNÇÃO DE  
DIFERENTES VELOCIDADES DE DESLOCAMENTO E  
PROFUNDIDADES DE TRABALHO.**

**ALESSANDRA COSTA GAMERO**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Energia na  
Agricultura)

BOTUCATU-SP  
Agosto – 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU-SP

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM SUBSOLADOR DE HASTES  
COM CURVATURA LATERAL (“PARAPLOW”), EM FUNÇÃO DE  
DIFERENTES VELOCIDADES DE DESLOCAMENTO E  
PROFUNDIDADES DE TRABALHO.**

**ALESSANDRA COSTA GAMERO**

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Hugo Benez

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Energia na  
Agricultura)

BOTUCATU-SP  
Agosto – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G193d Gamero, Alessandra Costa, 1981-  
Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral ("Paraplow"), em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho / Alessandra Costa Gamero, - Botucatu : [s.n.], 2008.  
xiii, 72 f. : il. color., tabs.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008

Orientador: Sérgio Hugo Benez

Inclui bibliografia

1. Solos - Compactação. 2. Consumo de energia. 3. Subsolador. 4. Consumo de combustível. I. Benez, Sérgio Hugo. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu) Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM SUBSOLADOR DE HASTES  
COM CURVATURA LATERAL ("PARAPLOW"), EM FUNÇÃO DE  
DIFERENTES VELOCIDADES DE DESLOCAMENTO E  
PROFUNDIDADES DE TRABALHO"


ALUNA: ALESSANDRA COSTA GAMERO

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO HUGO BENEZ

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. SÉRGIO HUGO BENEZ

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ÉLCIO HIROYOSHI YANO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. PAULO ROBERTO ARBEX SILVA

Data da Realização: 15 de agosto de 2008.

*DEDICO**Para*

*CARLOS e MARCIA, meus pais,  
que durante suas vidas lutaram  
pela minha formação moral e  
profissional.*

*À ANA PAULA, minha irmã,*

*e*

*Aos meus avós,*

*MARIA APARECIDA e WALDEMAR LEÃO DA COSTA  
MARIA DAS DORES e JOSÉ PEDRO DOS S. GAMERO*

*Pelo amor que sempre me demonstraram,  
incentivando-me a lutar pelas minhas aspirações.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus acima de tudo., porque sem ELE nada é possível.

Ao Prof. Dr. Paulo Rodolfo Leopoldo, *in memoriam*, meu amado tio, não por laços genéticos, mas pela convivência. Ele que me carregou no colo, durante a infância e continuou me guiando no curso de Agronomia, com o seu conhecimento, sabedoria e paciência diante das minhas limitações. Com sua orientação, tive a oportunidade de desenvolver o meu primeiro trabalho de pesquisa científica, dando a origem a esta dissertação.

Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela oportunidade e infra-estrutura oferecida pelo Curso de Pós- Graduação Energia na Agricultura, por intermédio do Departamento de Engenharia Rural.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de auxílio através de bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Sérgio Hugo Benez, pela amizade, orientação, dedicação, paciência, incentivo, transferência de conhecimentos e experiência de vida concedidos ao longo do Curso.

Aos professores Dr. Carlos Antonio Gamero, a quem tenho o privilégio de chamar de “Pai”, Dr. Paulo R. Arbex Silva, Dr. Kleber Pereira Lanças, Dr. Ulisses Rocha Antuniassi e Dr. Silvio José Bicudo pelo incentivo e ensinamentos durante o curso.

Ao Prof. Dr. Zacharias Xavier de Barros, ex-coordenador do Curso de Pós-Graduação Energia na Agricultura e ao Prof. Dr. Marco Antonio Martin Biaggioni atual coordenador do programa, por toda colaboração.

Ao Prof. Dr. Ângelo Cataneo pela amizade e pelos ensinamentos na parte estatística do trabalho.

A todos os funcionários das Fazendas de Ensino, Pesquisa e Produção, em especial a Mário de Oliveira Munhoz pelo auxílio técnico e esforço para realização do experimento.

Aos funcionários de campo e operadores de máquinas agrícolas da FEEP: Manoel Lopes dos Santos, Aparecido Bessa Ramon, Acassio Tavares Filho, Luciano Alves, Carlos Humberto Barbosa e Jonas Florêncio.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural, particularmente a: Pedro Alves, Maury Torres da Silva, Benedito Fernando Camargo, Silvio Sabatine Scolastici, Gilberto Winkler, Eduardo Biral e Ailton de Lima Lucas, pela atenção, amizade e serviços prestados.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Rita de Cássia Miranda Gomes e Rosangela Cristina Moreci.

À biblioteca da FCA pelos auxílios nas referências bibliográficas e localização nas pesquisas dos bancos de dados nas pessoas de: Maria Inês Andrade (Diretora), Helen Sayuri Sato, Denise de Melo Nogueira de Assis, Maria Aparecida Martins, Nilson,

Solange Aparecida P. Spadin, Célia Regina Inoue, Luiz Carlos Rodrigues da Paz, Maria do Carmo Barbosa, Neusa Maria Peres Branco e Ermete Nibe Neto.

Às secretárias da Seção de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP pela atenção doada durante o curso e pelo bom atendimento prestado.

Aos colegas de Pós-Graduação pelo bom convívio e amizade, em especial a: José Guilherme Lança Rodrigues, Jairo Costa Fernandes, Marisia Cristina da Silva, André Satoshi Seki, pela amizade e ajuda durante todo período.

Aos amigos de graduação que sempre me motivaram: Camila Fiorato, Gisele Lepore, Francisco Mamprin, Guilherme Nunes da Costa, Alexandre Bochichio Kurosaki, Fernando Barbano, André Luis Sano Martins, Patrícia Canholi, Felipe Barsanti, Gláucia Cristina Moreira.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento de minha carreira e, em especial, desse trabalho.



*O que vale na vida não é o ponto de  
partida e sim a caminhada.  
Caminhando e semeando no fim terás  
o que colher.*

*(Cora Coralina)*

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1 Compactação do solo.....	7
4.1.1 Resistência à penetração do solo.....	10
4.2 Subsoladores e subsolagem.....	12
4.3 Análise Energética.....	13
4.4 Demanda Energética.....	17
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	19
5.1 Material .....	19
5.1.1 Área experimental .....	19
5.1.2 Caracterização do solo .....	20
5.1.3 Equipamentos agrícolas .....	21
5.1.3.1 Tratores .....	21
5.1.3.2 Máquinas Agrícolas .....	21
5.1.4 Material utilizado para coleta de amostras dos parâmetros de caracterização do solo ....	23
5.1.4.1 Densidade do solo .....	23
5.1.4.2 Teor de água no solo .....	23
5.1.4.3 Resistência do solo à penetração .....	23
5.1.5 Material utilizado para coleta de dados dos parâmetros de avaliação	23
5.1.5.1 Área mobilizada no solo .....	23
5.1.5.2 Consumo horário de combustível .....	24
5.1.5.3 Força de tração na barra .....	24
5.1.5.4 Patinagem dos rodados do trator .....	25
5.1.5.5 Sistema de aquisição de dados .....	25

5.2 Métodos .....	26
5.2.1 Delineamento experimental .....	26
5.2.2 Descrição dos tratamentos .....	27
5.2.3 Instalação e condução do experimento .....	27
5.2.4 Cronograma de condução do experimento .....	28
5.2.5 Métodos de determinação dos parâmetros de caracterização do solo	29
5.2.5.1 Densidade do solo .....	29
5.2.5.2 Teor de água no solo .....	29
5.2.5.3 Resistência do solo à penetração .....	29
5.2.6 Métodos de determinação dos parâmetros de avaliação .....	30
5.2.6.1 Avaliação do perfil mobilizado no solo .....	30
5.2.6.2 Determinação do empolamento do solo .....	30
5.2.6.3 Velocidade média de deslocamento .....	30
5.2.6.4 Patinação dos rodados do trator .....	31
5.2.6.5 Capacidade de campo efetiva .....	32
5.2.6.6 Consumo horário de combustível .....	32
5.2.6.7 Consumo operacional de combustível .....	33
5.2.6.8 Força média na barra de tração do trator .....	33
5.2.6.9 Força máxima na barra de tração do trator.....	34
5.2.6.10 Potência média requerida na barra de tração do trator .....	34
5.2.6.11 Potência máxima requerida na barra de tração do trator .....	34
5.2.6.12 Força específica operacional .....	35
5.2.6.13 Potência específica operacional .....	35
5.2.6.14 Força média em relação à profundidade de trabalho .....	36
5.2.6.15 Potência média em relação à profundidade de trabalho .....	36
5.2.7 Tratamento estatístico dos dados .....	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
6.1 Teor de água no solo .....	39
6.2 Densidade do solo .....	40
6.3 Resistência mecânica do solo à penetração .....	41
6.4 Profundidade de trabalho efetiva.....	41

6.5 Área de solo mobilizada e empolamento do solo .....	43
6.6 Velocidade média de deslocamento e capacidade de campo efetiva .....	45
6.7 Patinagem dos rodados do trator.....	47
6.8 Demanda de força de tração, potência na barra e consumo horário de combustível.....	50
6.9 Força e potência específica operacional e consumo operacional de combustível.....	55
6.10 Força e potência média em relação à profundidade de trabalho .....	58
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
8 CONCLUSÕES .....	62
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
1 Resultado da análise granulométrica do solo da área experimental, antes da instalação do experimento .....	20
2 Descrição dos fatores e dos tratamentos estudados .....	27
3 Cronograma de atividades desenvolvidas no campo experimental .....	28
4 Teor de água no solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ), nas profundidades de 0 - 0,50 m.....	39
5 Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 - 0,50 m.....	40
6 Profundidade de trabalho efetiva obtida na operação de subsolagem em função dos fatores avaliados no experimento.....	42
7 Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável profundidade de trabalho efetiva (m).....	43
8 Área mobilizada ( $\text{m}^2$ ) e empolamento do solo (%), em função dos fatores avaliados no experimento.....	44
9 Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável área mobilizada ( $\text{m}^2$ ).....	44
10 Velocidade de deslocamento ( $\text{km h}^{-1}$ ) e capacidade de campo efetiva ( $\text{ha h}^{-1}$ ), em função dos fatores avaliados no experimento.....	45
11 Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável velocidade média de deslocamento ( $\text{km h}^{-1}$ ).....	47
12 Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável capacidade de campo efetiva ( $\text{ha h}^{-1}$ ).....	47
13 Patinagem (%) das rodas dianteiras direita (RDD) e esquerda (RDE) e das rodas traseiras direita (RTD) e esquerda (RTE) do trator, em função dos fatores avaliados no experimento.....	48
14 Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável patinagem dos rodados.....	49

15	Força média na barra de tração (N), força máxima na barra de tração (N), potência média requerida na barra de tração (kW), potência máxima requerida na barra de tração (kW) e consumo horário de combustível ( $L ha^{-1}$ ) em função dos fatores avaliados no experimento.....	51
16	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável força média na barra de tração do trator (N).....	52
17	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável força máxima (N) na barra de tração de trator.....	52
18	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potencia média requerida na barra de tração (kW).....	53
19	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência máxima requerida na barra de tração (kW).....	54
20	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável consumo horário de combustível ( $L h^{-1}$ ).....	54
21	Força específica operacional ( $N cm^{-2}$ ), potência específica operacional ( $W cm^{-2}$ ) e consumo operacional de combustível ( $L ha^{-1}$ ) em função dos fatores avaliados no experimento.....	56
22	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência específica operacional ( $W cm^{-2}$ ).....	57
23	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável consumo operacional de combustível ( $L ha^{-1}$ ).....	58
24	Força média e potência média em relação à profundidade de trabalho em função dos fatores avaliados no experimento.....	58
26	Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência média em relação à profundidade de trabalho ( $W cm^{-1}$ ) .....	60

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
1 Vista geral da área experimental .....	20
2 Subsolador da marca “IKEDA” modelo “DPT-210 M” .....	22
3 Haste subsoladora com curvatura lateral (“paraplow”).....	22
4 Fluxômetro instalado no trator para determinação do consumo de combustível (acoplamento ao sistema de aquisição de dados (1), fluxômetro (2) e filtro de combustível (3)).....	24
5 Conjunto utilizado para determinação da força de tração na barra (suporte metálico “berço” (1) e célula de carga (2)).....	25
6 Vista do painel com instrumentos eletrônicos indicadores dos dados coletados no experimento .....	26
7 Esquema da disposição dos tratamentos e dos blocos no campo .....	28
8 Resistência do solo à penetração (MPa) nos quatro blocos experimentais (B1, B2, B3 e B4) no dia do experimento.....	41

## **1 RESUMO**

A compactação do solo afeta o desenvolvimento das plantas, bem como pode interferir nos níveis de produtividade das culturas. Com o intuito de diminuir o grau de compactação do solo, operações de manejo, como a subsolagem, que visam o rompimento da camada subsuperficial compactada, são realizadas. Este trabalho teve como objetivo estudar o desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“paraplow”), operando a diferentes velocidades de deslocamento do trator e profundidades de trabalho, bem como, avaliar o consumo energético demandado na operação. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas - Campus de Botucatu/UNESP, no ano de 2007. O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico, textura muito argilosa. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados e esquema fatorial 3 x 2, com quatro repetições. Os tratamentos foram compostos da combinação de três velocidades de deslocamento definidas em função do escalonamento de marchas do trator utilizado (A1, A2 e B1) e duas profundidades de trabalho do equipamento utilizado para a mobilização do solo (0,25 e 0,35 m). Foram avaliados os dados referentes à mobilização do solo, patinagem dos rodados, capacidade de campo, consumo de combustível, força e potência na barra de tração do trator. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os



resultados obtidos permitiram chegar às seguintes conclusões: a) Após a regulagem em condições estáticas, o subsolador manteve as profundidades da subsolagem durante a operação em condições de campo; b) a velocidade de deslocamento não apresentou efeito significativo sobre a área de solo mobilizado; c) a velocidade de deslocamento e a capacidade de campo efetiva foram influenciadas pela profundidade da operação; d) o aumento da profundidade da operação de 0,25 para 0,35m implicou em aumento médio do patinamento dos rodados do trator em 321%; e) o aumento da velocidade de deslocamento implicou em maiores valores de potência na barra de tração, consumo horário de combustível, potência específica operacional, e potência média em relação à profundidade; f) havendo possibilidade, a utilização de maiores velocidades na operação de subsolagem seria recomendável em termos de balanço energético; g) o aumento da velocidade de deslocamento sempre refletiu em menor consumo operacional de combustível; h) a força média em relação à profundidade trabalhada aumentou com o incremento desta, sendo que a potência em relação à profundidade trabalhada apontou efeito contrário, ou seja, diminuiu; i) velocidades mais altas implicaram em maior potência em relação à profundidade trabalhada no solo ( $Wcm^{-1}$ ).

---

Palavras-chave: capacidade de campo. mobilização de solos. poder energético.

OPERATIONAL PERFORMANCE OF A SUBSOILER WITH A LATERAL BENDING (PARAPLOW), IN FUNCTION OF DIFFERENT DISPLACEMENT SPEEDS AND DEPTHS OF WORK.

**Botucatu, 2008. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.**

**Author: Alessandra Costa Gamero**

**Advisor: Sérgio Hugo Benez**

## **2 SUMMARY**

The soil compactness affects the development of the plants, as well as it can interfere in the levels of productivity of the crops. Some soil management operations, like the subsoiling, aims at the breakage of the soil compacted layer. Those operations are made with the purpose to reduce the soil compactness. This research had the objective of studying the operational performance of a subsoiler with a lateral bending (paraplow), operating to different displacement speeds and depths of work, as well as, valuing the demanded energetic consumption in the operation. The experiment carried out in the Experimental Farm Lageado, Agronomic Sciences College in the "Julio de Mesquita Filho" University (UNESP) – Botucatu Campus /UNESP, in the year of 2007. The soil of experimental area was classified like "Nitossolo Vermelho Distroférico", very clay texture. The experimental design was in 3x2 factorial scheme using randomized blocks with four replications. The treatments were composed of the combination of three displacement speeds defined in function of the scheduling of marches of the tractor (A1, A2 and B1) and two work depths of the equipment used for the mobilization of the soil (0,25 and 0,35 m). The works depths were obtained by changing the height of the support of the wheel of the subsoiler, There were valued the data referring to the mobilization of the soil, tractor wheel slip, capacity of field, fuel consumption, strength and power at the bar of traction of the tractor. The results were subjected to variance analysis and the averages compared by Tukey test at 5 % of probability. The gotten results had allowed to arrive at the following conclusions: a) After adjustment in static conditions, the subsoiler

maintained the depths of the subsoiling during the operation in field conditions; b) the speed of displacement did not present significant effect on the mobilized area; c) the speed of displacement and the field effective capacity were influenced by the depth of the operation; d) the increase of the depth of the operation of 0,25 for 0,35 m implied in average increase of tractor wheel slip in 321 %; e) the increase of the displacement speed resulted in higher values of power in the traction bar, fuel time consumption ,operational specific power and average power regarding the depth; f) if it were possible, the use of higher speeds in the subsoiling operation must be recommendable in terms of energetic balance; g) the increase of the displacement speed always reflected in lower fuel operational consumption ; h) the average strength about the worked depth increased with the growth of this, being that the power regarding the worked depth pointed to opposite effect, in other words, it lessened; i) higher speeds had implied in greater power regarding for the worked depths in the soil ( $Wcm^{-1}$ )

---

Keywords: field capacity. soil mobilization. energetic power.

### **3 INTRODUÇÃO**

A partir da necessidade de obtenção de altas produtividades das culturas, da racionalização dos custos de produção e da preservação dos recursos naturais devido ao desenvolvimento e crescimento das populações, a agricultura vem intensificando o uso de máquinas agrícolas, acarretando uma dependência crescente de consumo de energia como fruto do processo de modernização.

Atualmente, as operações agrícolas de preparo do solo são realizadas para propiciarem condições favoráveis para a semeadura, germinação das sementes, emergência das plântulas, desenvolvimento e produção da cultura, como também para eliminar plantas invasoras e descompactar o solo. Juntamente com as significativas contribuições das operações mecanizadas, surgiu o problema da compactação do solo resultante do tráfego excessivo das máquinas, fator este limitante para a obtenção de maiores produtividades.

A compactação afeta os atributos físicos do solo que, direta e indiretamente, inibem o crescimento e a produtividade das culturas. O uso de máquinas e implementos, como grades, arados, enxadas rotativas e escarificadores, resolvem o problema da compactação do solo nas camadas superficiais, embora a sua utilização quase sempre à mesma

profundidade de trabalho, por anos consecutivos, com o solo apresentando teor de água variável, tem contribuído para a formação de uma camada compactada na profundidade imediatamente abaixo da linha de ação dos órgãos ativos destas máquinas, sendo denominada de compactação subsuperficial, conhecida também como “soleira”, “pé de arado” ou “pé de grade”.

A partir da necessidade de rompimento da camada compactada do solo, diversos equipamentos têm sido projetados e utilizados para essa finalidade, todavia para serem usados com eficiência, é de fundamental importância que sejam analisados os parâmetros relativos à dinâmica de mobilização e o desempenho energético dos mesmos.

No decorrer dos anos, a operação de subsolagem tornou-se uma prática agrícola que vem sendo constantemente utilizada para minimizar os efeitos provocados pelo cultivo excessivo, manejo inadequado do solo e pela utilização de máquinas pesadas o que tem contribuído para o aumento da compactação do solo em várias culturas.

O presente trabalho teve como objetivo estudar o desempenho operacional e energético de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“paraplow”), operando em diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Compactação do solo**

O termo compactação do solo pode ser definido como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Alakukku e Elomen (1994) afirmam que a compactação tem se destacado a nível mundial como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física das terras agrícolas, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade (RALISCH; TAVARES FILHO, 2002). Canillas e Salokhe (2002) apontaram-na como um dos principais causadores da degradação dos solos.

A compactação está ligada a diversos fatores como: textura do solo (SILVA; JORGE, 1996), teor de água, densidade, pressão de rodas e esteiras sobre o solo (CAMARGO, 1983), pressão de inflação de pneumáticos (LANÇAS et al., 1996; RICHART et al., 2005), deslizamento dos rodados de tratores de pneus (MAZIERO et al., 1997), condições do tráfego de máquinas (MacDONAGH et al., 1995), sistemas de preparo e manejo do solo (PEDROTTI et al., 1998), fatores genéticos derivados de sua evolução (MUNIZ, 1981), entre outros.

A compactação do solo pode causar vários efeitos negativos às plantas: maior tempo para a emergência, diminuição no tamanho da planta, deficiência nutricional, sistema radicular superficial e raízes mal formadas (MANTOVANI, 1987) tornando-se, desse

modo, menos eficientes na absorção de água e nutrientes (ALVARENGA et al., 1997; BEUTLER; CENTURION, 2003; FLOWERS; LAL, 1998; HAKANSSON; VOORHEES, 1998). Suzuki (2005) encontrou influência direta da compactação na redução da produtividade da cultura do milho, sendo que esta também apresentou diminuição em sua altura e no comprimento radicular. Beutler et al. (2004), avaliando a influência da compactação na produtividade e altura do sistema radicular em arroz de sequeiro, encontrou redução na produtividade e restrição ao crescimento das raízes.

Segundo Flowers e Lal (1998), a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações agrícolas, tais como operações de preparo, semeadura, tratos culturais e colheita. Horn et al. (1995) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também as forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos, e pelo patinamento das rodas, promovendo alteração estrutural e reorganização das partículas do solo (HAMBLIM, 1985), aumento da densidade, decréscimo do volume de poros de maior diâmetro (DEXTER, 2004), aumento da resistência mecânica (ARVIDSSON, 2001; DIAS JUNIOR, 2000) e comprometimento da disponibilidade de água e nutrientes (ARVIDSSON, 2001), tendo como consequência, um declínio de produtividade (WIERMANN et al., 1999, 2000).

Os sistemas de manejo do solo têm grande influência nas propriedades físicas do solo e estão relacionados com a compactação. O sistema de plantio direto é uma técnica eficiente no controle da erosão do solo, quando comparado com o sistema convencional (BERTOL et al., 1997; SEGANFREDO et al., 1997); porém, alguns autores obtiveram, em estudos, uma maior compactação neste sistema (KLEIN; BOLLER, 1995), provocada pelo efeito acumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas. Segundo Tormena et al. (1998), no plantio direto, a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na camada superficial do solo.

No sistema de preparo convencional, a grade tem sido o equipamento mais utilizado, normalmente trabalhando o solo a uma profundidade menor em relação a outros. O uso contínuo desse equipamento pode levar à formação de camadas compactadas logo abaixo

da profundidade de trabalho dos órgãos ativos. Essa compactação é comumente chamada de “pé-de-grade” (SILVA, 1992).

A granulometria, o teor de matéria orgânica e o conteúdo de água do solo têm significativa influência na compactação (BODMAN; CONSTANTIN, 1965). Segundo Machado et al. (1996), na condição de alto teor de água, os agregados são comprimidos, alterando sua forma, apresentando maior capacidade de compactação.

Torres e Saraiva (1999) afirmaram que a densidade varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos de 1,0 a 1,45  $\text{mg m}^{-3}$  para condições de mata e quando muito compactados e para solos arenosos de 1,25 a 1,70  $\text{mg m}^{-3}$ . Camargo e Alleoni (1997) consideram crítico o valor de 1,55  $\text{mg m}^{-3}$  em solos franco-argilosos a argilosos. De Maria et al. (1999) constataram que, em Latossolo Roxo, ocorre restrição no desenvolvimento de raízes com valores acima de 1,2  $\text{mg m}^{-3}$ .

Adams e Wulfsohn (1997), trabalhando com solo franco-siltoso e franco-argiloso, encontraram reduções nos rendimentos de 13 % no trigo e 7,5 % no milho, quando a densidade do solo aumentou em 11%, ou seja, passou de 1,07 para 1,19  $\text{mg m}^{-3}$ .

Way et al. (1995) e Horn e Lebert (1994) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego e degradação de sua estrutura em profundidade, depois de repetidas passadas com rodados agrícolas, sendo isto tanto maior quanto maior o número de passadas. Todavia, Fenner (1999), fazendo um estudo de tráfego controlado em solos da Amazônia, verificou que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subsequentes mais reduzidos. Daniel e Maretti (1990) ponderaram que a profundidade máxima de efeito da compactação imposta por máquinas agrícolas, independentemente do tipo de solo e peso da maquinaria, não deveria exceder a 0,50 m.

Stafford e Mattos (1981) concluíram que a velocidade de deslocamento das máquinas no solo influenciou no processo de compactação, porém o efeito não foi significativo nas camadas mais profundas (maiores que 0,20 m).

Raghavan et al. (1977), trabalhando com três tamanhos de pneus e diferentes níveis de patinagem em dois tipos de solos (arenoso e argiloso), observaram que a



menor compactação ocorreu quando os valores de patinagem ficaram abaixo de 10 e acima de 50%. , sendo que a máxima compactação ocorreu entre 15 e 25%.

Segundo Trein et al. (2005), uma solução, para diminuir ou evitar a compactação do solo pelo tráfego de máquinas, seria a adoção de um sistema controlado, ou seja, separar as zonas de tráfego das zonas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, sendo que desta forma uma área menor seria atingida, embora mais intensamente. Os autores enfatizam também que o sistema de tráfego controlado funciona bem em culturas que são estabelecidas em linha.

#### **4.1.1 Resistência à penetração do solo**

A compactação do solo tem sido quantificada por atributos físicos, dentre esses, a resistência à penetração tem sido freqüentemente utilizada por apresentar melhores correlações com o crescimento radicular (STONE et al., 2002; TAYLOR ; GARDER, 1963), ser sensível ao manejo, ter relações diretas com a produtividade das plantas (BENGOUGH et al., 2001; LETEY, 1985) e como medida mais eficiente na identificação de estados de compactação em comparação à densidade do solo (SILVA, 2003).

Comparando tipos de manejo do solo com textura franco-arenosa, Abreu et al. (2004) encontraram menor resistência à penetração (penetrômetro) em solo escarificado do que em solo sob semeadura direta, sendo que o escarificador foi mais eficiente na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água, do que em solos sob "escarificação biológica" e semeadura direta.

Estudando a influência do tipo de manejo no sistema radicular da cultura do feijão, em solo franco-arenoso, Reichert et al. (2003) encontraram, no cultivo mínimo, concentração de raízes em até 0,25m, na semeadura direta concentravam-se em 0,05-0,15m, já no sistema de preparo do solo convencional não houve restrição para o desenvolvimento radicular. Araújo et al. (2004) encontraram uma maior aeração e porosidade total na camada de 0-0,15m, em solo escarificado do que em solo sob semeadura direta há mais de 13 anos.

Tormena (1991) afirmou que independentemente do tamanho ou tipo de penetrômetro utilizado na coleta de dados, existe evidência da dependência da resistência à penetração devido às propriedades físicas do solo como: teor de água, a densidade e a composição granulométrica do solo. Esta dependência dificulta a análise dos resultados, pois é necessário identificar se os valores de resistência à penetração são devido aos efeitos dos tratamentos empregados ou às variações das propriedades do solo.

Valores mais elevados de resistência à penetração ocorrem por ocasião de menores conteúdos de água no solo (PEDROTTI et al., 2001). O conteúdo de água na capacidade de campo do solo tem sido aceito como padrão para a determinação da resistência à penetração, sendo, essencialmente, um ponto de referência para o estabelecimento de valores críticos (BENGOUGH et al., 2001).

Valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular. Além disso, estudos indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE; FARQUHAR, 1988), porém isto pode ser modificado pelos sistemas de preparo.

Valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie cultivada (MATERECHERA et al., 1991). Valores acima de 2,0 MPa impedem o crescimento radicular de algodão (TAYLOR et al., 1966). Varquez et al. (1989), estudando sistemas de manejo e compactação do solo, verificaram que a produtividade máxima de soja esteve associada a valores de 1,57 a 1,59 MPa na camada de 0,05–0,35 m, com decréscimos quando a resistência aumentou. Silva et al. (2000) verificaram, em Latossolo Vermelho Argiloso, que a produtividade de soja foi adequada até valores de 1,80 MPa. Mielniczuk et al. (1985), em casa de vegetação, verificaram redução na massa de matéria seca da parte aérea de aveia e trigo a partir da resistência do solo à penetração de 2,3 MPa em Latossolo Roxo. Merotto e Mundstock (1999) verificaram menor produtividade de matéria seca de trigo a partir da resistência do solo à penetração de 2,0 MPa em Podzólico Vermelho-Escuro. McAfee et al. (1989) encontraram redução do rendimento de 30 % na cultura da aveia em um solo de textura argilosa, sendo que a resistência à penetração variou entre 3,5 a 4,5 MPa.

## 4.2 Operação de subsolagem

Segundo a ASAE (1982), o subsolador é um implemento de mobilização do solo que opera a profundidades suficientes para romper as camadas subsuperficiais compactadas. McKyes (1985) os denomina como um tipo de arado cinzel, porém de construção mais resistente e rígida, usado em operações em que a profundidade varia de 0,40 a 0,90 m. Para Balastreire (1987), são implementos utilizados sob a superfície do solo para promover a desagregação de camadas compactadas, a fim de facilitar a penetração das raízes das culturas e da água em maiores profundidades do solo.

O subsolador é utilizado para a mobilização do solo em profundidade, rompendo as camadas compactadas que dificultam a penetração de raízes e a infiltração de água, melhorando, dessa forma, a aeração do solo e a movimentação de água no seu perfil, diminuindo os riscos de erosão (TAYLOR ; BELTRAME, 1980; GADANHA JÚNIOR et al., 1991).

Balastreire (1987) afirmou que para a correta utilização de subsoladores dever-se-ia dispor de conhecimentos suficientes sobre as características do solo trabalhado e a operação a ser realizada com o equipamento. Isto envolveria conhecer fatores como: a compactação existente, o teor de água, as plantas de cobertura na superfície, a textura e estrutura do solo. Determinar, ainda, quando do uso do equipamento, a profundidade de trabalho, o espaçamento entre hastes, as dimensões e formatos das hastes, a potência necessária, isto entre outros fatores.

A subsolagem é uma prática de cultivo em profundidade que tem como finalidade o rompimento das camadas compactadas sem, entretanto, causar inversão do solo, devendo ser recomendada, somente, quando houvera presença de uma camada muito endurecida, em profundidades não atingidas por outros implementos (CAMARGO ; ALLEONI, 1997). Para Boller (2001), a subsolagem é uma operação que objetiva a descompactação do solo, quando a presença de uma camada compactada for superior à profundidade de 0,30 m. Segundo Castro (1985), é uma prática agrícola cujo objetivo é quebrar camadas compactadas do solo abaixo daquela considerada arável (0,20 a 0,25 m), alcançando a profundidade de trabalho de no mínimo 0,30 m. Para a ASAE (1982), essa profundidade deve ser maior que 0,40 m com o

propósito de desagregar o solo, melhorando com isso o crescimento das raízes em profundidade e a movimentação da água ao longo do perfil. Taylor e Beltrame (1980), Rípoli et al. (1985) e Gadanha Júnior et al. (1991) consideram que a subsolagem pode atingir profundidades de até 0,80 m.

Lanças (1988) constatou que a subsolagem requer alto consumo energético e quando não efetuada ou se realizada em profundidades menores, os custos de preparo do solo ficam significativamente reduzidos. Por outro lado, com presença da camada compactada a prática da operação em profundidades inferiores ou a sua não realização poderão provocar prejuízo considerável devido à queda de produção na cultura instalada.

Os efeitos benéficos da subsolagem são normalmente temporários e a resistência à penetração retorna a seus valores originais em cerca de 2 a 4 anos, dependendo do tipo de solo e das práticas culturais predominantes. Para Busscher et al. (2002), esses efeitos são influenciados pelo volume acumulativo de precipitações, ocasionando o aumento da reconsolidação do solo. Em solos estruturados, a reconsolidação pode ser influenciada pela dinâmica da água no espaço poroso inter e intra-agregados e pode ser afetada também pelo selamento superficial ou pela estabilidade estrutural que pode modificar a quantidade de água que infiltra no solo (BUSSCHER et al., 2000).

Oussible e Crookston (1987), estudando o efeito da subsolagem na camada subsuperficial de um solo franco-argiloso, constataram que a compactação pode ser efetivamente reduzida, sendo que a produção de grãos de trigo foi 48 % maior nas parcelas onde a operação foi executada. Verificaram também que a operação reduziu a densidade global no perfil do solo em 11% , aumentou a macroporosidade em 50% e a resistência do solo à penetração reduziu 19 e 33% nas profundidades de 0,20 e 0,35 m, respectivamente.

### **4.3 Análise Energética**

Gamero e Lanças (1996) citam alguns parâmetros que podem ser mensurados para se avaliar o desempenho operacional de subsoladores, entre eles; área mobilizada de solo, profundidade e largura efetiva de trabalho, velocidade de deslocamento,

consumo de combustível, força de tração, patinagem das rodas, resistência específica operacional e capacidade de campo efetiva.

Algumas variáveis podem afetar o desempenho operacional dos subsoladores, dentre elas: a configuração da haste, o tipo e o tamanho da ponteira, a textura e o teor de água do solo, a potência e o tipo de tração do trator (BENTIVENHA et al., 2003; BICUDO, 1990; GAMERO; LANÇAS, 1996; GARNER et al., 1987; LANÇAS, 1988; LANÇAS ; BENEZ, 1989; McKYES, 1985; MIALHE, 1996; SASAKI et al., 2002; SPOOR ; GODWIN, 1978; YSHIMINE, 1993).

Dentre as diversas características dos subsoladores, que devem ser consideradas para sua correta utilização, está a configuração das hastes. Silva et al. (1984), ao testarem várias configurações de hastes subsoladoras (reta, curva e parabólica), concluíram que a geometria não apresentou influência significativa no desempenho dos subsoladores. Para Lanças (1987) a forma geométrica influi significativamente nos resultados de desempenho operacional, sendo que as hastes parabólicas demandam maior força de tração que as retas inclinadas.

Ao analisar a mobilização do solo em relação às diferentes hastes, Lanças (1988) observou que não houve influência significativa do tipo de haste utilizada na profundidade de trabalho e na mobilização do solo.

Spoor e Godwin (1978), com relação ao tipo de ponteira, verificaram que a colocação de asas na extremidade inferior da haste proporcionava melhor reestruturação do solo. Estudando mais detalhadamente a asa em si, Bicudo (1990) observou que a área transversal de solo mobilizado aumentou com os acréscimos da largura da asa.

A utilização de asas na ponteira das hastes resulta em aumento da área de solo mobilizada, do rompimento relativo, da largura de corte e da área útil trabalhada (BENTIVENHA et al., 2003).

O desempenho de hastes com diferentes larguras, profundidades de trabalho e ângulos de inclinação foi estudado por McKyes e Desir (1984). Os resultados permitiram verificar que a força de tração específica aumentou com a elevação do ângulo de inclinação.

Quanto ao número de hastes, Lanças (1988) e Yshimine (1993), estudando o desempenho de subsoladores com diferentes quantidades de hastes (1, 2 e 3), com velocidade de deslocamento constante em solos argilosos, constataram que a força de tração aumentou significativamente em função do número de hastes utilizadas. Para Lanças (1988) e Bicudo (1990), o número de hastes tem influência no consumo específico operacional, fornecendo valores menores conforme se aumentou o número de hastes e, apresentando, portanto, melhor desempenho.

O teor de água e o tipo de solo são variáveis que influenciam, consideravelmente, a operação de subsolagem (SASAKI, 2005). Teores de argila elevados, presença de argilas 2:1 e 1:1, camadas de adensamento natural e horizonte B mais superficial são algumas características do solo que alteram a eficiência do subsolador (GARNER et al., 1987; STAFFORD, 1979; STAPE et al., 2002).

Yshimine (1993), avaliando o desempenho operacional de um subsolador com hastes parabólicas em dois Latossolos Vermelhos (um de textura média com 284 g kg<sup>-1</sup> de argila e outro de textura argilosa com 484 g kg<sup>-1</sup> de argila) e um Nitossolo Vermelho (textura argilosa com 493g kg<sup>-1</sup> de argila) verificou que a área mobilizada no solo e a largura de corte foram maiores para aqueles mais argilosos, assim como foi maior a demanda por força de tração.

Bentivenha et al. (2003) analisaram três configurações geométricas de hastes subsoladoras em um Neossolo Quartzarênico (textura arenosa) e Latossolo Vermelho-Amarelo (textura argilosa), com dois teores de água no solo. No Neossolo Quartzarênico, foi obtido maior área e volume de solo mobilizado, profundidade e largura de trabalho, área útil trabalhada e capacidade de campo efetiva do que no Latossolo Vermelho-Amarelo.

Em solos com teores de água mais baixos, verifica-se uma maior mobilização e um menor risco de compactação com o tráfego do trator (RÍPOLI et al., 1985). Solos com teores de água elevados geram menor demanda por força de tração, apesar de não serem mobilizados adequadamente (BELTRAME, 1983; RÍPOLI et al., 1985; SASAKI et al., 2002).

A umidade é um fator que determina a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. Nichols et al. (1958) relatam que a operação de subsolagem não é

recomendada caso o solo esteja muito úmido, pois há possibilidade dele fluir plasticamente através da haste. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas (DIAS JUNIOR ; PIERCE, 1996), entretanto, em condições de elevada umidade, o solo fica susceptível à compactação devido à sua baixa capacidade de suporte de carga.

Sasaki (2005), avaliando o desempenho operacional de um subsolador com haste parabólica em três latossolos com diferentes teores de água, concluiu que quanto menor é o teor de água no solo, maior é o volume de solo mobilizado. Isto pode ser explicado devido ao efeito lubrificante da água, o qual é reduzido quando o solo está mais seco (ROSA JÚNIOR, 2000), ocasionando um aumento da largura efetiva de trabalho e a um maior rendimento (YSHIMINE, 1993).

A velocidade de deslocamento de um subsolador é influenciada de maneira significativa pela profundidade de trabalho (BICUDO, 1990), e ambas interferem na variação da força de tração (LANÇAS, 1987; YSHIMINE, 1993).

Lanças (1987), estudando os efeitos da velocidade na operação de subsolagem, concluiu que o aumento da velocidade de deslocamento proporciona uma maior capacidade de campo com menor consumo específico operacional de combustível, porém a força de tração aumenta com o aumento da velocidade. Em relação à área mobilizada, a velocidade de deslocamento não influencia este parâmetro, sendo este mesmo resultado também obtido por Yshimine (1993).

Existe uma profundidade máxima de trabalho para cada tipo de haste. A profundidade de trabalho dos subsoladores considerada ótima, para uma grande faixa de solos, desde que estejam com teor de água adequado para efetuar a subsolagem, está por volta de 5 a 7 vezes a largura da ponteira da haste sem asa (SPOOR ; GODWIN, 1978).

A profundidade crítica é aquela na qual poderá ocorrer maior compactação e menor mobilização do solo, além de provocar um aumento significativo da resistência específica do solo (TIRONI et al., 2005). Este fato ocorre em função da mudança do tipo de ruptura do solo, o qual em profundidades menores é tridimensional (para frente, cima e para os lados) e em profundidades maiores é bidimensional (para frente e para os lados).

#### **4.4 Demanda energética.**

Conforme Mialhe (1991) e Gamero e Lanças (1996), patinagem é a denominação que se dá ao deslizamento entre a superfície da banda de rodagem e o solo, sendo ela um fator determinante para que ocorra a tração. Durante uma operação agrícola, a patinagem pode ser facilmente visualizada pelo movimento giratório das rodas motrizes do trator, com pequeno ou nenhum avanço das mesmas, o que acontece devido à falta de aderência das rodas ao solo (CORRÊA et al., 1999).

Lanças e Upadhyaya (1997) afirmam que para ocorrer tração é necessário que exista patinagem, entretanto, se esta ultrapassar determinados limites, pode ocorrer perda da aderência e redução da tração dos rodados.

Para a ASAE (1999), o melhor desempenho do trator ocorre quando a patinagem está entre 8 e 10% em solos firmes.

Bicudo (1990) destaca que o deslizamento das rodas motrizes, na operação de subsolagem, é influenciado pelo número de hastes, ocorrendo uma maior patinagem à medida que se aumenta o número das mesmas.

A profundidade de trabalho é um parâmetro que afeta a força de tração requerida pelos subsoladores. Em experimento realizado por Spoor e Godwin (1978), ocorreu um aumento de aproximadamente 96% na força de tração necessária para tracionar um subsolador quando a profundidade de trabalho aumentou de 0,35 para 0,42 m.

Ao avaliar um subsolador com haste parabólica, em um Nitossolo Vermelho de textura muito argilosa, nas profundidades de 0,30, 0,40 e 0,50 m, Bicudo (1990) verificou que subsolagens em maiores profundidades provocam um aumento na força de tração, consumo de combustível, empolamento e área de elevação do solo. Por outro lado, menores valores de capacidade de campo efetiva e área útil trabalhada são obtidos nas maiores profundidades.

Gamero et al. (1986) citam que o consumo de combustível representa aproximadamente 30% do custo-hora de um trator agrícola, acrescentando que a adequação da potência do trator ao equipamento utilizado, pode acarretar em uma redução de 20% neste valor.



Estudando a influência da compactação em solo com textura franco argilo-arenosa no trabalho de ferramentas de mobilização (escarificador com disco acoplado) em caixa de solo, Sahu e Raheman (2006) encontraram aumento no esforço de tração com aumento da compactação, chegando a diferenças de 1,50kN na profundidade de 0,10m, quando a condição de compactação do solo passou de 826kPa para 1219kPa.

Lins (1984), utilizando um subsolador de 3 hastes, trabalhando a 0,60 m de profundidade com uma velocidade de 2,8km h<sup>-1</sup>, observou que a operação de subsolagem gastou 15 L h<sup>-1</sup> ou 41,16 L ha<sup>-1</sup> de combustível, com uma porcentagem média de deslizamento das rodas motrizes de 17,73% e capacidade efetiva de 0,388 ha h<sup>-1</sup>.

Salvador (1992), em trabalho conduzido em Latossolo Vermelho Distroférico textura argilosa e teor de água de 20%, avaliou o desempenho de um subsolador com 3 hastes parabólicas em uma área cultivada com milho sob sistema convencional durante vários anos. Trabalhando à profundidade de 0,40 m e velocidade de 2,1 km h<sup>-1</sup>, a subsolagem demandou uma força média de tração de 40,09 kN; potência média requerida na barra de tração de 23,8 kW; 11,76 L h<sup>-1</sup> de combustível; resistência específica operacional de 0,65 kgf cm<sup>-2</sup>; capacidade de campo efetiva de 0,438 ha h<sup>-1</sup> e 54,41 kWh ha<sup>-1</sup> de energia por área, com um deslizamento médio das rodas de 27,7%.

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Material**

#### **5.1.1 Área experimental**

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental Lageado - Campus de Botucatu/UNESP, Região Centro-Oeste do Estado de São Paulo, na área do Departamento de Produção Vegetal, no ano de 2007 (Figura 1). A área está localizada geograficamente a 22° 41' de latitude Sul e 48° 34' de longitude Oeste, com altitude média de 770 m, declividade média de 4,5% e clima subtropical chuvoso, apresentando inverno seco, tipo Cfa, de acordo com o critério de Köeppen.



**Figura 1.** Vista geral da área experimental.

### 5.1.2 Caracterização do solo

O solo da área experimental foi classificado, conforme a nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (1999), como Nitossolo Vermelho Distroférico. A área vinha sendo conduzida, desde 1997, no sistema de plantio direto com rotação de culturas: cultivo da cultura do milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merr) no verão e aveia-preta no inverno (*Avena stringosa*), triticale (*Triticum turgidocereale*) nas safras de outono/inverno.

O resultado da análise granulométrica do solo, antes da instalação do experimento, em três profundidades, variando de 0 a 0,50 m é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Resultado da análise granulométrica do solo da área experimental, antes da instalação do experimento.

Profundidade (m)	Silte	Areia	Argila
	-----g kg <sup>-1</sup> -----		
0,00-0,10	190	140	670
0,10-0,30	208	160	632
0,30-0,50	192	138	670

### **5.1.3 Equipamentos agrícolas<sup>1</sup>**

#### **5.1.3.1 Tratores**

Durante a condução do experimento, foram utilizados os seguintes tratores para as respectivas atividades:

- Trator marca Massey Ferguson, modelo MF 283, tração dianteira auxiliar (4x2 TDA), potência de 63,2 kW (86 cv) no motor, rotação na TDP de 540 a 1900 rpm, utilizado para acoplar a roçadora e a enleiradora para a realização do manejo da cobertura vegetal da área;

- Trator marca John Deere, modelo 6600, tração dianteira auxiliar (4x2 TDA), 6 cilindros, potência de 89 kW (121 cv), operando com rotação da TDP a 2200 rpm, peso total aproximado de 49300 N, com lastros e pneus radiais, utilizado para acoplar o subsolador em estudo, devidamente regulado, instrumentado e com os pneus calibrados.

#### **5.1.3.2 Máquinas agrícolas**

As máquinas agrícolas utilizadas no experimento foram:

- Roçadora modelo RO 1500, marca Tatu Marchesan, com altura de corte regulável, 2 lâminas roçadoras, largura de 1,80 m e peso aproximado de 4200 N.

- Enleiradora com 4 rodas tipo rastelo, marca Vicon e largura de trabalho de 1,50 m.

- Retroescavadora centrada, modelo MF 86 HS, 4x2, sendo a dimensão da escavadora largura de 3,37m, altura de 2,26 m e peso de 55400 N.

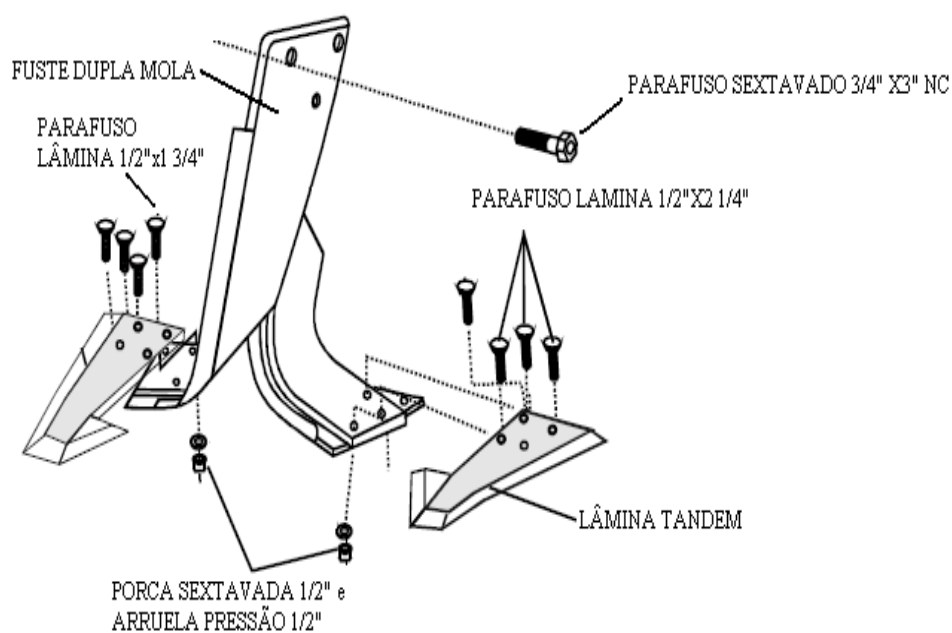
- Subsolador de arrasto da marca Ikeda, modelo “DPT-210 M” (Figura 2), com duas hastes subsoladoras com curvatura lateral (“paraplow”) (Figura 3), totalizando 4 lâminas, equipado com rodas de controle de profundidade e discos de corte da palhada da superfície com largura de trabalho de 2,10 m, altura de 0,85 m e massa total de 585 kg.

---

<sup>1</sup> A citação de marcas comerciais não implica em recomendação de uso por parte da autora.



**Figura 2.** Subsolador da marca “IKEDA” modelo “DPT-210 M”.



**Figura 3.** Haste subsoladora com curvatura lateral (“paraplow”).

#### **5.1.4 Material utilizado para coleta de amostras dos parâmetros de caracterização do solo.**

##### **5.1.4.1 Densidade do solo**

Para coleta das amostras e determinação da densidade do solo foram utilizados sacos plásticos, parafina, barbante, enxadão, vidrarias, etiquetas de identificação e balança de precisão de 0,01g.

##### **5.1.4.2 Teor de água no solo**

Na coleta das amostras e determinação do teor de água no solo, foram utilizadas cápsulas de alumínio identificadas, fita plástica, enxadão, estufa elétrica com temperatura de 110° C e balança digital de precisão de 0,01 g.

##### **5.1.4.3 Resistência do solo à penetração**

Na determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado o penetrógrafo da marca “Soilcontrol”, modelo SC-60, com profundidade máxima de 0,60 m e resistência máxima admissível de 76 MPa. O cone na ponta da haste tinha o padrão descrito pela “ASAE” (1996), com ângulo de 30° e área basal de 130 mm<sup>2</sup>. Foram utilizados cartões padronizados para o registro dos dados.

#### **5.1.5 Material utilizado para coleta de dados dos parâmetros de avaliação**

##### **5.1.5.1 Área mobilizada no solo**

Para a medição do perfil mobilizado no solo, foi utilizado o perfilômetro de hastes, construído e descrito por Lanças (1987). O equipamento consta de hastes graduadas

em centímetros, espaçadas de 5 centímetros entre elas, totalizando 65 hastes e 3,20 m de comprimento.

### 5.1.5.2 Consumo horário e operacional de combustível

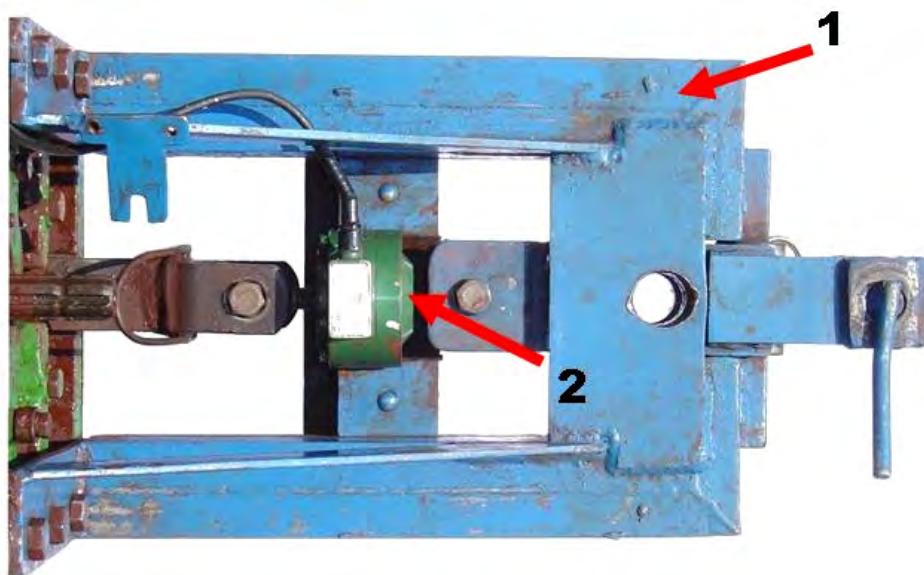
O consumo horário de combustível foi determinado, utilizando um fluxômetro da marca “Flowmate” oval, modelo M-III (Figura 4), instalado próximo ao filtro de combustível do trator, com precisão de 0,01 mL. A cada mL de combustível, consumido pelo trator, que passava pelo mecanismo, era registrado uma unidade de pulso.



**Figura 4.** Fluxômetro instalado no trator para determinação do consumo de combustível (acoplamento ao sistema de aquisição de dados (1), fluxômetro (2) e filtro de combustível (3)). (Fonte : Seki, A.S, 2007)

### 5.1.5.3 Força de tração na barra

A determinação da força na barra de tração foi obtida através de uma célula de carga de marca “Sodmex”, modelo N-400, com capacidade de 100000 N e sensibilidade de 2,16 mV/V, instalada numa estrutura metálica ( “berço” ) entre o trator e o equipamento tracionado. (Figura 5).



**Figura 5.** Conjunto utilizado para a determinação da força de tração na barra (suporte metálico “berço” (1) e célula de carga (2)). (Fonte: Seki, A.S, 2007)

#### **5.1.5.4 Patinagem dos rodados do trator**

A determinação da patinagem das quatro rodas do trator foi realizada utilizando sensores geradores de pulsos, modelo GIDP-60-U 12v, localizados no centro de cada uma das rodas, os quais realizam conversão de movimentos rotativos ou deslocamentos lineares em pulsos elétricos, gerando 60 pulsos por volta dos rodados.

#### **5.1.5.5 Sistema de aquisição de dados**

Para a aquisição e monitoramento dos sinais obtidos pelos sensores instalados nos rodados pneumáticos, no sistema de alimentação de combustível e na barra de tração, foi utilizado um painel com instrumentos eletrônicos indicadores e um indicador de força instantânea tipo “MICRO-P”, como pode ser observado na Figura 6.





**Figura 6.** Vista do painel com instrumentos eletrônicos indicadores dos dados coletados no experimento.

## 5.2 Métodos

### 5.2.1 Delineamento experimental

O trabalho foi conduzido em delineamento experimental de blocos casualizados, no esquema fatorial 3 x 2, com quatro repetições. Desta forma, o universo amostrado foi composto de 24 parcelas experimentais, distribuídas em quatro blocos (B1, B2, B3 e B4).

### 5.2.2 Descrição dos tratamentos

O experimento foi constituído de seis tratamentos, sendo utilizadas três velocidades de deslocamento do trator (John Deere 6600) e duas profundidades de trabalho do subsolador, as quais foram obtidas alterando-se a altura do suporte da roda de profundidade do equipamento (3ª e 5ª furação do suporte da roda de profundidade, contando de cima para baixo).

As velocidades que compuseram os tratamentos em estudo foram definidas em função do escalonamento de marchas (A1, A2 e B1) do trator utilizado, o qual operou com rotação constante no motor de 2200 rpm.

Os tratamentos compostos da combinação dos fatores, velocidades de deslocamento e profundidade de trabalho, são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Descrição dos fatores e dos tratamentos estudados.

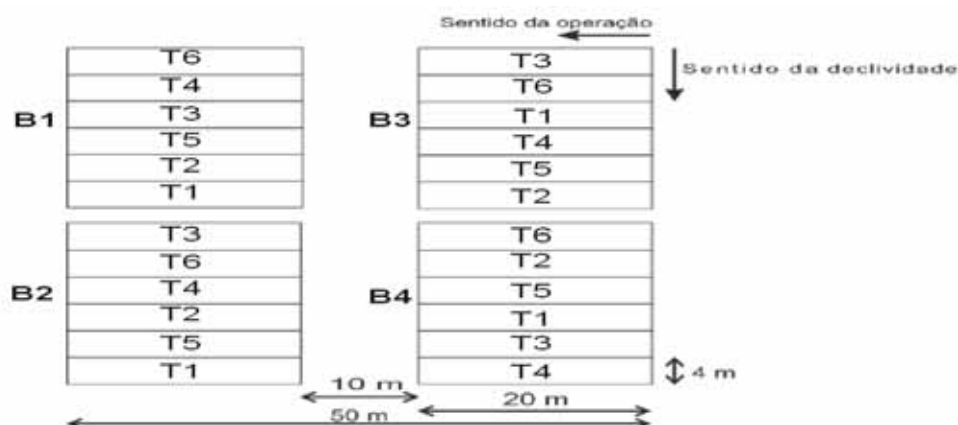
<b>FATORES</b>
$P_1 = 0,25$ m de profundidade
$P_2 = 0,35$ m de profundidade
$V_1 =$ marcha de trabalho A1 do trator ( $V_1 \sim 2,3$ km h <sup>-1</sup> , sem carga)
$V_2 =$ marcha de trabalho A2 do trator ( $V_2 \sim 3,2$ km h <sup>-1</sup> , sem carga)
$V_3 =$ marcha de trabalho B1 do trator ( $V_3 \sim 4,6$ km h <sup>-1</sup> , sem carga)

<b>TRATAMENTOS</b>
$T1 = P_1V_1$ $T2 = P_1V_2$ $T3 = P_1V_3$ $T4 = P_2V_1$ $T5 = P_2V_2$ $T6 = P_2V_3$

### 5.2.3 Instalação e condução do experimento

Cada parcela do experimento possuía 4 m de largura por 20 m de comprimento, sendo que, entre os blocos foi deixado um carreador com 10 m de comprimento a fim de permitir as manobras e estabilização dos equipamentos antes do início da aquisição dos dados. A Figura 7 mostra o esquema de implantação do experimento no campo.



**Figura 7.** Esquema da disposição dos tratamentos e dos blocos no campo.

### 5.2.4 Cronograma de condução do experimento

A instalação e condução do experimento foram realizadas de acordo com a seqüência cronológica apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3.** Cronograma de atividades desenvolvidas no campo experimental.

<b>Data</b>	<b>Atividade</b>
31/10/2007	Manejo da vegetação de milho na área experimental com roçadora, enleiradora e retroescavadora para retirada da palhada.
01/11/2007	Demarcação das parcelas experimentais.
27/11/2007	Instrumentação do trator.
28/11/2007	Regulagem do subsolador. Teste do conjunto trator-equipamento no campo.
29/11/2007	Teste do conjunto trator-equipamento no campo.
30/11/2007	Coleta das amostras de teor de água no solo. Coleta para determinação da densidade do solo. Coleta de dados da resistência do solo à penetração. Coleta de dados de força de tração na barra, consumo de combustível do trator, patinagem/deslizamento dos rodados e velocidade de deslocamento do trator. Coleta de dados de área de solo mobilizada.

## **5.2.5 Métodos de determinação dos parâmetros de caracterização do solo**

### **5.2.5.1 Densidade do solo**

A densidade do solo foi determinada na camada de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m de profundidade, utilizando o método do torrão parafinado, descrito conforme Embrapa (1997). Em cada parcela e profundidade, foi coletada uma amostra de solo antes da realização do ensaio.

### **5.2.5.2 Teor de água no solo**

Para a determinação do teor de água no solo, foi utilizado o método gravimétrico padrão, com base na massa de solo seco em estufa à temperatura de 110° C até atingir massa constante (EMBRAPA, 1997), sendo os resultados expressos em porcentagem.

Foi coletada uma amostra de solo, aleatoriamente em cada parcela, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m de profundidade, no momento da realização do ensaio. As amostras foram colocadas em cápsulas de alumínio, vedadas com fita plástica e transportadas ao laboratório, onde foram pesadas em balança digital de precisão de 0,01g e levadas à estufa elétrica, com temperatura 110° C por 24 horas, sendo pesadas novamente.

### **5.2.5.3 Resistência do solo à penetração**

Determinou-se a resistência do solo à penetração, antes da aplicação dos tratamentos, utilizando-se o penetrógrafo descrito no subitem 5.1.4.3. Foram feitas, aleatoriamente, três amostragens em cada parcela experimental. Os valores da resistência do solo à penetração obtidos nos registros foram classificados (a cada 0,05 m) até 0,55 m de profundidade, sendo registrados pelo equipamento em  $\text{kg cm}^{-2}$ . Os resultados foram tabulados e convertidos para MPa, sendo que, em seguida, foram expressos graficamente com o auxílio do programa “Microsoft Excel”.

## 5.2.6 Métodos de determinação dos parâmetros de avaliação

### 5.2.6.1 Avaliação do perfil mobilizado no solo

Foram estudados dois fenômenos decorrentes da operação de subsolagem: o deslocamento vertical do perfil superficial do solo e a sua área mobilizada, sendo que para isto foi realizado o levantamento do perfil da superfície natural, de fundo e de elevação do solo, conforme metodologia descrita por Lanças (1987).

Após a obtenção dos dados dos perfis, estes foram tabulados, plotados e calculados no programa “Microsoft Excel”, obtendo-se, assim, a área mobilizada no solo e a área de elevação em cada parcela.

### 5.2.6.2 Determinação do empolamento do solo

O empolamento do solo foi determinado pela razão entre a área de elevação e a área mobilizada pelos órgãos ativos do subsolador (Equação 1), segundo metodologia proposta por Gamero e Benez (1990).

$$Emp = \frac{Ae}{Am} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

$Emp$  = empolamento (%);

$Ae$  = área de elevação (m<sup>2</sup>);

$Am$  = área mobilizada (m<sup>2</sup>).

### 5.2.6.3 Velocidade média de deslocamento do conjunto

A velocidade média de deslocamento foi determinada, cronometrando-se o tempo necessário para percorrer cada parcela de 20 metros de comprimento, e calculada de

acordo com a Equação 2. O sistema de aquisição de dados foi acionado mediante auxílio de balizamento no início e final do comprimento de cada parcela, para cronometrar o tempo exato em que o trator iniciou e terminou o percurso.

$$Vm = \frac{\Delta S}{\Delta t} \cdot 3,6 \quad (2)$$

Onde:

$Vm$  = velocidade média ( $\text{km h}^{-1}$ );

$\Delta S$  = espaço percorrido (m);

$\Delta t$  = tempo decorrido (s);

3,6 = fator de conversão.

#### 5.2.6.4 Patinagem dos rodados do trator

A patinagem de cada rodado do trator foi determinada pela relação entre o número de pulsos da roda quando o trator operou com carga na barra de tração ao percorrer a parcela e o número de pulsos da roda quando operou sem carga na barra.

Registrou-se o valor integrado do número de pulsos das rodas no momento da operação de subsolagem (com carga na barra de tração). A condição sem carga foi determinada com o trator operando sem nenhuma máquina ou implemento acoplado à barra (ASAE, 1996). Para o cálculo da patinagem, utilizou-se da Equação 3.

$$Pat = \left( \frac{NPC - NPS}{NPS} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

$Pat$  = patinagem das rodas (%);

$NPC$  = número de pulsos da roda do trator operando com carga na barra de tração (subsolador);

$NPS$  = número de pulsos da roda do trator operando sem carga na barra de tração.

### 5.2.6.5 Capacidade de campo efetiva

A capacidade de campo efetiva foi determinada pela relação entre a área útil de cada parcela trabalhada com respectivo tempo de percurso, segundo Mialhe (1974), por meio da Equação 4.

$$CCE = \frac{A_{tr}}{\Delta t} \cdot 0,36 \quad (4)$$

Onde:

$CCE$  = capacidade de campo efetiva ( $ha\ h^{-1}$ );

$A_{tr}$  = área útil da parcela trabalhada ( $m^2$ );

$\Delta t$  = tempo gasto no percurso da parcela experimental (s);

0,36 = fator de conversão.

### 5.2.6.6 Consumo horário de combustível

Para avaliar o consumo horário de combustível do trator, utilizou-se do fluxômetro descrito no subitem 5.1.5.2, o qual foi instalado em um suporte próximo ao filtro de combustível do trator. O gerador registrou uma unidade de pulso a cada mL de combustível que passou pelo mesmo. Contabilizando-se a quantidade de pulsos e o tempo gasto para percorrer cada parcela, o consumo horário de combustível foi calculado pela Equação 5.

$$C_{HC} = \frac{\Sigma p \cdot 3,6}{\Delta t} \quad (5)$$

Onde:

$C_{HC}$  = consumo horário de combustível ( $L h^{-1}$ );

$\Sigma p$  = somatório de pulsos, equivalente ao somatório de mL de combustível gasto para percorrer a parcela experimental (mL);

$\Delta t$  = tempo gasto para percorrer a parcela experimental (s);

3,6 = fator de conversão.

### 5.2.6.7 Consumo operacional de combustível

O consumo operacional de combustível ou consumo de combustível por unidade de área foi obtido da relação entre o consumo horário de combustível e a capacidade de campo efetiva, pela Equação 6.

$$C_{OC} = \frac{C_{HC}}{CCE} \quad (6)$$

Onde:

$C_{OC}$  = consumo operacional de combustível ( $L ha^{-1}$ );

$C_{HC}$  = consumo horário de combustível ( $L h^{-1}$ );

$CCE$  = capacidade de campo efetiva ( $ha h^{-1}$ ).

### 5.2.6.8 Força média na barra de tração do trator

Para a determinação de força de tração em cada parcela, utilizou-se a célula de carga descrita no subitem 5.1.5.3, a qual foi instalada em um suporte entre o trator e o implemento, de forma a mantê-la na posição horizontal, permitindo que toda a tração exigida pelo subsolador fosse detectada pela célula de carga.

A exigência de força de tração média na barra de tração correspondeu à média aritmética de todos os valores obtidos durante o deslocamento do conjunto trator/equipamento pela parcela experimental.



### **5.2.6.9 Força máxima na barra de tração do trator**

A força máxima de tração, ou pico de força, correspondeu ao valor máximo de força de tração, armazenada pelo sistema de aquisição de dados durante o deslocamento do conjunto trator/equipamento na parcela experimental, sendo esta expressa em N.

### **5.2.6.10 Potência média requerida na barra de tração do trator**

A potência média exigida na barra de tração foi calculada em função da força de tração e da velocidade de deslocamento, utilizando-se da Equação 7.

$$P_m = \frac{F_m \cdot V_m}{3,6} \quad (7)$$

Onde:

$P_m$  = potência média requerida na barra de tração do trator (kW);

$F_m$  = força de tração média requerida na barra de tração (kN);

$V_m$  = velocidade média de deslocamento ( $\text{km h}^{-1}$ );

3,6 = fator de conversão.

### **5.2.6.11 Potência máxima requerida na barra de tração do trator**

A potência máxima requerida na barra de tração correspondeu à potência calculada no pico máximo de força registrado em cada parcela experimental, sendo calculada pela Equação 8 (SILVA et al., 2000).

$$P_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot V_m}{3,6} \quad (8)$$

Onde:

$P_{max}$  = potência máxima requerida na barra de tração do trator (kW);

$F_{max}$  = força de tração máxima requerida na barra de tração (kN);

$V_m$  = velocidade média de deslocamento ( $\text{km h}^{-1}$ );

3,6 = fator de conversão.

#### 5.2.6.12 Força específica operacional

Este parâmetro correspondeu à relação entre o requerimento de força de tração média do equipamento em cada tratamento e a área de solo mobilizado, sendo calculada pela Equação 9.

$$F_{esp} = \frac{F_m}{A_m} \cdot 1000 \quad (9)$$

Onde:

$F_{esp}$  = força específica operacional de tração ( $\text{N cm}^{-2}$ );

$F_m$  = força de tração requerida pelo equipamento (kN);

$A_m$  = área de solo mobilizada ( $\text{cm}^2$ );

1000 = fator de conversão.

#### 5.2.6.13 Potência específica operacional

A potência específica operacional é a relação entre o requerimento de potência das hastes do subsolador em cada tratamento e a área de solo mobilizada, calculada pela Equação 10.

$$Pot_{esp} = \frac{P_m}{A_m} \cdot 1000 \quad (10)$$

Onde:

$Pot_{esp}$  = potência média por área de solo mobilizado ( $W\ cm^{-2}$ );

$P_m$  = potência requerida pelo equipamento (kW);

$A_m$  = área de solo mobilizada ( $cm^2$ );

1000 = fator de conversão.

#### 5.2.6.14 Força média em relação à profundidade de trabalho

Este parâmetro refere-se à relação entre os valores da força média requerida pelo trator para cada tratamento e a profundidade de trabalho das hastes, utilizando a Equação 11.

$$F_{prof} = \frac{F_m}{Pr_{Trab}} \cdot 1000 \quad (11)$$

Onde:

$F_{prof}$  = força média em relação à profundidade de trabalho ( $N\ cm^{-1}$ );

$F_m$  = força de tração requerida pelas hastes (kN);

$Pr_{Trab}$  = profundidade de trabalho (cm);

1000 = fator de conversão.

#### 5.2.6.15 Potência média em relação à profundidade de trabalho

Este parâmetro refere-se à relação entre os valores médios da potência média requerida para cada tratamento e a profundidade de trabalho da haste, calculada através da Equação 12.

$$Pot_{prof} = \frac{P_m}{Pr_{Trab}} \cdot 1000 \quad (12)$$

Onde:

$Pot_{prof}$  = potência média em relação à profundidade de trabalho ( $W\text{ cm}^{-1}$ );

$P_m$  = potência requerida pelas hastes (kW);

$Pr_{Trab}$  = profundidade de trabalho (cm);

1000 = fator de conversão.

### **5.2.7 Tratamento estatístico dos dados**

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente por meio do programa “Sisvar”, que foram tabulados e submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos para os parâmetros avaliados serão apresentados na forma de Tabelas e Figuras. Nas Tabelas de resultados de análise de variância e de teste de médias, os valores seguidos de letras minúsculas diferentes em cada coluna e para cada fator, diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade; a ausência de letras indica que as médias não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si; nas linhas de resultados obtidos presentes nas Tabelas, a presença de letras maiúsculas diferentes mostra a ocorrência de efeitos estatisticamente significativos pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade; ainda neste caso (análise dos valores mostrados nas linhas das Tabelas), a ausência de letras maiúsculas diferentes indica que não houve a ocorrência de diferenças estatisticamente significativas; a sigla “CV” corresponde ao coeficiente de variação e a “média” corresponde ao valor médio de todas as repetições e tratamentos.

Quanto à seqüência de apresentação dos resultados e das discussões serão, inicialmente, apresentados os valores obtidos para os parâmetros de caracterização das

condições de operação do solo da área experimental e, posteriormente, aqueles referentes aos parâmetros de avaliação do desempenho do equipamento de mobilização.

No corpo do texto, das Tabelas e Figuras, para efeito de abreviações, foram utilizadas as seguintes terminologias: “P1” – profundidade 1, referente a 0,25 m de profundidade; “P2” – profundidade 2, referente a 0,35 m de profundidade; “A1” = marcha de trabalho A1 do trator (2,30 km h<sup>-1</sup>, sem carga); “A2” - marcha de trabalho A2 do trator (3,20 km h<sup>-1</sup>, sem carga); “B1” = marcha de trabalho B1 do trator (4,60 km h<sup>-1</sup>, sem carga); “CCE” – capacidade de campo efetiva; “RDD” – roda dianteira direita; “RDE” – roda dianteira esquerda; “RTD” – roda traseira direita; “RTE” – roda traseira esquerda; “Fm” - força média na barra de tração; “Fmax” - força máxima na barra de tração; “Pm” - potência média na barra de tração; “Pmax” - potência máxima na barra de tração; “CHC” - consumo horário de combustível; “CCE” – capacidade de campo efetiva; “F<sub>esp</sub>” – força específica operacional; “Coc” – consumo específico operacional; “P<sub>esp</sub>” - potência específica operacional; “F<sub>prof</sub>” - força média em relação à profundidade de trabalho e “P<sub>prof</sub>” - potência média em relação à profundidade de trabalho.

### 6.1 Teores de água no solo

Na Tabela 4, são apresentados Os valores médios dos teores de água no solo, a cada intervalo de 0,10 m até a profundidade de 0,50m, no dia da realização do experimento.

**Tabela 4.** Teores de água no solo (g kg<sup>-1</sup>), nas profundidades de 0 - 0,50 m.

Profundidade (m)	Blocos				Média
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	
0,00 – 0,10	176,3	183,7	165,8	180,8	176,7
0,10 – 0,20	181,3	194,3	173,0	188,0	184,2
0,20 – 0,30	191,8	193,5	176,9	190,4	188,2
0,30 – 0,40	192,3	200,4	178,7	202,0	193,4
0,40 – 0,50	193,6	202,2	182,1	202,9	195,2
<b>Média</b>	187,1	194,8	175,3	192,8	

Na Tabela 4, verifica-se que nos quatro blocos do experimento os teores de água no solo mantiveram-se com grau de uniformidade. Esta constatação é importante, uma vez que os dados de demanda energética são muito dependentes do teor de água presente no solo no momento da operação. Observou-se ainda que os teores médios de água no solo foram superiores, quanto mais profunda foi a camada estudada.

Avaliando o desempenho de subsoladores em solos argilosos, Sasaki (2005) verificou que o desempenho operacional teve correlação direta com o teor de água presente no solo, sendo que o aumento da umidade induziu a uma menor largura efetiva de trabalho e menor rendimento da operação.

## 6.2 Densidades do solo

Os valores médios, obtidos para a densidade do solo nas profundidades de 0 - 0,50 m, são apresentados na Tabela 5, onde se pode observar que não ocorreram grandes diferenças entre os valores obtidos para os blocos do experimento, evidenciando a homogeneidade da área utilizada. Verifica-se ainda uma tendência das maiores profundidades do solo apresentarem menores valores de densidade.

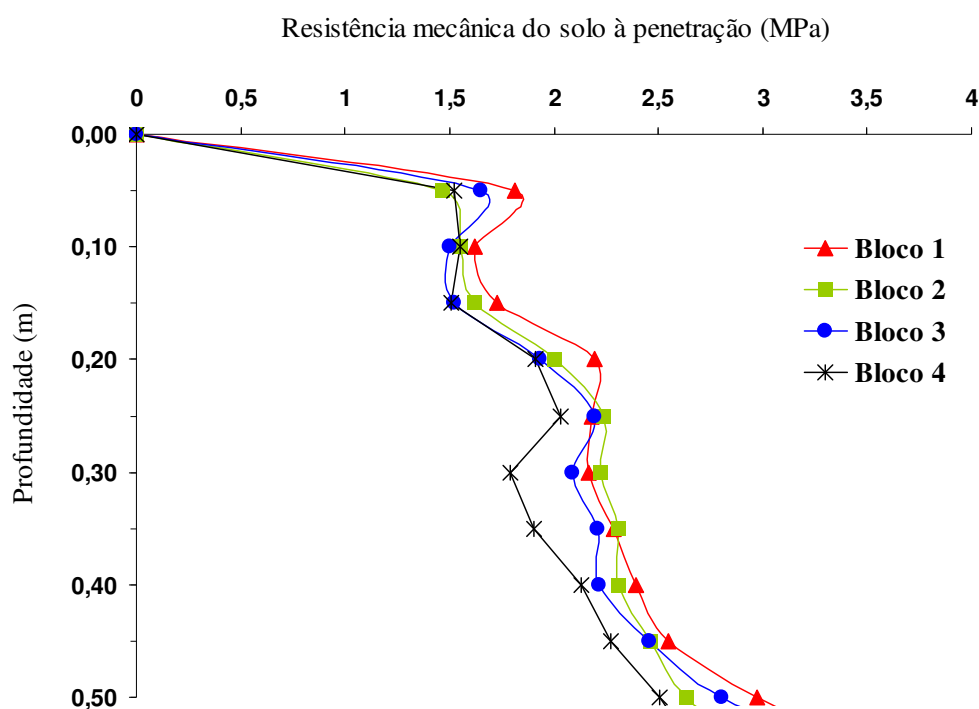
**Tabela 5.** Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 - 0,50 m.

Profundidade (m)	Blocos				Média
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	
0,00 – 0,10	1,31	1,28	1,33	1,29	1,30
0,10 – 0,20	1,28	1,26	1,35	1,28	1,29
0,20 – 0,30	1,28	1,23	1,36	1,24	1,28
0,30 – 0,40	1,25	1,24	1,32	1,24	1,26
0,40 – 0,50	1,26	1,23	1,32	1,27	1,27
<b>Média</b>	1,28	1,25	1,34	1,27	

### 6.3 Resistências mecânicas do solo à penetração

Para caracterizar o solo utilizado no experimento, quanto a indicativos de compactação, determinou-se a resistência à penetração cujos valores são ilustrados na Figura 8.

As curvas resultantes dos valores médios de resistência mecânica do solo à penetração, em função da profundidade, mostram que houve um comportamento semelhante nos quatro blocos experimentais. Observa-se que a resistência mecânica média à penetração foi maior nas camadas mais profundas do solo estudado.



**Figura 8.** Resistência do solo à penetração (MPa) nos quatro blocos experimentais (B1, B2, B3 e B4) no dia do experimento.

### 6.4 Profundidade de trabalho efetiva

Na Tabela 6, são apresentados os resultados médios obtidos durante a operação de subsolagem para as profundidades reais obtidas em condições de campo, considerando os fatores avaliados, onde se pode constatar que as mesmas ficaram próximas



daquelas que foram pré-estabelecidas antes da instalação do experimento quando foi efetuada a regulagem do equipamento. Este fato é muito relevante, evidenciando que o equipamento, depois de estaticamente regulado para atingir determinada profundidade, manteve-a em condições reais de operação em condições de campo.

Constata-se, ainda na Tabela 6, que as marchas utilizadas no experimento não influenciaram estatisticamente nos valores obtidos para as profundidades médias de preparo, uma vez que estes resultados, nada mais são do que as médias obtidas nas profundidades P1 e P2.

**Tabela 6.** Profundidade de trabalho efetiva obtida na operação de subsolagem em função dos fatores avaliados no experimento.

<b>Fatores</b>	<b>Profundidade efetiva (m)</b>
<b>Profundidades</b>	
<b>P1</b>	0,251 b
<b>P2</b>	0,359 a
<b>Marchas do trator</b>	
<b>A1</b>	0,306
<b>A2</b>	0,290
<b>B1</b>	0,289
<b>CV (%)</b>	0,100
<b>Média</b>	0,295

$P_{\text{efetiva}}$ : DMS profundidades = 0,026; DMS marchas = 0,039.

Na Tabela 7, podem ser observados os resultados médios obtidos para a interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de preparo para a variável profundidade de trabalho efetiva. Pode-se verificar que, para as três marchas utilizadas, em cada profundidade estudada, os valores mantiveram-se muito próximos aos daqueles previamente regulados com o equipamento em condições estáticas de 0,25 e 0,35 m, respectivamente, para as profundidades P1 e P2.

**Tabela 7.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável profundidade de trabalho efetiva (m).

<b>Profundidade efetiva de trabalho (m)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	0,243 B	0,368 A
<b>A2</b>	0,259 B	0,330 A
<b>B1</b>	0,250 B	0,318 A

$P_{\text{efetiva}}$ : DMS do desdobramento marchas x profundidades = 0,054; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 0,447.

### 6.5 Área de solo mobilizado e empolamento do solo

Na Tabela 8, são apresentados os resultados obtidos para as áreas mobilizadas no solo pelo subsolador e para os empolamentos inerentes a tal operação. Pode-se constatar que, na profundidade P2, a área mobilizada no solo foi 57,1 % maior do que aquela verificada na profundidade P1, com diferença estatisticamente significativa. Ressalta-se que, neste caso, o aumento da área mobilizada da profundidade P1 (0,25 m) para P2 (0,35 m) foi de 40,0 %. Isto mostra que o aumento de 0,10 m na profundidade de atuação dos órgãos ativos do equipamento implicou, proporcionalmente, numa maior área mobilizada no solo.

Observou-se que as velocidades de deslocamento não influenciaram significativamente as áreas de solo mobilizadas, fato este também relatado por Yshimine (1993).

Na Tabela 8, pode ser constatada também a ausência de efeitos estatisticamente significativos dos fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho sobre os valores de empolamento do solo.

**Tabela 8.** Área mobilizada (m<sup>2</sup>) e empolamento do solo (%), em função dos fatores avaliados no experimento.

Fatores	Área mobilizada (m <sup>2</sup> )	Empolamento do solo (%)
<b>Profundidades</b>		
<b>P1</b>	0,35 a	21,90
<b>P2</b>	0,55 b	21,54
<b>Marchas do trator</b>		
<b>A1</b>	0,44	22,27
<b>A2</b>	0,45	17,87
<b>B1</b>	0,46	25,01
<b>CV (%)</b>	12,96	41,61
<b>Média</b>	0,45	21,72

Área mobilizada: DMS profundidades = 0,0506; DMS marchas = 0,0756. Empolamento do solo: DMS profundidades = 7,864; DMS marchas = 11,743.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados obtidos para a interação estatisticamente significativa referente às áreas mobilizadas no solo. Nesta Tabela, pode-se constatar que na profundidade P2 (0,35 m), independentemente da marcha utilizada no trator, sempre ocorreram diferenças estatisticamente significativas quando os valores foram comparados com aqueles obtidos na profundidade P1 (0,25 m).

**Tabela 9.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável área mobilizada (m<sup>2</sup>).

Marchas	Área mobilizada (m <sup>2</sup> )	
	Profundidades	
	P1	P2
<b>A1</b>	0,31 B	0,57 A
<b>A2</b>	0,40 B	0,49 A
<b>B1</b>	0,32 B	0,59 A

Área mobilizada: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 0,107; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 0,088.

## 6.6 Velocidade média de deslocamento e capacidade de campo efetiva

Os resultados da variação da velocidade média de deslocamento e da capacidade de campo efetiva da operação de mobilização do solo são apresentados na Tabela 10, onde se observa que, sendo a capacidade de campo efetiva função direta da velocidade de deslocamento, ambas as variáveis tiveram o mesmo comportamento.

É importante observar que o valor obtido para a velocidade de deslocamento na profundidade P2 (1,98 km h<sup>-1</sup>), que é a média obtida para as três marchas avaliadas do trator, apresentou um resultado 34,0 % menor do que aquele verificado na profundidade P1 (3,00 km h<sup>-1</sup>), estando relacionado diretamente com o aumento da patinação do trator, operando em maiores profundidades.

**Tabela 10.** Velocidade de deslocamento (km h<sup>-1</sup>) e capacidade de campo efetiva (ha h<sup>-1</sup>), em função dos fatores avaliados no experimento.

<b>Fatores</b>	<b>Velocidade média (km h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Capacidade de campo efetiva (ha h<sup>-1</sup>)</b>
<b>Profundidades</b>		
<b>P1</b>	3,00 a	2,76 a
<b>P2</b>	1,98 b	1,81 b
<b>Marchas do trator</b>		
<b>A1</b>	1,72 c	1,58 c
<b>A2</b>	2,39 b	2,19 b
<b>B1</b>	3,35 a	3,09 a
<b>CV (%)</b>	4,83	3,91
<b>Média</b>	2,49	2,29

Velocidade real: DMS profundidades = 0,035; DMS marchas = 0,042. Capacidade de campo efetiva: DMS profundidades = 0,078; DMS marchas = 0,1163.

É importante observar que as velocidades previamente estabelecidas para a operação do trator, sem carga, nas marchas A1, A2 e B1 foram, respectivamente: 2,30; 3,20 e 4,60 km h<sup>-1</sup>. Na Tabela 10, pode-se constatar que estas velocidades, durante a operação

de subsolagem, para as respectivas marchas anteriormente citadas, foram de 1,72; 2,39 e 3,35 km h<sup>-1</sup>, ocorrendo um decréscimo percentual de 25,2; 25,3 e 37,2 %, respectivamente. Evidentemente, este é um efeito direto do aumento do patinamento dos rodados do trator quando da realização da operação de subsolagem.

Na Tabela 10, pode-se verificar que os valores, obtidos para a capacidade de campo efetiva, apresentaram o mesmo comportamento estatístico das velocidades de deslocamento do conjunto trator-subsolador em operação, observando-se, porém, que o aumento dos valores encontrados, quando se alterou a marcha de A1 para A2, de A2 para B1 e de A1 para B1, foram de 38,6; 41,1 e 95,6 %, respectivamente.

Nas Tabelas 11 e 12, são apresentados os resultados obtidos para a interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para as variáveis de velocidade média de deslocamento e capacidade de campo efetiva, respectivamente. Verifica-se nestas Tabelas que ambas apresentaram o mesmo comportamento estatístico: marchas mais altas implicaram em maiores velocidades e capacidades de campo; e, maiores profundidades, em menores velocidades e capacidade de campo, sendo que os mesmos resultados foram encontrados por Lanças (1987).

É importante observar na Tabela 12 que a operação realizada na menor profundidade (P1=0,25 m), nas três marchas estudadas, sempre resultou em maiores valores de capacidade de campo efetiva, quando comparadas com a profundidade P2 (0,35 m). Esta observação mostra a importância da localização exata da posição da camada compactada no perfil do solo, uma vez que, se os órgãos ativos do equipamento operar em profundidades maiores que a determinada, os custos financeiros do trabalho terão grande aumento. Isto pode ser exemplificado, na Tabela 12, tomando-se como referência a utilização da marcha B1, onde a redução da profundidade da operação de P2 para P1 em 0,10 m implicou em um aumento na capacidade de campo efetiva (ha h<sup>-1</sup>) do conjunto mecanizado da ordem de 53,7 %. Considerando, que a operação de subsolagem é, normalmente, a mais onerosa financeiramente nos sistemas mecanizados utilizados na produção agrícola, pode-se ter a dimensão da importância de que a mesma seja realizada sempre na profundidade correta, ou seja, naquela em que haverá o rompimento da camada compactada, sem que as hastes sejam totalmente cravadas no solo.

**Tabela 11.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável velocidade média de deslocamento ( $\text{km h}^{-1}$ ).

<b>Velocidade média de deslocamento (<math>\text{km h}^{-1}</math>)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	2,07 Ac	1,37 Bc
<b>A2</b>	2,87 Ab	1,91 Bb
<b>B1</b>	4,05 Aa	2,66 Ba

Velocidade real: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 0,221; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 0,181.

**Tabela 12.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável capacidade de campo efetiva ( $\text{ha h}^{-1}$ ).

<b>Capacidade de campo efetiva (<math>\text{ha h}^{-1}</math>)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	1,90 Ac	1,25 Bc
<b>A2</b>	2,63 Ab	1,75 Bb
<b>B1</b>	3,75 Aa	2,44 Ba

CCE: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 0,1644; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 0,1349.

### 6.7 Patinagem dos rodados do trator

Na Tabela 13, são apresentados os resultados obtidos para o patinamento das rodas do trator, onde se pode verificar que o patinamento dos rodados do trator apresentou diferenças estatisticamente significativas, quando foram comparados os valores médios obtido para as profundidades P1 e P2. Os resultados mostram que o aumento de 0,10 m na profundidade de operação implicou em aumentos médios no patinamento dos rodados do trator quando se utilizou a regulagem do subsolador que permitiu operar a 0,35 m. Constata-se, portanto, o efeito do patinamento sobre as velocidades de deslocamento utilizadas na operação e, paralelamente, sobre os valores de capacidade de campo efetiva discutidos no subitem 6.6. É

importante ressaltar que o aumento da profundidade de P1 para P2 implicou em uma redução da velocidade média de deslocamento de 34 %, conseqüência de um aumento no patinamento dos rodados de 321 %, em média.

**Tabela 13.** Patinagem (%) das rodas dianteiras direita (RDD) e esquerda (RDE) e das rodas traseiras direita (RTD) e esquerda (RTE) do trator, em função dos fatores avaliados no experimento.

<b>Patinagem (%)</b>				
<b>Fatores</b>	<b>RDD</b>	<b>RDE</b>	<b>RTD</b>	<b>RTE</b>
<b>Profundidades</b>				
<b>P1</b>	9,30 b	9,29 b	9,31 b	9,55 b
<b>P2</b>	39,22 a	39,33 a	38,87 a	40, 21 a
<b>Marchas do trator</b>				
<b>A1</b>	23,07	23,02	23,41	23,52 b
<b>A2</b>	24,13	24,05	23,77	24,40 ab
<b>B1</b>	25,59	25,86	25,10	26,71 a
<b>CV (%)</b>	9,84	9,49	10,95	8,46
<b>Média</b>	24,26	24,31	24,09	24,88

RDD: DMS profundidades = 2,076; DMS marchas = 3,101. RDE: DMS profundidades = 2,008; DMS marchas = 2,999. RTD: DMS profundidades = 2,295; DMS marchas = 3,427. RTE: DMS profundidades = 1,832; DMS marchas = 2,735.

Na Tabela 13, verifica-se ainda que as diferentes marchas utilizadas no experimento não influenciaram estatisticamente nos valores obtidos para o patinamento dos rodados do trator, exceto para a roda traseira esquerda, onde a marcha B1 apresentou valor superior à marcha A1.

Na Tabela 14, são apresentadas as interações entre os fatores marchas utilizadas e profundidades para a variável patinagem dos rodados do trator.

**Tabela 14.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável patinagem dos rodados.

<b>PATINAGEM (%)</b>		
<b>RDD</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	7,69 B	38,44 A
<b>A2</b>	9,59 B	38,68 A
<b>B1</b>	10,64 B	40,54 A
<b>RDE</b>		
<b>A1</b>	7,63 B	38,42 A
<b>A2</b>	9,33 B	38,76 A
<b>B1</b>	10,92 B	40,81 A
<b>RTD</b>		
<b>A1</b>	7,93 B	38,89 A
<b>A2</b>	9,42 B	38,13 A
<b>B1</b>	10,59 B	39,60 A
<b>RTE</b>		
<b>A1</b>	8,05 B	38,99 Ab
<b>A2</b>	9,41 B	39,39 Aab
<b>B1</b>	11,19 B	42,23 Aa

Patinagem RDD: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 4,385; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 3,597. Patinagem RDE: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 4,241; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 3,478. Patinagem RTD: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 4,846; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 3,975. Patinagem RTE: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 3,869; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 3,173.

Os resultados, contidos na Tabela 14, mostram que a profundidade da operação influenciou significativamente na patinagem dos quatro rodados do trator, nas três velocidades de deslocamento avaliadas. Não foram constatadas diferenças estatísticas quando foram efetuadas as comparações entre as marchas dentro de uma mesma profundidade, exceto



para o rodado traseiro esquerdo na profundidade P2, onde a maior velocidade de deslocamento obteve um maior valor de patinagem. Estes resultados mostram que aliando uma menor profundidade de trabalho e uma menor velocidade de operação ocorre a diminuição da patinagem dos rodados do trator (ALBIERO, 2006).

Considerando que os limites de patinamento, estabelecidos pela ASAE (1997), para solos firmes, encontram-se entre 8 a 10 %, verifica-se na Tabela 14 que para a profundidade P1, os valores obtidos para esse parâmetro estão próximos, porém, para a profundidade P2, os mesmos foram elevados, estando quatro vezes superior à profundidade P1.

### **6.8 Demanda de força de tração, potência na barra e consumo horário de combustível.**

Na Tabela 15, são apresentados os resultados referentes à demanda de força de tração; potência média e máxima; e consumo horário de combustível.

Verifica-se, na Tabela 15, que a maior profundidade de subsolagem P2, quando comparada com a profundidade P1, exigiu maior força de tração na barra e, conseqüentemente, maior potência na barra e consumo horário de combustível, concordando com Bicudo (1990). Observa-se um aumento de 70,1; 11,4 e 33,6 % para a demanda de força de tração na barra, potência na barra e consumo horário de combustível, respectivamente, devido ao incremento de 0,10 m na profundidade de subsolagem. Esta constatação apenas vem ratificar a importância da determinação exata da profundidade da camada compactada no perfil do solo, acima da qual ocorrerá aumento considerável na demanda de energia para executar a operação. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Spoor e Godwin (1978) e Bicudo (1990).

**Tabela 15.** Força média na barra de tração (N), força máxima na barra de tração (N), potência média na barra de tração (kW), potência máxima na barra de tração (kW) e consumo horário de combustível (L h<sup>-1</sup>) em função dos fatores avaliados no experimento.

Fatores	Fm (N)	Fmax (N)	Pm (kW)	Pmax (kW)	CHC (L h <sup>-1</sup> )
<b>Profundidades</b>					
P1	1910,30 b	3875,08 b	1594,99 b	3249,33 b	12,79 b
P2	3248,50 a	6255,08 a	1777,75 a	3441,22 a	17,10 a
<b>Marchas do trator</b>					
A1	2601,13	4999,63	1177,89 c	2274,09 c	12,42 c
A2	2594,43	5092,00	1626,11 b	3220,08 b	14,86 b
B1	2542,65	5103,63	2255,12 a	4541,66 a	17,56 a
<b>CV (%)</b>	3,50	5,55	3,85	4,29	3,50
<b>Média</b>	2579,40	5065,08	1686,37	3345,28	14,95

Fmed: DMS profundidades = 78,508; DMS marchas = 117,24. Fmax: DMS profundidades = 244,448; DMS marchas = 365,040. Pmed: DMS profundidades = 56,488; DMS marchas = 84,354. Pmax: DMS profundidades = 124,759; DMS marchas = 186,305. CHC: DMS profundidades = 0,151; DMS marchas = 0,185.

Pode-se observar na Tabela 15 que os parâmetros força de tração e força máxima de tração não foram influenciados estatisticamente pelas marchas utilizadas no experimento, concordando com Yshimine (1993), e discordando dos dados obtidos por Bicudo (1990), que observou em seu trabalho que maiores velocidades de deslocamento proporcionam maiores valores de força de tração.

Verifica-se que as marchas utilizadas tiveram efeitos sobre as potências médias e máximas e o consumo horário de combustível, com diferenças estatisticamente significativas, ou seja, o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto trator – subsolador implicou em maior demanda energética, resultados também encontrados por Lanças (1987) e Bicudo (1990). Por outro lado, se pode constatar que a utilização da marcha mais alta (B1) demandou 41,4% a mais de consumo de combustível quando comparada com a marcha mais baixa utilizada (A1), porém, verifica-se que neste caso, houve um aumento de 95,6% (Tabela 10) da capacidade de campo efetiva, o que permite inferir que, havendo

possibilidade, a utilização de maiores velocidades na operação de subsolagem seria recomendável em termos de balanço energético.

Nas Tabelas 16 e 17, são apresentados os resultados obtidos para as interações entre as marchas do trator utilizadas e as profundidades de trabalho para as variáveis de força média e máxima na barra de tração, respectivamente. Nas Tabelas 18 e 19, são apresentados os resultados obtidos para a mesma interação, porém para as variáveis, potência média e máxima, na barra de tração..

**Tabela 16.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável força média na barra de tração do trator (N).

<b>Força média na barra de tração (N)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	1942,71 B	3259,55 A
<b>A2</b>	1881,35 B	3307,51 A
<b>B1</b>	1906,85 B	3178,45 A

CHC: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 165,799; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 135,979.

**Tabela 17.** Interação entre os fatores de marchas e profundidades de trabalho para a variável força máxima na barra de tração do trator (N).

<b>Força máxima na barra de tração (N)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	3840,00 B	6159,25 A
<b>A2</b>	3852,50 B	6251,25 A
<b>B1</b>	3932,75 B	6354,75 A

Fmax: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 516,244; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 423,397.

Pode-se observar de forma mais detalhada nas Tabelas 16 e 17 a influência da profundidade sobre a demanda de força média e máxima de tração na barra, com

efeitos estatisticamente significativos, o que não foi constatado quando estes mesmos parâmetros foram avaliados, considerando-se as diferentes marchas utilizadas na operação.

Nas Tabelas 18, 19 e 20, pode-se observar que os valores, obtidos para as potências média e máxima requeridas na barra de tração e o consumo horário de combustível, foram influenciados pelas marchas do trator utilizadas na operação, apresentando diferenças estatisticamente significativas. Sempre que foi utilizada marcha com maior velocidade, os resultados destes parâmetros também aumentaram, concordando com resultados obtidos por Lanças (1987) e Bicudo (1990).

Através dos resultados, apresentados na Tabela 18, observa-se que na avaliação das marchas, também ocorreram diferenças estatisticamente significativas em relação à potência média requerida na barra de tração, quando comparados os valores obtidos para profundidades P1 e P2. Este efeito não foi verificado, quando analisados os resultados contidos na Tabela 19, referente à potência máxima requerida na barra de tração, onde as marchas A1 e B1 não mostraram diferenças estatísticas entre os valores médios obtidos para cada profundidade estudada, embora na profundidade P2, os mesmos tenham sido maiores.

**Tabela 18.** Interação entre os fatores de marchas e profundidades de trabalho para a variável potência média requerida na barra de tração (kW).

<b>Potência média requerida na barra de tração (kW)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	1119,45 Bc	1236,32 Ac
<b>A2</b>	1499,60 Bb	1752,62 Ab
<b>B1</b>	2165,93 Ba	2344,30 Aa

Pmed: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 119,195; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 97,840.

**Tabela 19.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência máxima requerida na barra de tração (kW).

Potência máxima requerida na barra de tração (kW)		
Marchas	Profundidades	
	P1	P2
A1	2213,19 c	2334,99 c
A2	3069,75 Bb	3370,42 Ab
B1	4465,05 a	4618,28 a

Pmax: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 263,476; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 216,089.

Os resultados, obtidos para o consumo horário de combustível (Tabela 20), diferiram estatisticamente entre as velocidades (marchas) e as profundidades estudadas, tendo comportamento semelhante ao da demanda de potência média; visto que a demanda de potência está relacionada com o aumento de velocidade, à medida que houve aumento da velocidade de deslocamento, ocorreu aumento significativo da demanda de potência e, conseqüentemente do consumo horário de combustível. Comparando-se a menor e a maior velocidade (marchas A1 e B1), houve aumento para o consumo horário de combustível de 35% e 47% respectivamente para as profundidades P1 e P2, sendo o mesmo fato constatado por Lanças (1987).

**Tabela 20.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável consumo horário de combustível (L h<sup>-1</sup>).

Consumo horário de combustível L h <sup>-1</sup>		
Marchas	Profundidades	
	P1	P2
A1	11,05 Bc	13,79 Ac
A2	12,41 Bb	17,32 Ab
B1	14,92 Ba	20,20 Aa

CHC: DMS do desdobramento marchas x profundidades = 0,962; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 0,789.

O menor consumo horário de combustível também pode ser explicado devido ao menor índice de patinação encontrado na menor profundidade e velocidade de deslocamento. Segundo Jenane et al. (1996), o menor consumo de combustível é obtido quando a patinação está entre 10 e 30%.

### **6.9 Força e potência específica operacional e consumo operacional de combustível.**

Na Tabela 21, são apresentados os resultados obtidos para as demandas de força específica operacional ( $N\ cm^2$ ), potência específica operacional ( $W\ cm^2$ ) e o consumo operacional de combustível ( $L\ ha^{-1}$ ).

Os resultados, obtidos para a demanda de força de tração específica operacional, não foram influenciados pelas velocidades (marchas) de deslocamento e pelas profundidades de trabalho, porém, estes fatores mostraram efeitos nos resultados obtidos para a variável potência específica, evidenciando uma maior demanda quando o equipamento foi operado com regulagem de profundidade P1 e utilizando a marcha de maior velocidade (B1), mostrando, assim, que a subsolagem, executada em menor profundidade e em maior velocidade, demandou maior necessidade de potência na barra de tração do trator por área de solo mobilizada.

Verificou-se que as profundidades de operação e as marchas empregadas influenciaram o consumo operacional de combustível, ou seja, consumo por unidade de área mobilizada, havendo diferenças estatisticamente significativas para esta variável, quando o subsolador operou na profundidade P2 e na menor velocidade (marcha A1). Pode-se constatar na Tabela 21 que o aumento de 0,10 m na profundidade de operação de subsolagem acarretou um acréscimo de consumo de combustível por hectare de 101,6 %.

Comparando-se o consumo operacional de combustível com a capacidade de campo efetiva (Tabela 10), pode-se observar que o aumento da velocidade de deslocamento de 94,8% (comparando marcha A1 e B1) aumentou em 95,6 % a capacidade de campo efetiva e reduziu em 27,6 % o consumo de combustível por hectare, o que caracteriza que a utilização de maiores velocidades de deslocamento mostram um balanço energético mais positivo.

**Tabela 21.** Força específica operacional ( $N\ cm^{-2}$ ), potência específica operacional ( $W\ cm^{-2}$ ) e consumo operacional de combustível ( $L\ ha^{-1}$ ) em função dos fatores avaliados no experimento.

<b>Fatores</b>	<b>F<sub>esp</sub> N cm<sup>-2</sup></b>	<b>P<sub>esp</sub> W cm<sup>-2</sup></b>	<b>Coc L ha<sup>-1</sup></b>
<b>Profundidades</b>			
P1	571,97	477,36 a	13,43 b
P2	599,99	327,41 b	27,08 a
<b>Marchas do trator</b>			
A1	605,20	292,31 b	23,41a
A2	575,61	368,29 b	20,29 b
B1	577,14	546,54 a	17,06 c
<b>CV (%)</b>			
	14,27	18,44	86,00
<b>Média</b>	585,98	402,38	20,25

Fesp: DMS profundidades = 78,508; DMS marchas = 108,6458; Pesp: DMS profundidades = 64,5699; DMS marchas = 96,4226. Coc: DMS profundidades = 1,2084; DMS marchas = 1,8045.

Nas Tabelas 22 e 23, são apresentados os resultados obtidos para a interação entre as marchas do trator utilizadas e as profundidades de trabalho para as variáveis, potência específica operacional e consumo operacional de combustível, respectivamente.

Observa-se na Tabela 22 que o subsolador, operando em uma menor profundidade de trabalho (P1) e maior velocidade de deslocamento (marcha B1), demandou maior potência específica operacional, uma vez que esta variável está relacionada com a área mobilizada no solo e a potência na barra requerida pelo equipamento. Verifica-se também nesta Tabela que na marcha A2 não ocorreu diferença estatisticamente significativa quando foram comparadas as duas profundidades estudadas.

**Tabela 22.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência específica operacional ( $W\ cm^{-2}$ ).

<b>Potência específica operacional</b> ( $W\ cm^{-2}$ )		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	367,62 Ab	217,01 Bb
<b>A2</b>	371,64 Ab	364,94 Aa
<b>B1</b>	692,82 Aa	400,27 Ba

$P_{esp}$ : DMS do desdobramento marchas x profundidades = 136,3622; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 111,8373.

Analisando-se os resultados obtidos para o consumo operacional de combustível (Tabela 23), verifica-se que este parâmetro foi influenciado pela velocidade de deslocamento, sendo que a marcha B1, maior velocidade em relação às demais, foi a que proporcionou o menor consumo operacional de combustível por hectare, sendo inversamente proporcional ao aumento da velocidade de deslocamento e proporcional a profundidade de trabalho.

O maior consumo operacional de combustível foi encontrado quando o subsolador operou na maior profundidade (P2) e na menor velocidade de deslocamento (marcha A1), onde se obteve maior demanda de potência requerida na barra de tração. Verifica-se ainda nesta Tabela que a maior profundidade de operação de subsolagem sempre demandou maior consumo operacional de combustível com diferenças estatisticamente significativas.



**Tabela 23.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável consumo operacional de combustível ( $L ha^{-1}$ ).

Consumo operacional de combustível ( $L ha^{-1}$ )		
Marchas	Profundidades	
	P1	P2
A1	16,14 Ba	30,68 Aa
A2	13,11 Bb	27,48 Ab
B1	11,06 Bb	23,07 Ac

$C_{OC}$ : DMS do desdobramento marchas x profundidades = 2,5520; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 2,0930.

#### 6.10. Força e potência média em relação à profundidade de trabalho

Os valores de força média e potência média em relação à profundidade de trabalho são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24.** Força média [ $F_{prof}$  ( $N cm^{-1}$ )] e potência média [ $Pot_{prof}$  ( $W cm^{-1}$ )] em relação à profundidade de trabalho em função dos fatores avaliados no experimento.

Fatores	$F_{prof}$ ( $N cm^{-1}$ )	$Pot_{prof}$ ( $W cm^{-1}$ )
<b>Profundidades</b>		
P1	76992,61 b	64183,22 a
P2	96679,73 a	53543,62 b
<b>Marchas do trator</b>		
A1	85075,68	40228,70 c
A2	88474,34	56709,37 b
B1	86958,48	79652,19 a
CV (%)	8,41	11,31
<b>Média</b>	86836,17	58863,42

$F_{prof}$ : DMS profundidades = 6351,2064; DMS marchas = 9484,3883.  $Pot_{prof}$ : DMS profundidades = 5791,34; DMS marchas = 8648,3282.

Na Tabela 24, verifica-se que os valores, obtidos de força e potência médias em relação à profundidade de trabalho, apresentaram diferenças estatisticamente significativas quando foram avaliadas as profundidades P1 e P2. Enquanto a força média na profundidade P2 apresentou maiores resultados, quando analisada a potência média, observou-se que a mesma foi inferior nesta profundidade, apresentando uma coerência pelo fato da potência ser função direta da força obtida, como também, da velocidade de deslocamento utilizada. Pode-se constatar que a mudança da profundidade de P1 para P2 acarretou um incremento na necessidade de força por centímetro de profundidade trabalhada no solo da ordem de 25,6 %, enquanto que para a mesma situação houve um decréscimo da potência de 21,0 %.

Quando se avaliou a força média em relação à profundidade trabalhada, considerando as marchas utilizadas (Tabela 24), não se constataram diferenças estatisticamente significativas. Por outro lado, o valor de potência, para a mesma situação, mostrou diferenças estatísticas, sendo que a operação na marcha B1 resultou ser 98 % superior àquele verificado na marcha mais baixa (A1).

Nas Tabelas 25 e 26, são apresentados os resultados obtidos para as interações entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho, para as variáveis força e potência médias em relação à profundidade trabalhada pelas hastes subsoladoras. Verifica-se a tendência de necessidade da força, na barra por centímetro de profundidade trabalhada no solo, ser aumentada quando o equipamento foi operado em maiores velocidades e profundidades, nem sempre com diferenças estatisticamente significativas. Quanto à potência (Tabela 26), observa-se situação contrária, ou seja, tendência de diminuição da potência média em relação à profundidade, quando esta é aumentada.

**Tabela 25.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável força média em relação à profundidade de trabalho ( $N\ cm^{-1}$ ).

<b>Força média em relação à profundidade de trabalho (<math>N\ cm^{-1}</math>)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	80716,31 A	89435,06 Ab
<b>A2</b>	72848,93 B	104099,76 Aa
<b>B1</b>	77412,59 B	96504,38 Aab

$F_{prof}$ : DMS do desdobramento marchas x profundidades = 13412,9505; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 11000,6122.

**Tabela 26.** Interação entre os fatores marchas utilizadas e profundidades de trabalho para a variável potência média em relação à profundidade de trabalho ( $W\ cm^{-1}$ ).

<b>Potência média em relação à profundidade de trabalho (<math>W\ cm^{-1}</math>)</b>		
<b>Marchas</b>	<b>Profundidades</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>A1</b>	46421,24 Ab	34036,16 Bc
<b>A2</b>	58092,50Ab	55326,25 Ab
<b>B1</b>	88035,93 Aa	71268,46 Ba

$Pot_{prof}$ : DMS do desdobramento marchas x profundidades = 12230,5830; DMS do desdobramento profundidades x marchas = 10030,8951.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos, com a realização deste experimento, permitiram chegar às seguintes considerações: a) Após a regulagem em condições estáticas, o subsolador manteve as profundidades da subsolagem durante a operação em condições de campo; b) a velocidade de deslocamento não apresentou efeito significativo sobre a área de solo mobilizado; c) a velocidade de deslocamento e a capacidade de campo efetiva foram influenciadas pela profundidade da operação; d) o aumento da velocidade de deslocamento implicou em maiores valores de potência na barra de tração, consumo horário de combustível, potência específica operacional, e potência média em relação à profundidade; e) havendo possibilidade, a utilização de maiores velocidades na operação de subsolagem seria recomendável em termos de balanço energético; f) o aumento da velocidade de deslocamento sempre refletiu em menor consumo operacional de combustível; g) a força média em relação à profundidade trabalhada aumentou com o incremento desta, sendo que a potência em relação à profundidade trabalhada apontou efeito contrário, ou seja, diminuiu; h) velocidades mais altas implicaram em maior potência em relação à profundidade trabalhada no solo ( $Wcm^{-1}$ ).

## 8 CONCLUSÕES

Nas condições em que o experimento foi desenvolvido, a análise dos resultados permitiu chegar às seguintes conclusões:

O aumento da profundidade da operação, de 0,25 para 0,35m implicou em aumento médio do patinamento dos rodados do trator em 321%.

O aumento da velocidade de deslocamento implicou em maiores valores de potência na barra de tração, consumo horário de combustível, potência específica operacional e potência média em relação à profundidade.

O aumento da velocidade de deslocamento sempre refletiu em menor consumo operacional de combustível.

A força média em relação à profundidade trabalhada aumentou com o incremento desta, sendo que a potência em relação à profundidade trabalhada apontou efeito contrário, ou seja, diminuiu.

É importante observar que a operação realizada na menor profundidade ( $P_1=0,25$  m), nas três marchas estudadas, sempre resultou em maiores valores de capacidade de campo efetiva, quando comparadas com a profundidade  $P_2$  (0,35 m). Considerando, que a operação de subsolagem é, normalmente, a mais onerosa financeiramente nos sistemas

mecanizados utilizados na produção agrícola, pode-se ter a dimensão da importância da localização exata da posição da camada compactada no perfil do solo, uma vez que, se os órgãos ativos do equipamento operarem em profundidades maiores que a determinada, os custos financeiros do trabalho serão aumentados consideravelmente.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ADAMS, B. A.; WULFSOHN, D. Variation of the critical-state boundaries of an agricultural soil. **European Journal of Soil Science**, v.48, p.739-748, 1997.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36, p.141-152, 1994.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres**, v. 44, p. 421-431, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. Agricultural machinery management. In: **ASAE standards 1996**: Standards Engineering Practices Data. St. Joseph, 1996. p.326-331. (ASAE D496.2 MAR 94).

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. Agricultural machinery management. In: **ASAE standards 1999**: Standards Engineering Practices Data. St. Joseph, 1999. p.359-366. (ASAE D497.4 JAN98).

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. **Standards**: terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. 40.ed. St. Joseph: ASAE, 1982. p.229-241. (ASAE EP291.1)

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.495-504, 2004.

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestes in Southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.60, p. 67-78, 2001.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. 1. ed. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BELTRAME, L. F. S. Avaliação do desempenho de três subsoladores em Latossolo Vermelho Escuro. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.7, n.1, p.37-52, 1983.

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: **Soil environmental analysis: Physical Methods**. 2.ed. Nova York: Marcel Dekkee, p.377-403, 2001.

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

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.3, p.409-418,1997.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J..F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.849-856, 2003.

BEUTLER, A. N. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 575-580, 2004.

BICUDO, S. J. **Subsolador**: algumas relações entre profundidade de trabalho, largura das sapatas e número de hastes. 1990. 130p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu,1990.

BOLLER, W. Cuidados com o solo. **Revista Cultivar Máquinas**, v.5, p.06-08, set/out. 2001.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**,v.68, p.49-57, 2002.

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

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.



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

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230. 2002.

CASTRO, O. M. **Aspectos de manejo do solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 43-70p.

CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G.; YANAI, K.; LOPES, A. **Técnicas de determinação da patinação das rodas motrizes de tratores agrícolas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 15 p. (Boletim Técnico, 179).

DANIEL, L.A; MARETTI, H. J. Avaliação de camada de solo compactada e análise de crescimento de plantas. In: SILVEIRA, G. M., coord. Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola, 4., Jundiaí, 1990. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1990. p.22-33.

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

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p. 201-214, 2004.

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

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Ciência do solo. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135p. Tese (Livre Docência) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p.21-35, 1998.

GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. H.; TOMIMORI, S. M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 468p.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H. Avaliação da condição do solo após a operação de preparo. In: **CICLO DE ESTUDOS SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA**, 4, 1989, Jundiaí. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1990. p.12-21.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H.; FURLANI JÚNIOR, J. A. Análise comparativa de consumo de combustível e da capacidade de campo de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 15., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, p.1-9. 1986.

GAMERO, C. A.; LANÇAS, K. P. Ensaio e certificação das máquinas de mobilização periódica do solo. In: MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**. Piracicaba: FEALQ, p.463-514, 1996.

GARNER, T. H.; REYNOLDS, W. R.; MUSEN, H. L.; MILES, G. E.; DAVIS, J. W.; WOLF, D.; PEIPER, U. M. Energy requirement for subsoiling Coastal Plain Soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.2, p.343-349. 1987.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press (Advances in Soil Science), p.167-179, 1998.

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

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERT, C. van. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p.45-69, 1994.

JENANE, C.; BASHFORD, L. L.; MONROE, G. Reduction of fuel consumption through improved tractive performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**. USA, v.64, p.131-138, 1996.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.395-398, 1995.

LANÇAS, K. P. **Subsolador**: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e velocidade de deslocamento. Botucatu, 1987. 112p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1987.

LANÇAS, K. P. **Subsolador**: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes. 1988. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1988.

LANÇAS, K.P.; BENEZ, S.H. Avaliação dos resultados operacionais obtidos para três formas geométricas de hastes subsoladoras. **Energia na Agricultura**, v.4, n.1, p.27-34, 1989.

LANÇAS, K. P.; SANTOS FILHO, A. G.; UPADHYAYA, S. K.; RÍPOLI, T. C. Estimativa da compactação do solo através do índice de cone para três sistemas de condução da cultura do milho num projeto de agricultura sustentada de longo prazo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25., 1996, Bauru. **Anais...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. 1 CD-ROM.

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S. K. Pneus radiais para tratores: Guia para seleção correta da pressão de inflação. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.12, n.1, p.33-36, 1997.

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

LINS, R.G. **Considerações sobre emprego de cultivo mínimo no preparo periódico do solo na cultura canavieira em Pernambuco**. Recife, 1984. 113p. (Tese – Concurso Professor Titular) Universidade Federal de Pernambuco, 1984.

MacDONAGH, P. M.; BALBUENA, R. H.; ARAGON, A.; CLAVERIE, J. A.; TERMINIELLO, A. M. A compactação do solo em relação à oportunidade de arraste de madeira com tratores agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. p.335.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, p. 52-55, 1987.

MASLE, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of soil strength on the relation of wateruse- efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. **Plant Physiology**, v.86, p.32-38, 1988.

MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A. R.; ALSON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant Soil**, v.135, p.31-41, 1991.

MAZIERO, J. V. G.; MIALHE, L. G.; CORREA, I. M.; YANAI, K.; MENEZES, J. F. Efeito da patinação da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.191-197, 1997.

McAFEE, M.; LINDSTROM, J.; JOHANSSON, W. Effects of pre-sowing compaction on soil physical properties, soil atmosphere and growth of oats on a clay soil. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v.40, n.4, p.707-17, 1989.

McKYES, E. **Soil cutting and tillage: developments in agricultural engineering**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1985. 217p.

McKYES, E.; DESIR, F. L. Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.4, n.5, p.459-470, 1984.

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

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MIALHE, L.G. **Gerência de sistema tratorizado vs operação otimizada de tratores**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1991. 30 p.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz - FEALQ, 1996. 722p.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, v.38, p.42-43, 1985.

MUNIZ, A. C. **An ultisol-oxisol transition in São Paulo State, Brazil**. 1981. 300 p. Tesis (PhD) - North Caroline State University, Raleigh, 1981.

NICHOLS, M. L.; REED, I. F.; REAVES, C. A. Soil reaction to subsoiling equipment. **Agricultural Engineering**, v.39, p.336-339, 1958.

OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, K. R. Effect of subsoiling a compacted clay loam soil on growth, yield, and yield components of wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 882-886, 1987.

PEDROTTI, A.; CRESTANA, S.; PAULETTO, E. A. Densidade de um planossolo pelo método da tomografia computadorizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.3, p.79- 81.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.521-529. 2001.

RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; CHASSÊ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Bedfordshire, v.22, p.79-83, 1977.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. Compactação: uma preocupação pertinente. **A Granja**, Porto Alegre, v.646, p.55-57, 2002.

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

REICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, v.26, p. 321-344, 2005.

RÍPOLI, T. C.; MIALHE, L. G.; NAKAMURA, R. T. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Centro Acadêmico Luiz de Queiroz, Departamento Editorial, 1985. 34p.

ROSA JÚNIOR, E. J. **Efeito de sistemas de manejo da cultura do milho (*Zea mays* L.) em um Latossolo Roxo na região de Dourados, MS**. 2000. 112p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2000.

SAHU, R. K.; RAHEMAN, H. An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, v. 90, 145-155, 2006.

SALVADOR, N. **Consumo de energia na operação de subsolagem realizada antes e depois de sistemas de preparo periódico do solo**. 1992. 188p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1992.

SASAKI, C. M. **Desempenho operacional de um subsolador em função da estrutura, do teor de argila e de água em três latossolos**. 2005. 82p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SASAKI, C. M.; BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M. Configurações básicas de subsoladores florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap.12, p.393-407.

SEGANFREDO, M. L.; ELTZ, F. L. F.; de BRUM, A. C. R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.287-291, 1997.

SILVA, J. G. **Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1992. 180p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1992.

SILVA, J. R.; MESQUITA, C. M.; KURACHI, S. A. H.; TESTA, A. **Avaliação de peças ativas de subsoladores quanto a exigência de tração**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1984. Boletim técnico 94.

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

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

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Bedfordshire, v.23, p.243-258, 1978.

STAFFORD, J. V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Bedfordshire, v.24, p.41-55, 1979.

STAFFORD, J. V.; MATTOS, P. C. de. The effect of forward speed on wheel-induced soil compaction: laboratory simulation and field experiments. **Journal Agricultural Engineering Research**, Bedfordshire, v.26, p.333-347, 1981.

STAPE, J. L.; ANDRADE, S.; GOMES, A. N.; KREJCI, L. C.; RIBEIRO, J. A. Definição de métodos de preparo de solo para silvicultura em solos coesos do litoral norte da Bahia. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap.7, p.259-296.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.207-212, 2002.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 159p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JR., J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, Baltimore, v.96, p153-156, 1963.

TAYLOR, J. C.; BELTRAME, L. F. S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, v.3, p.34-44, 1980.

TIRONI, S. P.; DALMAZO, G. O.; MOURA, R. C. C.; ROSA, A. C.; MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V. Avaliação da profundidade crítica de um subsolador utilizando uma ponteira alada. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2005, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2005. v. 1.

TORMENA, C. **Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciado por preparos, pré-implantação, calagem e tráfego**. 1991, 155p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

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**, Viçosa, v.22, p.573-581. 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja. Londrina: EMBRAPA-CNPSoja, 1999. 58p. Circular Técnica, n. 23.

TREIN, C. R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L. F. C. Tráfego controlado. **Revista Cultivar Máquinas**, n.41, p.22-25, 2005.

VARQUEZ, L.; MYHRE, D. L.; GALLAHER, R. N.; HANLON, E. A.; PORTIER, K. M. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. **Soil Tillage Research**, v.13, p.35-45, 1989.

WAY, T.R.; BAILEY, A. C.; RAPER, R. L.; BURT, E. C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, p.669-674, 1995.

WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C.; BURT, E. C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.50, p.127-135, 1999.

WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R.; ROSTEK, J.; WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.117-128. 2000.

YSHIMINE, P. **Avaliação de algumas forças que atuam em um subsolador utilizado no preparo de solo agrícola**. 1993. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1993.