

ESTIMATIVA DAS CONDIÇÕES DE TRÁFEGO
EM SOLO AGRÍCOLA

ANTONIO ZATTONI AFFÉRI
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz", da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Mestre em Agronomia,
Área de Concentração: Máquinas Agrícolas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
JULHO - 1992

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Afférri, Antonio Zattoni
A256e Estimativa das condições de tráfego em solo agrícola.
Piracicaba, 1992.
118p. ilustr.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Balanço hídrico - Modelo matemático 2. Máquina agrícola - Solo - Mobilização 3. Máquina Agrícola - Tráfego - Estimativa 4. Solo - Tráfego - Estimativa I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CDD 631.3

Dedico esta dissertação ao meu pai,
Dr. Benedito Geraldo Afféri,
que sempre me dizia :
"INSISTA, PERSISTA
E NÃO DESISTA".

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade.

Ao Professor Dr. Luiz Geraldo Mialhe pelas suas valiosas orientações e sugestões durante a realização desta dissertação.

Aos colegas e docentes do curso de Pós Graduação em Máquinas Agrícolas, pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos Engenheiros Osmar Figueiredo Filho, Bernardo Yasuhiro Ide, Ângelo Domingos Banchi, e aos Professores Dr. Klaus Reichardt e Dr. Nilson Villa Nova, pelas sugestões dadas durante a concepção inicial do presente trabalho.

À FAPESP, pela concessão de uma bolsa de estudos e pelos seus pareceres e sugestões referentes aos relatórios apresentados.

À Usina São Luiz - DEDINI S/A Agro Indústria, por fornecer seus arquivos de controle do planejamento de operações agrícolas e operadores, proporcionando a validação do modelo e aos seus funcionários: Celso Marin, Ésio e seu gerente Eng^o João Martins, pela intensa dedicação com que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho.

À Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais, em nome de seu funcionário Eng^o José Lúcio Ferreira Pimenta, ao CEPTA (IBAMA/MA), em nome de seu funcionário Eng^o Antonio Fernando Bruni Lucas e à Academia de Força Aérea de Pirassununga pelo fornecimento de índices pluviométricos da região estudada.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural e a todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho,

Agradeço.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiv
SUMMARY	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Tráfego em solo agrícola – teoria da tração	3
2.2. Eficiência de tração – modelos para simulação	5
2.3. Critérios de tráfego em solo agrícola	7
2.4. Simulação e modelagem	14
2.5. Validação de modelos	24
3. MATERIAL E MÉTODO	27
3.1. Material	27
3.1.1. Dados edáficos	27
3.1.2. Dados agrometeorológicos	29
3.1.3. Dados das operações tratorizadas	30
3.2. Método	31
3.2.1. Hipótese de trabalho	31
3.2.2. Teoria do método	32
3.2.2.1. Método para concepção do modelo para estimativa da capacidade de água disponível do solo	33

3.2.2.2.	Método para concepção do modelo não determinístico para a estimativa das condições de tráfego .	42
3.2.2.3.	Método para validação do modelo	44
4.	RESULTADOS DA HIPÓTESE PRELIMINAR	46
4.1.	Estimativas de horas paradas	46
4.2.	Discussão	50
4.3.	Conclusões	52
5.	MÉTODO DEFINITIVO	53
5.1.	Método para concepção do modelo determinístico para a estimativa das condições de tráfego com máquinas agrícolas	54
5.2.	Método para determinação dos critérios empregados no modelo determinístico	55
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1.	Critérios relativos a umidade do solo	60
6.2.	Critérios relativos a precipitação	63
6.3.	Ajuste dos critérios determinísticos	63
6.4.	Estimativas das condições de tráfego	72
6.4.1.	Carregamento de cana	73
6.4.2.	Operações pesadas	76
7.	CONCLUSÕES	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICES	89

LISTA DE FIGURAS

Figuras nº	Páginas
1 - Variação da umidade do solo ao longo do ano de 1990. Profundidade da camada OL = 300 mm. Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.	41
2 - Ilustração da forma de concordância entre as variáveis consideradas para a estimativa feita através do modelo não determinístico.	42
3 - Estimativa decencial das horas paradas durante a operação de carregamento de cana por motivo climático em função da média decencial da capacidade de água disponível porcentual do solo.	46
4 - Estimativa decencial das horas paradas durante as operações de mobilização do solo por motivos climáticos em função da média decencial da capacidade de água disponível porcentual do solo.	49
5 - Esquema do modelo determinístico para estimativa das condições de tráfego em solo agrícola.	53

Figuras nº	Páginas
6 - Superfície de resposta da tensão de cisalhamento do solo em relação a umidade e a pressão normal. Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.	60
7 - Variação do índice de mobilidade em relação a umidade do solo da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.	61
8 - Estimativa da eficiência de tração através do modelo de WISMER & LUTH (1972), considerando quatro níveis de patinhagem (s).	62
9 - Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas na operação de carregamento de cana, durante o período de set/88 a jun/91 na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.	76
10 - Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas em operações de mobilização do solo no período de set/88 a jun/ 91, Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro nº	Página
1 - Tipos de solo da área explorada pela Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria), safra 90/91.	28

LISTA DE TABELAS

Tabelas nº	Páginas
1 - Tipificação dos graus de umidade (%) do solo, representativo da área cultivada em estudo (*), relativos a parâmetros do sistema solo-planta-atmosfera.	29
2 - Caracterização dos estágios da cultura de cana-de-açúcar na Usina São Luiz ao longo dos meses do ano, seus respectivos coeficientes de cultura (Kc) e fatores de correção mensal (FC).	38
3 - Fator de correção de dias úmidos (Kw).	40
4 - Selecionamento dos critérios determinísticos para tráfego de carregadoras a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos decendiais.	65
5 - Selecionamento dos critérios determinísticos para tráfego de carregadoras a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos trintidiais.	66

- 6 - Teste do qui-quadrado para os índices de correlação das estimativas das condições de tráfego de carregadoras. 68
- 7 - Selecionamento dos critérios determinísticos de mobilização do solo a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos decendiais. 69
- 8 - Selecionamento dos critérios determinísticos de mobilização do solo a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos trintidiais. 70
- 9 - Teste do qui-quadrado para índices de correlação das estimativas das condições de mobilização em solo agrícola. 72
- 10 - Horas úteis para carregamento de cana por decêndio : estimadas x observadas. 73
- 11 - Horas úteis para carregamento de cana por trintídio: estimadas x observadas. 75
- 12 - Horas úteis para mobilização do solo por decêndio : estimadas x observadas. 77
- 13 - Horas úteis para mobilização do solo por trintídio: estimadas x observadas. 79
- 14 - Estimativa decendial das horas paradas durante a operação de carregamento de cana por motivo climático em função da média decendial da capacidade de água disponível porcentual do solo e a estimativa do erro global (RMS). 91
- 15 - Estimativa decendial das horas paradas durante as operação de mobilização do solo por motivo climático em função da média decendial da capacidade de água disponível porcentual do solo e a estimativa do erro global (RMS). 94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	= área de contato plana, m ² ;
AC	= volume de água proveniente da ascensão capilar, mm;
adim.	= adimensional;
ADS _(i-1)	= água disponível no solo no dia i -1, mm;
ADS _{cc}	= água disponível no solo na capacidade de campo, mm;
b	= largura do pneu, m;
C	= tensão devida a coesão do solo, kPa;
CAD	= capacidade de água disponível do solo, mm;
CAD%	= capacidade de água disponível do solo, %;
CAD _n %	= capacidade de água disponível do solo no dia n, %;
CN	= índice de mobilidade, adim.;
d	= diâmetro do pneu, m;
D	= volume de água relativo a perdas por drenagem, mm;
ET	= evapotranspiração, mm;
ET _{r_d}	= evapotranspiração real diária, mm;
ET _p	= evapotranspiração potencial mensal, mm;
ET _{p_d}	= evapotranspiração potencial diária, mm;
FC	= fator de correção mensal, adim.;
h _{est}	= horas estimadas pelo modelo, horas;
H _{máx}	= empuxo máximo, N;
h _{obs}	= horas observadas, horas;
HPD	= horas paradas por decêndio, horas;
HPD _{cc}	= horas paradas durante as operações de carregamento de cana por decêndio, horas;
HPD _{est}	= horas paradas estimadas por decêndio, horas;
HPD _{ms}	= horas paradas durante as operações de mobilização do solo por decêndio, horas;
HPD _{obs}	= horas paradas observadas por decêndio, horas;

HP_{est}	= horas paradas estimadas pelo modelo, horas;
HP_{obs}	= horas paradas observadas, horas;
I	= volume de água proveniente de irrigação, mm;
I_c	= índice de cone médio na camada de 0 a 15 cm, kPa;
I_h	= índice de energia anual, °C;
i	= dia de ocorrência de um determinado evento;
$i + 1$	= dia posterior a i ;
$i - 1$	= dia anterior a i ;
i_n	= índice de energia do mês n ;
K_c	= coeficiente de cultura, adim.;
K_d	= fator de correção de secagem do solo a uma determinada profundidade, adim.;
K_g	= fator de ajuste quanto à progressividade de ET, adim.;
K_l	= fator de correção do comprimento do dia, adim.;
K_s	= fator de correção para cobertura vegetal na superfície, adim.;
K_u	= coeficiente de umidade do solo, adim.;
K_w	= fator de correção de dias úmidos, adim.;
L	= cota referente a uma determinada profundidade do solo, m;
M_c	= umidade do solo à máxima tensão de cisalhamento, %;
M_d	= umidade do solo que evite compactação, %;
M_f	= umidade do solo desejável na atuação do implemento, %;
M_s	= umidade do solo no limite estabelecido de patinagem, %;
M_{wd}	= umidade critério para condições de tráfego agrícola, %;
n	= número de dados considerados (meses, dias, etc);
O	= cota referente a superfície do solo, m;
OL	= camada de solo delimitada pelas cotas O e L , m;
P	= volume de água proveniente da precipitação, mm;
r	= índice de correlação, adim.;
r_n	= índice de correlação relativo a n , adim.;
RFD	= volume de água proveniente da precipitação efetiva simulada, mm;

- RMS = raiz do quadrado médio da diferença em horas paradas, horas;
- RMS% = raiz do quadrado médio da diferença porcentual das horas paradas, %;
- RO = volume de água proveniente do escoamento superficial ("run off"), mm;
- s = patinhagem, adim.;
- $SMD_{(i+1)}$ = umidade retirada do solo até o final do dia $i + 1$, mm;
- $SMD_{(i)}$ = umidade retirada do solo até o final do dia i , mm;
- Ta_d = temperatura média diária do ar, °C;
- Ta_n = temperatura média mensal do ar do mês n , °C;
- U_{cc} = umidade contida no solo à capacidade de campo, mm;
- U_n = termo relativo a r_n no cálculo do qui-quadrado, adim.;
- $U_{(i)}$ = umidade contida no solo no dia i , mm;
- $U_{(i-1)}$ = umidade do solo no dia $i-1$, mm;
- Xc^2 = qui-quadrado calculado, adim.;
- Xt^2 = qui-quadrado em tabela, adim.;
- W = peso total, N;
- β = fator de evaporação anual, °C;
- Φ = ângulo de atrito interno do solo, grau;
- η_t = eficiência tratória, adim.;
- σ = pressão normal, kPa;
- τ = tensão de cisalhamento, kPa;
- τ_0 = tensão de cisalhamento sob σ nula, kPa;
- $\tau_{máx}$ = tensão máxima de cisalhamento, kPa.

ESTIMATIVA DAS CONDIÇÕES DE TRÁFEGO
EM SOLO AGRÍCOLA

Autor: ANTONIO ZATTONI AFFÉRI

Orientador: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

RESUMO

O presente trabalho propõe, a princípio, um modelo não determinístico para estimativa dos tempos disponíveis para tráfego de máquinas agrícolas, considerando duas condições : o tráfego simplesmente, referindo-se a operações onde a máquina somente interage com o solo através de seu rodado, e a mobilização do solo, onde a máquina está tracionando um equipamento agrícola.

A partir do equacionamento linear entre os dados da capacidade de água disponível do solo estimados por um balanço hídrico e as horas paradas, foram estimados as horas paradas relativas as duas condições de tráfego, agrupadas em períodos regulares. Concluiu-se, a partir destes resultados preliminares, que a estimativa das condições de tráfego em solo agrícola é função não só da umidade do solo, como também da ocorrência e da intensidade de precipitação, devendo o modelo adotar estas constantes como critérios determinísticos, alterando sua proposta inicial de modelo não determinístico, sem critérios rígidos e inflexíveis.

Portanto, para se estimar as condições de tráfego de máquinas agrícolas em situações reais de campo, adotou-se um modelo determinístico dotado de um balanço hídrico e de um registro de precipitações diárias.

A determinação dos critérios determinísticos foram feitas

a partir da adoção de uma faixa de valores como referência para a simulação, adotando a combinação que melhor precisão conferiram às estimativas geradas pelo modelo, comparadas com os registros das atividades motomecanizadas agrícolas, observando duas frentes de serviço: carregamento de cana (tráfego simplesmente de tratores de pneu) e operações pesadas (mobilização do solo utilizando tratores de esteiras com implementos).

Adotou-se como critérios determinísticos neste trabalho, relativos às estimativas das condições da operação de carregamento de cana, o nível de 6,8 mm de precipitação e 100,0% da capacidade de água disponível do solo, com uma estimativa de erro global de 7,01% ou 12,73 horas e $r=0,879$ ($F=122,73^{**}$) para períodos decendiais, e, para períodos trintidiais, a estimativa do erro ficou em 4,72% ou 27,77 horas e $r=0,863$ ($F=29,13^{**}$). Em relação às estimativas das operações pesadas, o nível de 9,1 mm de precipitação e 88,0% da capacidade de água disponível do solo, com uma estimativa de erro global de 8,38% ou 16,53 horas e $r=0,835$ ($F=108,23^{**}$) para períodos decendiais, e, para períodos trintidiais, a estimativa do erro ficou em 3,92% ou 22,36 horas e $r=0,964$ ($F=198,70^{**}$).

É possível se utilizar o modelo determinístico proposto em qualquer localidade, necessitando apenas dos dados edáficos e climáticos locais, adotando-se os critérios a partir de uma análise de ordem gerencial, no que diz respeito ao nível mínimo de precipitação, e, quanto ao critério relativo a umidade do solo, deve-se adotar um valor igual a capacidade de campo deste solo, considerando estimativas de tráfego simplesmente, ou igual a ordem de grandeza da umidade que proporcionar ao solo a tensão máxima de cisalhamento, em casos de estimativas das condições de mobilização para este local.

ESTIMATE OF WORKABILITY AND TRAFFICABILITY CONDITIONS IN
AGRICULTURAL SOIL

Author: ANTONIO ZATTONI AFFÉRI

Adviser: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

SUMMARY

This work propose, in principle, a not determinist model for predicting agricultural machine workability and trafficability conditions, with the procedure based upon a linear equation to correlate the maximum soil moisture retention and the occurrence of not workability or trafficability conditions, over a regular periods of days.

The results generated by this procedure showed that only the soil moisture content isn't enable to predict the number of soil workdays, it is necessary to be also considered the precipitation data.

Then, a new procedure had been adopted to predict those conditions : it was developed a deterministic model, that uses two soil workday criterions : the soil moisture contents and the precipitation data.

The values of these criterions was stipulated by simulation, choosing the values that showed the best agreement on comparison between observed and predicted workability and trafficability conditions.

The observed data used to compare the predict workability conditions were daily workable hours of subsoil and tillage by heavy tractors (tracks), and to compare trafficability conditions, these data were daily workable hours of loading sugar cane by tire tractors, in the sugar cane harvest.

The values of soil workday criteria were: 1) to predict the trafficability conditions in loading sugar cane operations, the precipitation level was 6.8 mm and 100.0% of the soil moisture retention for soil moisture criterion, it was the soil moisture contents at field capacity, with $RMS = 7.01\%$ or $RMS = 12.73$ hours and $r = 0.879$ ($F = 122.73$ **), for ten-days periods, and for thirty-days periods, $RMS = 4.72\%$ or $RMS = 27.77$ hours and $r = 0.863$ ($F = 29.13$ **); 2) to predict workability conditions, for subsoil or tillage, the precipitation level was 9.1 mm and 88.0% of the soil moisture retention for soil moisture criterion, with $RMS = 8.38\%$ or $RMS = 16.53$ hours and $r = 0.835$ ($F = 108.23$ **), for ten-days periods, and for thirty-days periods, $RMS = 3.92\%$ or $RMS = 22.36$ hours and $r = 0.964$ ($F = 198.70$ **).

The deterministic model can be used for anywhere to predict soil workable days, for this purpose the location climatic and soil data are required, the soil workable criteria can be determined for this location by a farm management decision for the precipitation level and for the soil moisture content, the field capacity of the soil can be used to predict trafficability conditions and the soil moisture content up to a maximum soil shear strength to predict workability.

1. INTRODUÇÃO

A motomecanização teve seu início com a invenção das primeiras máquinas à vapor, no século passado. Desde então, ela assume, no cenário agrícola, a importante missão de aumentar a capacidade humana no cultivo das áreas e agilização na execução dos mais variados serviços.

No Brasil atual, a mecanização agrícola se faz presente tanto em propriedades familiares como em grandes empresas, tidas como avançadas tecnologicamente, proporcionando ao uso da mão de obra melhores resultados em termos de produtividade e lucratividade.

Para se conseguir os melhores resultados no uso de máquinas agrícolas é fundamental uma racional seleção dos espécimes, dentro das opções que o mercado oferece. Para esta seleção há a necessidade de antes se fazer um dimensionamento das operações agrícolas, calculado a partir de um cronograma de trabalho. A elaboração deste cronograma inicia-se com a estimativa dos dias operacionalmente úteis, ao longo do período programado para execução das operações agrícolas exigidas pelo sistema de produção. A disponibilidade ou não de um certo dia ser operacionalmente útil é determinado, segundo WITNEY (1988) e ASSIS *et alii* (1989), por uma faixa de umidade do solo que possibilita uma atuação plena e satisfatória dos órgãos ativos da maquinaria agrícola.

A execução mecanizada de operações agrícolas se faz através do tráfego de conjuntos trator - máquina e implemento sobre áreas cultivadas. Dependendo do tipo de máquina e implemento que é acoplado ao trator, esse trânsito sobre solos agrícolas pode se restringir a apenas à condição de ação de rodado sobre o solo ou vir acompanhado da ação de um órgão ativo de mobilização do solo.

A avaliação das condições favoráveis/restritivas à esse

tráfego, ou seja, a estimativa das condições de tráfego em solos agrícolas tem sido objeto de inúmeros trabalhos de pesquisa. Nestes são propostos modelos determinísticos para estimativa das condições de tráfego sobre o solo, aplicando critérios para distinção destas condições, fundamentados tanto em índices pluviométricos como em níveis característicos de teor de umidade do solo.

O estado do solo que responde deterministicamente "sim" ou "não", à questão se um dado conjunto trator - máquina e implemento irá trafegar num certo momento sobre determinado solo, é definido como critério operacional de trabalho em solos agrícolas, segundo vários autores (ELLIOTT *et alii*, 1977; BABEIR *et alii*, 1986; WITNEY, 1988 e ASSIS *et alii*, 1989).

Em condições normais de campo, pode-se observar freqüentemente que o solo proporciona diferentes condições de tráfego ao longo de um dia, isto é, basta considerarmos um exemplo, muito freqüente durante o verão, que seria a ocorrência de uma precipitação intensa e de curta duração no período vespertino deste dia, onde o solo proporcionou perfeitas condições ao tráfego durante todo o período da manhã, sendo que à tarde, em função da mudança de estado pela ocorrência da precipitação, este solo não mais proporcionaria condições adequadas ao tráfego. Por serem extremamente dependes de critérios, os modelos determinísticos são muito rígidos, não sendo possível estimar condições de tráfego parcial ao longo de um dia, considerando que os dados e registros utilizados para estimativa são diários (24 horas).

A presente dissertação propõe como hipótese de trabalho, a princípio, um modelo não determinístico, mais flexível nas estimativas dos tempos disponíveis para tráfego e independente de critérios pré fixados. Este modelo estima uma porcentagem do tempo total existente em que há condições de tráfego de máquinas.

Esta estimativa considera duas condições de tráfego da máquina sobre o solo, a primeira versa sobre operações onde o trator - máquina e implemento somente interage com o solo através do rodado do trator, e a outra trata das operações de mobilização do solo, onde a máquina e implemento também está interagindo com o solo através de seus órgãos ativos, além, é claro, do rodado do trator.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se aqui as bibliografias encontradas, que serviram de base para concepção do modelo proposto. A bibliografia consultada obedece, primeiramente, a uma ordem cronológica e, em seguida, foi agrupada de acordo com a sua abordagem principal, dentro dos seguintes tópicos:

- tráfego em solo agrícola - teoria da tração;
- eficiência tratória - modelos para simulação;
- critérios de tráfego em solo agrícola;
- simulação e modelagem;
- validação de modelos.

2.1. Tráfego em solo agrícola - teoria da tração

O tráfego de máquinas é aqui caracterizado como o trânsito de tratores sobre solo cultivado, tracionando ou não uma máquina ou implemento. Este trânsito resulta, basicamente, do fenômeno da tração que ocorre na região de contato do rodado motriz com o solo, envolvendo ação de forças originadas no rodado e da reação do solo, que determinam as condições de propulsão dos tratores.

Diferentemente da tração descrita por modelos que versam sobre rodados que atuam sobre superfície rígida, como asfalto ou concreto, em que as forças de atrito explicam o fenômeno, o modelo de tração sobre solos agrícolas é muito mais complexo, em função das características físicas e mecânicas do solo e da interação entre duas superfícies deformáveis, o solo e o pneu.

De acordo com GILL & VANDEN BERG (1967), a tensão de cisalhamento não se acha na interface de contato solo - rodado, e sim na superfície de ruptura (solo - solo). Portanto, o cisalhamento foi interpretado pelos autores como uma condição de ruptura, ou seja, a tensão atuante na ruptura incipiente, descrevendo desta forma a condição sob a qual ocorre o cisalhamento.

Os autores admitiram que as condições sob as quais ocorre a ruptura do solo (condição de ocorrência de máxima tensão de cisalhamento) podem ser descritas, confiavelmente, pela equação de Coulomb :

$$\tau_{m\acute{a}x} = C + \sigma \cdot \text{tg}\Phi \quad (1)$$

onde:

- $\tau_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima de cisalhamento, kPa;
- C = tensão devida a coesão do solo, kPa;
- σ = pressão normal, kPa;
- Φ = ângulo de atrito interno do solo, grau.

Segundo MIALHE (1983), a relação entre τ e σ tem um significado semelhante aquele do conceito de Coulomb para o atrito de deslizamento, de maneira que o ângulo Φ é freqüentemente visualizado como um ângulo de atrito interno do material. A constante τ_0 , usualmente representada por C, tem sido denominada de coesão e representa a tensão de cisalhamento para carga normal nula ($\sigma = 0$). Um aspecto polêmico é o fato de C e Φ estarem tão firmemente arraigadas, que são freqüentemente referidos como verdadeiras propriedades físicas dos solos. Na realidade, são apenas parâmetros de uma dada equação de resistência. A existência deles, logicamente, poderá ser explicada apenas por uma interpretação da equação e não pela própria natureza física do solo.

Para formulação de uma teoria simplificada sobre o fenômeno da tração por rodados, REECE (1967) recomenda partir-se do empuxo máximo que o rodado dos tratores tem condições de exercer, quando apresenta-se com uma determinada área de contato e

desenvolvendo uma patinagem.

Diante desta teoria é que a ocorrência de patinagem de rodados quando trafegam sobre solo tipicamente agrícola é uma condição obrigatória. Conclue REECE (1967) que para uma área de contato plana, paralela à superfície do solo, o empuxo máximo equivale ao produto da área de contato pela máxima tensão de cisalhamento ($\tau_{m\acute{a}x}$) que o solo sob ela é capaz de suportar:

$$H_{m\acute{a}x} = A \cdot \tau_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

onde:

- $H_{m\acute{a}x}$ = empuxo máximo, N;
- $\tau_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima de cisalhamento, kPa;
- A = área de contato plana, m².

Partindo-se desta teoria, em que o empuxo que um rodado pode exercer é diretamente proporcional à tensão máxima de cisalhamento do solo, FLORES *et alii* (1990) determinou as tensões de cisalhamento necessárias para proporcionar tração sob um determinado solo, variando sua umidade e a patinagem diante dos esforços tratórios impostos pelos rodados durante os ensaios.

Com o uso de um "sheargraph" de Cohron, os autores determinaram as tensões máximas de cisalhamento, sob diferentes níveis de pressões normais e sob diferentes níveis de umidade do solo, propondo que a umidade referente às máximas tensões de cisalhamento, encontradas sob diferentes pressões normais, seja um critério de determinação das condições de tráfego sobre o solo.

2.2. Eficiência de tração – modelos para simulação

A eficiência de tração é definida como a razão entre a potência de saída (barra de tração) e a potência de entrada (eixo do rodado):

$$\eta_t = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}} \quad (3)$$

onde: η_t = eficiência tratória, adim.;

CARDOSO JR. (1991) ao comparar três modelos empíricos de simulação de desempenho de tratores propostos, respectivamente, por WISMER & LUTH (1972), GEE - CLOUGH *et alii* (1977) e BRIXIUS (1987), concluiu que esses produzem valores apurados suficientes (erro menor que 13%), sendo todos baseados no índice de mobilidade.

CARDOSO JR. (1991) aponta o modelo proposto por WISMER & LUTH (1972) como sendo o que produz os resultados mais confiáveis, apesar de ser o de menor generalidade. A seguir apresenta-se o método destes autores para cálculo do índice de mobilidade :

$$CN = \frac{Ic \cdot b \cdot d}{W} \quad (4)$$

onde: CN = índice de mobilidade, adim.;

Ic = índice de cone médio na camada de 0 a 15 cm, kPa;

b = largura do pneu, em m;

d = diâmetro do pneu, em m.

W = peso total, N;

Para cálculo da eficiência de tração, em função do índice de mobilidade e da patinagem, tem-se :

$$\eta_t = \left\{ 1 - \left[\frac{\frac{1,2}{CN} + 0,04}{0,75 \cdot (1 - e^{-0,3 \cdot CN \cdot s})} \right] \right\} \cdot (1 - s) \quad (5)$$

onde: s = patinhagem

As principais aplicações deste modelo proposto pelos autores seriam: simulação do desempenho do trator, durante o projeto do mesmo e estimativa da capacidade de desenvolver tração, sob diferentes situações de solo.

Segundo WITNEY (1988), o valor médio para a patinhagem sob condições de eficiência máxima de tração é de 10%, sendo que esta porcentagem varia muito pouco em relação ao índice de mobilidade, sob condições normais de solo agrícola.

2.3. Critérios de tráfego em solo agrícola

O critério de tráfego em solo agrícola é função de um estado do solo. Entende-se por este estado, uma faixa de umidade do solo que possibilita aos órgãos ativos das máquinas agrícolas atuarem segundo os seus atributos (WITNEY,1988 e ASSIS *et alii*,1989).

ELLIOTT *et alii* (1977) em seu modelo de simulação para estimar os dias disponíveis para cultivo em solos barro síltico e barro arenoso fino em Illinois (E.U.A.), o critério adotado foi de 80% e 90%, respectivamente, da água disponível na camada superior do perfil. Também estabeleceram como critério que não seria possível cultivar o solo em um dia cuja precipitação fosse maior que 5,1 mm, sem desprezar a quantidade de água já existente na camada subsuperficial do solo.

SEDIYAMA *et alii* (1979) consideraram que os dias que se pode operar com máquinas agrícolas, na produção de soja em três áreas do Estado de Minas Gerais (Pirapora, Viçosa e Lavras), serão aqueles em que o teor de água disponível no solo é igual ou menor que 90% da capacidade de campo, nos primeiros 15 cm de profundidade.

Além deste critério, o modelo apresentado por SEDIYAMA *et alii* (1979) considerava simultaneamente que caso ocorra um dia com 5,0 mm ou mais de chuva ou com uma precipitação de 10,0 mm ou mais no dia anterior ou ainda, com uma precipitação superior a 0,2 mm no dia e com 2,0 mm ou mais no dia anterior, era registrado como um dia inapto para

o trabalho com máquinas. Este último critério foi adotado porque dois dias consecutivos com chuvas caracterizam o persistência das condições de tempo. Isto indica que a precipitação poderia interferir nas operações normais com máquinas, independentemente da umidade nos 15 cm iniciais do solo.

SEDIYAMA *et alii* (1979) não desenvolveram estudos tendo em vista a validação do modelo proposto. Os mesmos critérios foram utilizados para todas as áreas, sem discriminação quanto a tipo de solo e operações agrícolas envolvidas durante o ciclo da cultura em estudo. O último critério adotado pode ser válido para operações que são influenciadas pela umidade relativa do ar, presente naquelas condições da persistência de tempo chuvoso, como pulverizações, fertilizações e colheita, não obstante, estas podem ser perfeitamente realizadas, desde que o solo ofereça condições de tráfego ou permita trabalhos de mobilização, como aração e cultivo.

NATH & JOHNSON (1980) em Manhattan, Kansas (E.U.A.), relatam que a umidade do solo é muito utilizada como critério para caracterização do início da época de colheita da cultura de sorgo granífero, assim que haja condições de tráfego. A partir deste fato, os autores determinaram que em seu modelo, a umidade acima de 85% da capacidade de campo nos primeiros 15 cm do solo, tornava-o sem condições de tráfego.

A determinação dos dias úteis para aração foi realizada por WITNEY *et alii* (1982), em cada quarto do ano para dois solos, um de textura argila arenosa com drenagem imperfeita e dotado de subsuperfície muito pouco permeável e outro de textura do tipo barro com uma subsuperfície argila arenosa pouco permeável, em Langhill, Escócia. Utilizaram três critérios de trabalho em solos : 1,05, 1,10 e 1,15 vezes o grau de umidade do solo contida à capacidade de campo. Estes percentuais de umidade sobre a capacidade de campo do solo foram confirmados por WITNEY¹.

¹ WITNEY, B. D. (Scottish Center of Agricultural Engineering, Bush Estate, Penicuik, Midlothian, Scotland) Comunicação pessoal, 1990.

WÖSTEN & BOUMA (1985) utilizaram como critério para o seu modelo de simulação de determinação da disponibilidade de água e das condições de tráfego em solos gramados muito argilosos na Holanda, a pressão matricial do solo de -100 cm. Os autores citam que em outros trabalhos do gênero foram considerados valores menores de pressão para critérios de trabalhos de mobilização em solos, portanto, a maiores índices de umidade.

Esta pressão matricial de -100 cm é aquela em que o solo se encontra à sua capacidade de campo, equivalendo à faixa de 0,1 a 0,2 bar. WÖSTEN & BOUMA (1985) constataram ainda que até este nível de pressão matricial, o solo em estudo proporcionava condições de tráfego sem causar problemas de compactação.

BABEIR *et alii* (1986) expressaram o critério de tráfego em solos agrícolas no centro do estado de Iowa (E.U.A.), como sendo 99% da capacidade de campo do solo a umidade máxima que o este deveria de ter para ser considerado como apto.

Além disso, se ocorrer um dia chuvoso, precedido por um dia apto e a precipitação não for maior que 5,0 mm, este dia será considerado também apto e se para três ou mais dias chuvosos ininterruptos, a precipitação do dia em análise superar 1,3 mm, o dia era tido como não apto, independentemente da umidade do solo, caso for menor que a capacidade de campo deste.

Ao caracterizar um dia apto para atividades agrícolas em Bush Estate, Penicuik, Midlothian, Escócia, OSKOU (1986) determinou que primeiramente não deve haver uma precipitação superior a 10 mm num dia, e em segundo lugar, a umidade do solo deve ser menor que o seu limite inferior de plasticidade. Para anos extremamente chuvosos este último critério deve ser incrementado em 2%. Isto implicaria num maior número de dias úteis estimados e em, conseqüentemente, um risco maior de causar danos ao solo e menor eficiência de tração.

VON BARGEN *et alii* (1986) pesquisaram a região central-leste no Estado de Nebraska (E.U.A.) para determinar os tempos disponíveis de trabalho mecanizado agrícola durante a estação da primavera, como ferramenta de suporte no gerenciamento de sistemas de produção agrícola. O critério de trabalho escolhido para ser aplicado em

seu modelo foi obtido verificando-se qual o valor do porcentual de umidade, em relação à capacidade de campo do solo, que fazia com que os dados estimados através da simulação se igualava aos dados reais observados durante o ano de 1985. Estes dados foram observados para três tipos de textura de solo. Estabeleceu-se uma margem de aproximação de $\pm 0,5$ dia entre os dados, subdivididos em períodos quinzenais. As diferenças entre períodos bi, tri e quadrimensais também foram consideradas na determinação dos critérios.

MEHNER *et alii* (1988) realizaram um trabalho de pesquisa multidisciplinar para o Gas Research Institute - Texas (E.U.A.), simulando sistemas de produção de sorgo para sua otimização na obtenção de gás metano. Designaram que um dia não era trafegável quando um índice de precipitação era igual ou maior que um valor limite de 5,1 mm, sendo trafegável portanto, os dias com precipitações menores que este valor.

WITNEY *et alii* (1982) e WITNEY (1988) adotam como critério para cálculo do número de dias úteis diferentes níveis de umidade do solo, ajustando-os às observações realizadas. Para solos de textura barro arenosa e barro argilosa ao leste da Escócia, segundo apenas WITNEY (1988), o cultivo deveria ser executado quando a umidade estivesse próxima dos níveis da capacidade de campo do solo, sendo o mais ideal, e não poderia ser cultivado o solo que estivesse com uma umidade superior ao seu limite de plasticidade.

Referindo-se ao município de Uberaba e outros pertencentes ao Triângulo Mineiro em Minas Gerais, utilizou-se como critério de dia apto o dia em que a umidade do solo for menor ou igual a 90% da disponibilidade total de água nos primeiros 15 cm do solo e um dia com mais de 5,0 mm de precipitação foi considerado como inapto para trabalhos com tratores agrícolas. Além disto, qualquer dia com precipitação superior a 0,2 mm precedida por um dia chuvoso com mais de 2,0 mm, também era considerado como inapto. (ASSIS, 1988 e ASSIS *et alii*, 1989).

HETZ & RIQUELME (1989) estabeleceram critérios determinísticos para dias apropriados para a operação de colheita em Concepción (Chile), baseando-se exclusivamente em aproximações sucessivas de níveis pluviométricos com o objetivo de melhor correlacionar

suas estimativas com os dados reais observados. Os critérios estabelecidos foram : precipitações iguais ou superiores a 1 mm em um dia, ou maior ou igual a 6 mm no dia anterior ou ainda, se a precipitação acumulada nos dias anteriores (continuamente) for superior a 30 mm, este dia era tido como não apropriado para colheita.

Quanto a outras operações agrícolas (aração, semeadura, tráfego para aplicação de insumos e defensivos, etc) os autores adotaram os seguintes critérios para designação das condições de trabalho em um determinado dia: precipitações iguais ou superiores a 2 mm em um dia, ou maior ou igual a 6 mm no dia anterior ou ainda, se a precipitação acumulada nos dias anteriores (continuamente) for superior a 30 mm ou 300 mm, este dia era tido como não apropriado para trabalho, sendo que o último critério somente após 2 dias sem chuvas, para o acumulado em 30 mm e 4 dias, para o acumulado em 300 mm, é que o solo proporcionava condições apropriadas de trabalho.

MÜLLER *et alii* (1990) analisaram e quantificaram a capacidade de tráfego e de trabalho com máquinas agrícolas em solos aluviais de textura argilosa, incluindo a análise das condições de trabalho para execução de canais e instalação de tubos subterrâneos para drenagem. Os autores consideraram os solos sob diferentes condições de drenagem, e utilizaram dados reais climatológicos e de altura de elevação de lençol freático de oito anos de Oderbruch, Alemanha. Estes solos variavam ainda quanto à sua drenagem interna, classificando-os em três tipos básicos: boa, média e pobre. O critério adotado para tráfego e trabalhos com implementos atuantes no subsolo agrícola, foi elaborado basicamente através das condições de consistência do solo, estimadas à profundidade de 2-10 cm e 10-30 cm, considerando o status dos primeiros 2 cm e a existência ou não de cobertura vegetal.

Uma superfície seca com índice de consistência estipulado por MÜLLER *et alii* (1990) igual a 1,00, à profundidade de 0-2 cm e com ou sem cobertura vegetal, impedia, portanto, o deslizamento excessivo. Porém não se verificava ótimas condições de tráfego analisando somente os 0-2 cm iniciais. A parte inferior do horizonte superficial do solo deveria estar, pelo menos, com um estado de consistência igual a 3, ou ter uma força de resistência à penetração do cone acima de 0,3 MPa,

indicando que o solo deveria estar, pelo menos, com uma umidade correspondente ao seu limite inferior de plasticidade. A camada superior do solo era considerada com condições de tráfego se a força de resistência à penetração do cone excedesse a 0,3 MPa. Nestas condições, os autores observaram um pequeno afundamento com a passagem das rodas, menos que 4 cm, e sem afloramento de água na trilha do pneu. Quando o índice de consistência fosse maior que 1,3 e o índice de cone, maior que 3,0 MPa, estando, portanto, com a camada superficial extremamente seca, esta propiciaria o máximo em tração, mas restringiria os trabalhos de mobilização do solo.

Como critério indireto, MÜLLER *et alii* (1990) utilizaram como avaliação das condições de tráfego o aparecimento de água aflorada na trilha dos pneus, estando portanto o solo acima da capacidade de campo.

FLORES *et alii* (1990) propuseram uma metodologia para determinação do critério de umidade do solo para realização de trabalhos mecanizados agrícolas, avaliando a capacidade do solo em proporcionar condições para operações desta natureza. O trabalho foi conduzido na Rogers Memorial Farm, University of Nebraska - Lincoln (E.U.A.), sob um solo de textura barro siltico-argilosa.

A princípio, quatro graus distintos de umidade do solo foram tomados como base :

1. a umidade em que o solo apresenta a máxima tensão de cisalhamento;
2. a umidade que proporciona razoáveis condições para um trabalho com implementos agrícolas;
3. a umidade que oferece condições mínimas para a mobilização do solo;
4. a umidade limite para permitir tráfego sobre o solo, sob índices admissíveis de compactação.

A determinação do critério para designação das condições de tráfego, advém da minimização destes quatro graus básicos de umidade do solo, segundo a equação abaixo :

$$Mwd = \min [Mc, Ms, Mf, Md] \quad (6)$$

onde:

- Mwd = umidade critério para condições de tráfego agrícola, %;
Mc = umidade do solo à máxima tensão de cisalhamento, %;
Ms = umidade do solo no limite estabelecido de patinagem, %;
Mf = umidade do solo desejável na atuação do implemento, %;
Md = umidade do solo que evite compactação, %.

Os autores determinaram como critério o teor de 23,5% de água para o solo em estudo, onde se proporcionava a força de tração máxima de acordo com os resultados obtidos através do "sheargraph". Consideraram este teor como uma condição limite para trabalhos mecanizados em solos agrícolas. Tanto abaixo deste teor, como acima, a força de cisalhamento decresce. Depreende-se, portanto, que ao se planejar as operações agrícolas, deve-se evitar estes extremos, períodos excessivamente chuvosos ou secos.

FLORES *et alii* (1990) observaram que a estimativa da umidade do solo através do índice de cone, muito colaboraria em estudos de tráfego agrícola, desde que se tenha, inicialmente, um critério de compactação para o solo em questão. O uso do índice de cone medido em solos já compactados, pode proporcionar uma indicação da capacidade deste solo em ser compactado, após o tráfego de máquinas, sobre diferentes condições de umidade. Através destes valores de umidade estimados, poderia se estimar o deslizamento e a força de cisalhamento do solo. Da mesma forma, a estimativa da força necessária para proporcionar tração no solo, pode também ser uma grande ferramenta para estudos de tráfego agrícola. Porém, deve-se levar em conta que esta força varia em função da carga aplicada e da umidade do solo.

2.4. Simulação e modelagem

MORETTI FILHO (1964) utilizou para cálculo do balanço hídrico em solos da zona canavieira do Estado de São Paulo a combinação de dados disponíveis de registros diários de chuva, com estimativas de perdas diárias de água por evaporação, determinando o número de vezes em que a água disponível do solo assumia o valor zero, configurando um dia agronomicamente seco.

Este balanço foi caracterizado como uma simples equação hidrológica, assumindo-se que a umidade do solo encontrava-se à sua capacidade de campo no início do período em estudo. O autor considerou ganhos em umidade para o solo a chuva medida, e as perdas eram representadas pela evapotranspiração, estimada pelo método de Penman, e pela percolação. As perdas por escoamento superficial eram tidas, como na prática, quase impossível de se levar em conta, já que poderia assumir o aspecto de ganho ou de perda de água.

MIALHE (1974) se utilizou dos resultados obtidos por MORETTI FILHO (1964) para estimativa do número de dias sem restrições ao trabalho de maquinaria agrícola, ou seja, dias aptos, correlacionando os dias agronomicamente secos como dias aptos para o trabalho. Com este procedimento, o autor subestimou o número de dias aptos, pois não considerou os dias em que o solo se encontrava num grau de umidade intermediário entre o ponto de murcha permanente e a sua capacidade de campo, onde existe condições de tráfego agrícola segundo vários autores citados no item anterior.

ELLIOTT *et alii* (1977) desenvolveram um modelo de balanço hídrico para estimar os dias favoráveis à mobilização do solo na primavera, em Illinois (E.U.A.). As perdas diárias por evapotranspiração potencial eram estimadas através do método de Thornthwaite, devido à sua facilidade de aplicação, conscientes de não ser o melhor método. A evapotranspiração real era estimada diante de uma série de considerações sobre a condição climática diária. O balanço hídrico dos solos em estudo era individualizado para duas camadas distintas de solo, determinadas em função da capacidade de armazenamento de água de cada uma, contidas nos 91 cm superficiais.

O modelo proposto por ELLIOTT *et alii* (1977) considerava o coeficiente de escoamento superficial como uma função da quantidade de precipitação ocorrida e da umidade já existente no solo, sendo o método que mais se aproximava das condições reais. Para as condições de drenagem deficientes dos solos em estudo, o modelo não considerava que o coeficiente de drenagem da água acima da capacidade de campo do solo era completa e instantânea. Assim sendo, para solos argilosos com boa superfície de drenagem, ELLIOTT *et alii* (1977) assumiram que o solo chegava à sua capacidade de campo no segundo dia após sua saturação. Se não houvesse mais precipitações, as perdas por evapotranspiração da água disponível começava a partir de então. Quando se tratava de um solo arenoso com uma boa drenagem subsuperficial, considerava-se, então, que este solo chegava à sua capacidade de campo no dia seguinte, seja qual for a precipitação que levou a sua umidade além da sua capacidade de armazenamento de água disponível. Com o solo à sua capacidade de campo, o modelo retomava a rotina de balanço hídrico, seguindo a metodologia descrita.

SEDIYAMA *et alii* (1979) em seu modelo de balanço hídrico relacionaram o valor diário de evapotranspiração real, as características de crescimento das raízes de soja, a disponibilidade de água no solo durante o período de crescimento da cultura e a probabilidade de distribuição de chuvas.

O processo empregado por estes autores para a obtenção da evapotranspiração real baseou-se na equação de Hargreaves para determinação da evapotranspiração potencial, a partir dos dados simulados de temperatura média e umidade relativa diária, sendo a evapotranspiração real o produto da evapotranspiração potencial simulada pelo coeficiente de umidade do solo, dado pela relação a seguir:

$$Ku = \frac{\ln [ADS_{(t-1)} + 1]}{\ln [ADS_{CC} + 1]} \quad (7)$$

onde:

- K_u = coeficiente de umidade do solo, adim.;
- $ADS_{(i-1)}$ = água disponível no solo no dia $i - 1$, mm;
- ADS_{cc} = água disponível no solo na capacidade de campo, mm.

A equação considerada para o balanço hídrico no modelo em questão era:

$$SMD_{(i+1)} = SMD_{(i)} + ETr_d - RFD - I \quad (8)$$

onde:

- $SMD_{(i+1)}$ = umidade retirada do solo até o final do dia $i + 1$, mm;
- $SMD_{(i)}$ = umidade retirada do solo até o final do dia i , mm;
- ETr_d = evapotranspiração real diária, mm;
- RFD = volume de água proveniente da precipitação efetiva simulada, mm;
- I = volume de água proveniente de irrigação, mm.

SEDIYAMA *et alii* (1979) conduziram o balanço hídrico na camada mais superficial do solo, considerando-o à sua capacidade de campo no início dos cálculos. Os autores concluem que as áreas estudadas diferem microclimaticamente, mas dependendo do tipo de solo que possa existir, isto pode passar a não ser mais verdadeiro. O modelo não foi validado, nem se considerou as diversas operações agrícolas ocorridas durante o ciclo da cultura de soja, diferenciando aquelas que somente trafegam e outras que mobilizam o solo.

NATH & JOHNSON (1980), programaram em Fortran seu modelo de simulação para estimativa da umidade do solo e das condições de tráfego para colheita. Neste modelo, a taxa de infiltração e o escoamento superficial do solo eram estimados somente após o solo ter chegado à sua capacidade de campo. Por sua vez, as perdas de umidade eram estimadas pela evapotranspiração real e os ganhos pelas precipitações registradas e pelo derretimento de neve, se existente. Era considerada a profundidade de 0-15 cm do solo para o balanço hídrico.

A evapotranspiração potencial era calculada por NATH & JOHNSON (1980) através da equação de Penman, a evapotranspiração real era calculada a partir da evapotranspiração potencial, pelo método de Blaney & Criddle, modificando-a em função do tipo de cultura e seu ciclo produtivo, como por exemplo, a evapotranspiração é muito reduzida na fase final, durante a época de colheita, com baixa demanda de água pelas plantas ao nível da zona radicular. A determinação do escoamento superficial seguia o método preconizado pelo SCS (Soil Conservation Service), que considerava a ocorrência de escoamento somente quando a precipitação excedia as demandas de evaporação, infiltração, retenção e armazenamento superficiais. O número dado ao escoamento superficial era baseado nas práticas conservacionistas e quanto ao tipo de cobertura na superfície do solo, e era substancialmente dependente da intensidade de precipitação. Em seqüência ao escoamento, armazenamento e retenção superficiais, e tendo a umidade atingido o valor de 90% da saturação do solo, o excesso de água percolava para a subsuperfície. Após considerar todos os modos de perdas e ganhos de água no solo, o conteúdo de umidade era determinado e comparado com o critério adotado, para a determinação das condições de tráfego.

O modelo apresentado por WITNEY *et alii* (1982) e WITNEY (1988) para determinação da umidade do solo à uma profundidade de 300 mm (camada arável), baseia-se na seguinte identidade :

$$U_{(i)} = U_{(i-1)} + P - RO - D - ETr_d \quad (9)$$

onde:

- $U_{(i)}$ = umidade contida no solo no dia i, mm;
- $U_{(i-1)}$ = umidade do solo no dia i - 1, mm;
- P = volume de água proveniente de precipitação, mm;
- RO = volume de água proveniente do escoamento superficial ("run off"), mm;
- D = volume de água relativo a perdas por drenagem, mm;
- ETr_d = evapotranspiração real diária, mm.

O balanço hídrico vai atualizando o status de umidade do solo diariamente, tomando a umidade do dia anterior e ajustando-a para o dia seguinte, contabilizando as perdas e ganhos ocorridos em função dos dados meteorológicos. As irrigações eram consideradas como ganho de água assim como as precipitações.

O coeficiente de drenagem adotado segue a equação do fluxo de água em um perfil vertical onde a velocidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico (equação de Darcy), com as devidas considerações quanto ao coeficiente de condutibilidade hidráulica do solo sob diferentes status de umidade.

Para a determinação da taxa de evapotranspiração potencial mensal usou-se a relação de proporcionalidade entre as temperaturas médias mensais do ar, seguindo as equações preconizadas em THORNTHWAITE & MATHER (1955).

Para estimativa da evapotranspiração real diária, WITNEY *et alii* (1982) e WITNEY (1988) aplicaram diversas variáveis sobre a evapotranspiração potencial, apresentados na equação a seguir :

$$ETr_d = \frac{ETp \cdot Kl \cdot Kd \cdot Kw \cdot Kg \cdot Ks}{30} \quad (10)$$

onde:

ETr_d = evapotranspiração real diária, mm;

ETp = evapotranspiração potencial mensal, mm;

Kl = fator de correção do comprimento do dia, adim.;

Kd = fator de correção de secagem do solo a uma determinada profundidade, adim.;

Kw = fator de correção de dias úmidos, adim.;

Kg = fator de ajuste quanto à progressividade da ET, adim.;

Ks = fator de correção para cobertura vegetal na superfície, adim..

ANDERSON (1983) propõe um modelo determinístico dotado de um balanço hídrico no contexto de previsão das condições de tráfego em solos, considerando ser este o método mais capacitado para

resolução destes modelos.

Em Vicksburg, Mississippi (E.U.A.), o autor desenvolveu um trabalho comparando as relações empíricas existentes entre a umidade do solo e o valor do índice de cone, empregados pelo U. S. ARMY CORPS of ENGINEERS em pesquisa sobre tração. Para isto, considerou o solo a uma profundidade de 2,5 m, subdividindo-o em 10 camadas, sendo que cada uma era diferenciada da seguinte forma : as três primeiras com 20 cm, as quatro intermediárias com 25 cm e as últimas com 30 cm. O movimento da água entre as camadas obedecia a equação de Darcy. O coeficiente de escoamento superficial era considerado quando a capacidade de retenção e armazenamento superficial estava completa e a taxa de precipitação excedia a capacidade de infiltração do solo.

A maior vantagem desta modelagem com balanço hídrico sugerido pelo autor, é quanto ao tempo de resolução da simulação, bem menor quando comparado com a metodologia empírica de determinações no campo, e quanto a capacidade de incorporar dados meteorológicos e tempos reais para atualização dos prognósticos e estimativas desejados com o passar dos anos, tornando os resultados mais confiáveis e conseqüente diminuição do coeficiente de variação.

WÖSTEN & BOUMA (1985) usaram a simulação por computador para obter as probabilidades de estimativa quanto a disponibilidade de água e as condições de tráfego num solo gramado muito argiloso da Holanda, com a disponibilidade de 30 anos de dados edafoclimatológicos.

O modelo utilizado por WÖSTEN & BOUMA (1985) calculava o balanço hídrico a cada decêndio do ano, sucessivamente. Para a camada superior do solo era considerado como ganhos de água a precipitação efetiva e para a camada subsuperficial, os dados da altura do lençol freático. A evapotranspiração potencial para o solo era estimada através de relações diferenciadas ao longo das estações do ano. Para melhor conceber o balanço hídrico o solo foi dividido em duas partes : a primeira, de 0-20 cm, coincidindo com a zona radicular, sendo esta a profundidade utilizada pelo modelo para a estimativa dos decêndios com condições de tráfego, e a segunda parte, ficou abaixo da profundidade de 20 cm. A partir do critério adotado e do resultado do balanço hídrico na

camada superior, o modelo facilmente classificava se o solo oferecia ou não condições de tráfego.

BABEIR *et alii* (1986) estimaram a umidade do solo através de um modelo que iniciava com a determinação da umidade em três camadas subseqüentes do solo, contidas nos 45 cm superficiais deste, igualmente subdivididas, com 15 cm cada, sendo que somente os primeiros 30 cm teriam influência sobre a possibilidade de trabalho com máquinas agrícolas, na região central do Estado de Iowa (Clarion-Webster Soil Association - E.U.A.), cuja camada superficial dos solos possuíam textura média (barro), sendo a média anual de precipitação de 850 mm, com 73% concentrada nos meses de Abril a Setembro.

Primeiramente uma subrotina analisava se o solo oferecia condições físicas de poder ser trabalhado, caso ele estivesse congelado era considerado como um dia inapto para operações com tratores agrícolas. Do contrário, seguia-se a subrotina para a determinação do escoamento superficial de superfície, a evapotranspiração, a drenagem, a difusão e a umidade em cada uma das camadas em estudo. Segundo os critérios adotados para trabalho com máquinas agrícolas, o programa definia se o dia iria ser apto ou não.

Os termos utilizados nos cálculos feitos por BABEIR *et alii* (1986) para a determinação do balanço hídrico do solo, foram anteriormente determinados por outros pesquisadores, servindo especificamente para a área em estudo. Sugerem os autores que tais termos, que traduzem as perdas e trocas de água das camadas de solo em estudo, deverão ser reavaliados ao serem empregados em outras localidades, além de alertarem quanto ao manejo do preparo de solo, que poderá influenciar diretamente o comportamento da água no solo.

SANS (1986) em seu trabalho específico para estimar o regime de umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo álico em Sete Lagoas, Minas Gerais, realizou também uma comparação de métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração potencial: Thornthwaite, Blaney-Cridle, método da radiação, Penman e do tanque de evaporação.

O ano em que SANS (1986) efetuou as determinações de campo, 1983, a precipitação foi bem superior à média da região, tanto no total como mensal. Com excessão do método de Blaney-Cridle, os demais

não mostraram diferenças que modificassem o regime de umidade. Isto mostrou que a evapotranspiração não foi o parâmetro mais sensível do modelo. Não se percebeu diferenças entre os modelos em termos de números de dias. Um aspecto importante que o autor considerou para o estabelecimento do regime de umidade é quanto ao tipo de uso dado ao solo. SANS (1986) concluiu também que a presença de cobertura vegetal na superfície do solo muito influencia quanto às perdas de umidade deste, e quando não existir cobertura vegetal, as perdas de água dependerão exclusivamente das propriedades físicas do solo em questão.

Para VON BARGEN *et alii* (1986) a classificação de um dia apto para operações agrícolas mecanizadas dependia, fundamentalmente, das condições de tráfego na superfície do solo, tendo a umidade como indicadora destas condições. Para a estimativa destes dias trabalháveis, os autores consideraram dados de mais de 15 anos e três tipos básicos de solo quanto à sua textura : arenosa, barrenta e argilosa, determinando suas respectivas umidades de saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, além dos respectivos coeficientes de drenagem e difusão. A simulação das condições de umidade do solo segue segundo a ordem de subdivisão feita em seu perfil: seis subseqüentes camadas com 5 cm de espessura cada. Para a aplicação dos critérios determinísticos das condições de tráfego eram consideradas apenas nas duas camadas superiores (0-10 cm).

As mudanças do teor de água no solo ao longo do dia, observadas por VON BARGEN *et alii* (1986), não ocorriam simultaneamente, sendo que algumas até poderiam. Os ganhos de água no solo considerados por estes autores foram as precipitações e do derretimento da neve. A perda de água por escoamento superficial era estimada pelo método do Soil Conservation Service (S.C.S.), já citado, que considera factível esta perda a uma declividade com mais de 3% do terreno. A capacidade de retenção da água variava de solo para solo, e os autores consideravam que a água em excesso no solo era perdida por drenagem e também por evapotranspiração. A drenagem era computada dia a dia, em função do respectivo coeficiente. Quanto a perda por evapotranspiração, inicialmente era computada a evaporação, em seguida, quando a cultura atingia um determinado porte, tinha-se a evaporação e a transpiração como perdas

de água do solo. No início, considerou-se para cálculo da evaporação a influência da cobertura de restos vegetais com um percentual de redução destas perdas, e somente as duas primeiras camadas eram consideradas neste caso, sendo que a distribuição de umidade interna ocorria entre todas elas.

VON BARGEN *et alii* (1986) consideraram ainda que a precipitação total diária ocorria à 00:00 hora e a sua intensidade era assumida como menor que a respectiva taxa de infiltração do solo saturado. Era admitido que, em no máximo 12 horas, realizava-se a distribuição da umidade proveniente da precipitação ocorrida naquele dia, entre todas as camadas consideradas, sendo este movimento de água no perfil do solo determinado pela condutibilidade hidráulica, definida pelo respectivo coeficiente de drenagem para cada tipo de solo. Quando a umidade de uma determinada camada era menor que a camada subjacente, a qual está na capacidade de campo, ocorria então a redistribuição da água, isto é, um ganho por ascensão capilar, quantificada pelo coeficiente de redistribuição.

MEHNER *et alii* (1988) estimaram os dias úteis para a colheita do sorgo através de um modelo de simulação de eventos orientados, usando a cadeia de Markov, o qual analisava os dados de precipitação de 32 anos e designava se os dias permitiam condições de tráfego ou não. Este modelo incorporava o método de cálculo de balanço hídrico baseado no índice de precipitação antecedente (API - antecedent precipitation index), que quantificava o conteúdo de água na camada superior do solo.

Os autores através de uma regressão linear correlacionaram o API com o número de dias de parada na colheita por motivos climáticos, determinando os coeficientes e as constantes para as quatro estações do ano e para três tipos básicos de textura de solo: arenosa, barrenta e argilosa. Assumiram que, o número de dias de parada por motivo climático durante a colheita, seria o maior valor obtido entre as estimativas dos dias determinados pelo API ou pela simulação dos eventos orientados, usando a cadeia de Markov. Adotando-se o maior número automaticamente embutia-se uma maior margem de segurança nos cálculos posteriores, onde se estimava as necessidades de colhedoras e

caminhões para colheita do sorgo.

O modelo utilizado por ASSIS (1988) e ASSIS *et alii* (1989) em suas estimativas de dias aptos para trabalhos com máquinas agrícolas, estimava a umidade do solo calculando a lâmina de água atual disponível ao final do dia, através do resultado da soma do valor da lâmina de água atual disponível no final do dia anterior com a precipitação efetiva ocorrida no dia menos a perda de umidade por evapotranspiração real, também ocorrida no dia.

Os autores consideraram que no início do balanço hídrico, o solo estava na sua capacidade de campo. As perdas por drenagem e por escoamento superficial eram estimadas diante da seguinte consideração : quando o teor de água do solo atingisse a sua capacidade de campo, em virtude da precipitação ocorrida, o excedente era perdido, seja por drenagem interna ou por escoamento superficial, permanecendo o solo, ao final do dia, à capacidade de campo.

ASSIS (1988) e ASSIS *et alii* (1989) calcularam diariamente a evapotranspiração potencial através do método da radiação, levando em consideração a irradiação solar global e temperatura média diárias, além da altitude média do local. A evapotranspiração real foi calculada a partir do coeficiente de umidade (equação 7) aplicado sobre a evapotranspiração potencial

Segundo os autores, o modelo apresentado obteve resultados satisfatórios para a estimativa do número de dias trabalháveis com tratores agrícolas, sem ter sido validado ou sequer levado em consideração que tipos de atividades agrícolas estavam sendo executadas pelos tratores, como tráfego, simplesmente, ou um trabalho com movimentação do solo.

MÜLLER *et alii* (1990) avaliaram as condições de tráfego e trabalho mecanizado agrícola em solos aluviais argilosos baseando-se em observações e determinações de ordem prática, correlacionando-as com os critérios adotados para posteriormente analisar seus resultados. Para determinação do trabalho em subsolo, a umidade foi monitorada à profundidades de 50 a 70 cm, durante os anos de 1980 a 1988, que foi a duração do experimento.

2.5. Validação de modelos

ELLIOTT *et alii* (1977) testaram e validaram seu modelo inicialmente comparando as diferenças entre os dados obtidos e os contidos no Illinois Cooperative Service Crop Report, quanto ao número de dias úteis no campo. Não houveram diferenças significativas entre os dados estimados pelo modelo e os que continham no Service Crop Report, ao nível de 95% de probabilidade.

Em seguida, os autores compararam o modelo com observações reais de campo. No período estudado, durante o ano de 1972, houveram 139 dias dentre 165 dias que foram observados como sendo úteis, cerca de 84%, indicando uma acurácia razoável.

NATH & JOHNSON (1980) na avaliação do seu modelo, verificaram que o balanço hídrico era muito sensível quanto a precipitação, o principal fator de determinação das condições de tráfego. A umidade estimada pelo modelo era a mesma quando determinada em condições de campo, exceto no período final da época de colheita, onde os valores e os parâmetros fornecidos nesta época estavam em desacordo com a situação real estudada, concluem os autores. Eles observaram ainda que os dados climáticos não eram exatamente do local onde a cultura de sorgo estava estabelecida, causando os desvios nos resultados obtidos no balanço hídrico. O período estudado restringiu-se aos dados do dia 1º de setembro ao dia 14 de outubro do ano de 1976, para efeito de comparação com as estimativas obtidas.

Os índices de correlação entre os dados observados de umidade do solo e os estimados pelo modelo de WITNEY *et alii* (1982), oscilaram entre 0,990 e 0,999, para dez experimentos num total de 820 dados reais observados. Um número maior de discrepâncias ocorreram, particularmente, durante a estação de crescimento da cultura, atribuindo os autores a inconsistência dos valores de campo e padrões de tempo por falha do equipamento de monitoramento, assim como qualquer imperfeição nas análises técnicas.

WÖSTEN & BOUMA (1985) verificaram que seus resultados, da estimativa da umidade do solo, apresentaram boa correlação com os valores medidos no campo. Seus resultados quanto as condições

de tráfego, apresentaram grandes variações ao longo dos trinta anos em estudo, ficando, portanto, pouco relevante o valor da média obtida através destes. Os autores, então, apresentaram um gráfico que indicava a probabilidade de tráfego a cada decêndio ao longo do ano, com limite de confiabilidade de 95%, tornando os resultados mais consideráveis e generalizáveis para situações semelhantes à aquelas estudadas.

OSKOUI (1986) seguindo este raciocínio, utilizou o modelo desenvolvido por WITNEY *et alii* (1982) e ajustou-o para trabalho com máquinas agrícolas em solos da região leste da Escócia. De acordo com as suas observações, seria necessário aumentar em dois pontos percentuais o critério sugerido para se obter uma melhor correlação com os dados observados.

BABEIR *et alii* (1986) julgam ser de grande importância a validação do modelo para determinar sua resposta ao estimar os dias úteis de trabalho, podendo ser utilizado em outros estudos futuros. Assim sendo, o modelo apresentado foi testado pela comparação entre as suas estimativas e os dados dos dias trabalháveis observados no campo, de Abril a Novembro para o centro do Estado de Iowa, durante os anos de 1965 - 1976, com exceção de 1972, data na qual não se dispunha de dados.

As análises da sensibilidade do modelo foram feitas através de vários testes. Um deles foi para o critério de umidade do solo para trabalhos com maquinarias agrícolas. O critério de umidade foi incrementado de 10 em 10%, iniciando-se aos 80% da umidade à capacidade de campo, chegando aos 90 % e até 99 %. A melhor correlação com os dados reais observados se deu aos 99 % de umidade da capacidade de campo do solo. Concluíram os autores que seu modelo é confiavelmente estável, mas para resultados positivos deve haver disponibilidade de informações edafoclimatológicas apropriadas.

Para validação do modelo, VON BARGEN *et alii* (1986) compararam os valores estimados com as mensurações da umidade do solo através da análise de regressão linear. Em todos os casos o coeficiente de correlação foi superior a 0,81. Os resultados estimados nos primeiros 10 cm do solo estavam bem mais correlacionados com os valores observados, comparado-os com os estimados a 20 cm. Quanto à textura, os

valores estimados para o solo argiloso, chegaram a uma correlação próxima a 1 (um), sendo que para generalização, os autores consideraram um fator de ponderação para cada tipo de solo : 0,7 (solo barrento); 0,1 (solo arenoso) e 0,2 (solo argiloso), em função da distribuição destes tipos de solo nas propriedades existentes na região em estudo.

A análise por regressão linear mostrou que os dados estimados de dias úteis nos sete anos estudados apresentaram os respectivos coeficientes de correlação : 0,94; 0,97; 0,96; 0,94; 0,76; 0,86 e 0,92. O ano de 1982 foi o pior resultado por ser um ano adverso quanto às condições climáticas.

WITNEY (1988), a partir dos trabalhos de WITNEY *et alii* (1982) e OSKOUI (1986), concluiu que pode ser usado um modelo para se estimar a probabilidade de ocorrência de condições de tráfego quando o conteúdo de umidade no solo é igual ou abaixo de um valor específico ou seja, um critério. Sendo, porém, irreal a adoção de um único critério para diferenciar as condições de tráfego, pois estas condições variam de solo para solo, de máquina para máquina e da forma de gerenciamento.

HETZ & RIQUELME (1989) utilizaram a análise estatística por correlação linear simples para validação de seu modelo, comparando as estimativas obtidas com os resultados de seis anos de observações diárias no campo, concluindo que o modelo estava razoavelmente validado.

MÜLLER *et alii* (1990) interpretaram o confronto entre os dados reais obtidos no campo de experimentação e os dados do trabalho mecanizado agrícola observados, através do auxílio da análise de regressão. Uma análise estatística dos dados de frequência de tráfego e do balanço hídrico climático nos meses de primavera, revelou uma correlação positiva existente entre estes dados. Da mesma forma, através dos dados observados durante todos estes anos, os autores conceberam um mapa das condições de tráfego da área ao longo do ano.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Material

O material utilizado se constitui, basicamente, de uma série de dados observados no sistema mecanizado da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria). A descrição destes dados é feita agrupando-os segundo a sua natureza, sendo todos relativos à base física sob observação, a saber :

- dados edáficos;
- dados agrometeorológicos;
- dados das operações tratorizadas.

3.1.1. Dados edáficos

A área total explorada pela empresa, que sobretudo consiste na exploração da cultura da cana-de-açúcar, coexistindo com culturas de cereais durante a primavera e o verão, é de 15.202,98 ha, contidos num raio médio de 16,065 km, a uma altitude média entre 600 e 700 metros, na latitude 22° S e longitude 47° 21' W.

Esta área cultivada abrange vários tipos de solo, conforme indicado no Quadro 1, sendo na grande maioria de textura argilosa, razão pela qual se considerou esta textura como representativa de toda a área. As características que tipificam este solo foram colhidas na bibliografia, como indica a Tabela 1, tomando-se os valores médios de umidade do solo sob as seguintes circunstâncias: em seu ponto de murcha permanente, à sua capacidade de campo, em seu limite de plasticidade e

de liquidez, além do seu ponto de saturação.

Estes valores foram os considerados no balanço hídrico diário, para estimativa da umidade do solo.

Quadro 1. Tipos de solo da área explorada pela Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria), na safra 90/91.

Tipo de solo	Área (ha)	%
Latossolo Roxo	4.758,54	31,30
Latossolo Vermelho Escuro argiloso	1.302,35	8,57
Latossolo Vermelho Escuro médio argiloso	131,16	0,86
Latossolo Vermelho Amarelo argiloso	1.888,47	12,42
Latossolo Vermelho Amarelo médio argiloso	4.315,51	28,39
Podzólico Vermelho Amarelo argiloso	686,62	4,52
Podzólico Vermelho Escuro argiloso	1.910,33	12,57
Areia Quartzosa	210,00	1,38
Total	15.202,98	100,00

Tabela 1. Tipificação dos graus de umidade (%) do solo, representativo da área em estudo (*), relativos a parâmetros do sistema solo-planta-atmosfera.

Grau de Umidade do solo	% em	
	peso/peso	volume/volume
Saturação	56,34	68,17
Limite de Liquidez	47,40	57,35
Índice de Plasticidade	21,30	35,77
Capacidade de Campo	32,98	39,98
Ponto de Murcha Permanente	21,58	26,11

* Adaptado de PAIVA NETO *et alii* (1951), GROHMANN & MEDINA (1962), TIBAU (1983), BARBIERI (1985), INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP (1986), REICHARDT (1987) e SAAD *et alii* (1988).

Foram utilizados os seguintes equipamentos para as mensurações referentes as determinações de características dinâmicas do solo da área em questão :

- Penetrógrafo de mola;
- "Sheargraph" de Cohron.

3.1.2. Dados agrometeorológicos

Os dados agrometeorológicos que foram obtidos no posto meteorológico central da Usina São Luiz, contém informações de precipitação e de temperaturas do ar.

Para complementar e se obter uma média destes dados da localidade em estudo, com mais de 15.000 hectares, foram coletados registros de precipitação e temperatura do ar diárias, provenientes de postos meteorológicos instalados nos municípios de Porta Ferreira, Santa Cruz das Palmeiras, Pirassununga e no Distrito de Cachoeira de Emas,

delimitando muito bem a referida área.

A partir deste material, foram consolidados os dados dia a dia e calculada a média diária da temperatura do ar e do volume de precipitação ocorrido. O período referente a estes dados coincidiram com o período de observação da frota da empresa : de setembro de 1988 a até junho de 1991.

3.1.3. Dados das operações tratorizadas

Para validação do modelo proposto foram utilizados dados reais observados de atividades exercidas por uma frota agrícola, extraídos de apontamentos diários realizados por operadores durante a execução de operações agrícolas na cultura da cana-de-açúcar da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria).

Estes apontamentos foram encontrados num dos vários relatórios que a empresa emite para seus controles gerenciais e avaliações internas, sendo considerado o Relatório Resumo de Horas Paradas por operação e Máquina Dia a Dia. São apresentadas as paradas das máquinas pelos mais variados motivos, interessando apenas para este trabalho as paradas por motivo de chuva e solo úmido.

Duas frentes foram observadas ao longo do período compreendido de setembro de 1988 à junho de 1991, que operavam em dois turnos diários de 12 horas cada, totalizando uma jornada de trabalho de 24 horas, a saber:

- operações pesadas : que englobam 495 dias (11.880 horas) contínuos de trabalhos de mobilização, envolvendo operações de preparo do solo (gradagem pesada, etc), executadas por 5 máquinas de esteira com potência média de 100 a 150 kW (130 a 200 HP), modelo CAT-D6D;

- carregamento de cana : que englobam 380 dias (9.120 horas) contínuos de trabalhos de tráfego: carregamento mecânico de cana, executados por 14 máquinas (carregadoras), constituídas de carregadores hidráulicos acoplados em tratores convencionais de pneu (4x2), com potência média entre 65 e 100 kW (90 e 130 HP).

Estes dois tipos de operações agrícolas diferem quanto ao modo de interação máquina - solo, isto é, a máquina simplesmente trafega sobre o solo (carregamento) ou também atua sobre este, através de implementos agrícolas (operações pesadas).

3.2. Método

3.2.1. Hipótese de trabalho

Como hipótese preliminar de trabalho, pretendeu-se conceber uma metodologia de cálculo não determinístico para se estimar as horas disponíveis para trabalhos motomecanizados agrícolas.

O modelo proposto foi desenvolvido a partir de dados edafoclimáticos e dos dados contidos no item 3.1.3, referentes às operações tratorizadas observadas, estabelecendo-se, então, uma metodologia para concepção de um modelo não determinístico, para se estimar os tempos operacionalmente úteis para tráfego de máquinas agrícolas, empregando-se recursos matemáticos e estatísticos disponíveis.

Através de um modelo não determinístico não mais existiriam critérios de tráfego ou de trabalho em solos agrícolas rígidos, designando somente se num determinado dia é ou não possível a execução de operação agrícola. Para maior consistência e validação deste modelo não determinístico, utilizou-se os dados de horas paradas observadas nos relatórios fornecidos pela empresa, fornecendo as horas reais disponíveis

para trabalho com máquinas agrícolas, conforme o procedimento apresentado por BABEIR *et alii* (1986) .

Na hipótese de se adotar um critério rígido, como se verificou na bibliografia, a designação de um dia útil ou não, passa a ser única, não havendo possibilidade de estimar se parte do período proporcionava condições de trabalho. Nenhum dos trabalhos citados na revisão bibliográfica propuseram um modelo não determinístico no contexto de estimativa das condições de tráfego em solos.

Por outro lado, ao se observar alguns dos apontamentos realizados pelos operadores, verifica-se que estes estavam, inicialmente, trabalhando com sua respectivas máquinas, sem quaisquer restrições. Ao registrarem a parada por motivos climáticos, estes registros geralmente não se apresentam simultâneos, diferenciando-se em função do tipo de operação que vinha sendo realizada. A não simultaneidade se deve também à distribuição irregular das precipitações, sendo assumido como homogênea em toda a área e considerada a sua média diária.

3.2.2. Teoria do método

A umidade do solo é que proporciona ou não condições de tráfego ou de trabalho de mobilização do solo por máquinas agrícolas (WITNEY, 1988; ASSIS *et alii* , 1989).

Para tanto é necessário primeiro conceber um modelo para a estimativa diária da capacidade de água disponível do solo (CAD), através do balanço hídrico.

A partir deste resultado e dos dados contidos no item 3.1.3, referentes às operações tratorizadas observadas, estima-se as condições de tráfego do solo correlacionando estas duas variáveis, linearmente e de modo diretamente proporcional.

Foram considerados todos os dias do contidos no período estudado, de setembro de 1988 a junho de 1991, descartando-se aqueles que não contivessem nenhuma informação sobre a atividade das máquinas em apreço, mantendo os dados observados de forma contínua, já que estes dados, originariamente, são descontínuos em função de

feriados, descansos semanais, falta de serviço, entre safra, etc.

Não foi arbitrado a um dia se ele é útil ou não para trabalho com maquinaria agrícola, caso não houvesse registros neste dia de suas atividades, baseando-se nos apontamentos realizados nos dias anteriores e posteriores a este e os registros de precipitação, já que isto poderia levar a erros.

3.2.2.1. Método para concepção do modelo para estimativa da capacidade de água disponível do solo

A metodologia proposta para desenvolvimento e concepção do modelo para estimativa da capacidade de água disponível do solo (CAD), inicia-se com os cálculos do teor de água do solo ao longo do período a ser estudado.

Os fundamentos básicos envolvidos são a contabilidade das quantidades de água que entram e que saem de uma camada de solo que vai da sua cota referente a sua superfície (O) até uma determinada profundidade (L), constituindo o balanço hídrico do solo.

Foram tomados dois balanços hídricos neste trabalho, o primeiro que considerou uma profundidade mais superficial, entre 0 e 100 mm para fins de correlação com os dados de máquinas que trafegaram sobre o solo sem implementos que interagiram com o solo, de acordo com o trabalho de VON BARGEN *et alii* (1986), e o segundo, que considerou uma profundidade maior, 300 mm, de acordo com os procedimentos preconizados por BABEIR *et alii* (1986), WITNEY *et alii* (1982) e WITNEY (1988), para correlacionamento com os dados provenientes das máquinas que trabalharam na mobilização do solo.

A partir dos modelos de balanço hídrico regidos pelas equações (8) e (9), e as considerações feitas por SEDIYAMA *et alii* (1979), WITNEY *et alii* (1982), BABEIR *et alii* (1986), VON BARGEN *et alii* (1986) e WITNEY (1988), constituiu-se um balanço hídrico completo, perfeitamente adaptado para as considerações feitas neste trabalho, conforme descrito a seguir :

Inicialmente, através do plano da superfície do solo, tem-se as adições relativas a precipitação e/ou a irrigação e as perdas por evapotranspiração e escoamento superficial. No plano à profundidade L pode-se ter perdas por drenagem e ganhos por ascensão capilar. Todos estes eventos são computados a cada 24 horas, ou seja, diariamente.

A contabilidade de todos estes componentes do balanço, considerando a umidade do dia anterior ($U_{(i-1)}$), resulta na umidade atual do solo ($U_{(i)}$) de uma determinada camada de solo (OL).

O balanço hídrico utilizado neste trabalho é constituído, portanto, da seguinte identidade :

$$U_{(i)} = U_{(i-1)} + P + I - ETr_d - RO - D + AC \quad (11)$$

onde:

$U_{(i)}$ = umidade contida no solo no dia i, mm;

$U_{(i-1)}$ = umidade do solo no dia i - 1, mm;

P = volume de água proveniente da precipitação, mm;

I = volume de água proveniente de irrigação, mm;

RO = volume de água proveniente de escoamento superficial, mm;

D = volume de água relativo a perdas por drenagem, mm;

ETr_d = evapotranspiração real diária, mm;

AC = volume de água proveniente da ascensão capilar, mm.

Segundo VON BARGEN *et alii* (1986), as mudanças de umidade, conforme as perdas e ganhos acontecidos, regra geral não ocorrem todos simultaneamente. Esta equação serve, portanto, como uma base conceitual para o balanço hídrico e considera instantâneos todos estes processos aqui considerados. A umidade do solo do dia anterior ao primeiro dia a ser calculado pelo balanço, será considerada igual à sua capacidade de campo (31/dezembro/1987), conforme procedimento adotado por MORETTI FILHO (1964), SEDIYAMA *et alii* (1979), ASSIS (1988) e ASSIS *et alii* (1989).

O balanço hídrico vai atualizando o status de umidade

do solo diariamente, tomando o conteúdo da umidade do solo no dia anterior e ajustando para o dia seguinte, contabilizando as perdas e ganhos ocorridos a partir dos dados meteorológicos. As precipitações foram consideradas como ganho de água, assim como as irrigações. Esta última foi considerada desprezível, constituída da aplicação de resíduos industriais no solo (águas industriais e vinhaça) em menos de 17% da área, com lâminas da ordem de 13 a 20 milímetros ao ano.

Os ganhos devido a ascensão capilar foram desprezados, pois os tipos de solos existentes na área em estudo possuem um lençol freático profundo.

As perdas por escoamento superficial foram assumidas como nulas, já que a área em estudo é toda cultivada dentro das mais modernas técnicas de manejo e conservação dos solos, irrelevando-se os problemas com erosão, sendo portanto toda a água excedente à capacidade de armazenamento do solo considerada perdida por drenagem, através do plano à profundidade L em questão.

As perdas por drenagem foram consideradas diante das seguintes circunstâncias apresentadas por CRUCIANI (1986) :

- 1a - durante a estação chuvosa, quando a precipitação, aliada ou não a uma irrigação, excede a evapotranspiração e o solo permanece no seu limite superior de umidade, portanto, à sua capacidade de campo (U_{cc}). Nestas condições as perdas por drenagem foram estimadas pela diferença entre os ganhos de umidade e a evapotranspiração, assim :

$$D = U_{(i-1)} + P + I - ETr_d - U_{cc} \quad (12)$$

onde: U_{cc} = umidade contida no solo à capacidade de campo, mm.

- 2a - se o solo ao final do dia $i - 1$ possuir uma umidade aquém da sua capacidade de campo, ter-se-ia um aumento da umidade deste, caso haja ganho de água no dia i , seja por precipitação ou por

irrigação, até atingir este teor máximo de retenção de água na camada OL considerada, sendo neste caso nula a perda por drenagem. Caso o volume de precipitação ou de irrigação for suficientemente grande a ponto de suprir todo o deficit em que se encontrava este solo e a evapotranspiração do dia i , o restante da água seria imediatamente perdida por drenagem, recaindo na condição anterior.

Para a determinação da taxa de evapotranspiração potencial diária adotou-se a metodologia proposta por CAMARGO (1960), WITNEY *et alii* (1982) e OMETTO (1988), com algumas considerações. A estimativa da evapotranspiração potencial diária foi baseada na metodologia proposta por THORNTON & MATHER (1955), utilizando-se de índices térmicos, segundo a equação a seguir :

$$ETP_d = \frac{16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Ta_d}{lh}\right)^\beta}{FC} \quad (13)$$

em que

$$\beta = [0,675 \cdot (lh^3 - 77,1) \cdot (lh^2 + 17921) \cdot (lh + 492390)] \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

sendo

$$lh = i_1 + i_2 + \dots + i_n \quad (15)$$

e

$$i_n = \left(\frac{Ta_n}{5}\right)^{1,514} \quad (16)$$

onde:

ETp_d = evapotranspiração potencial diária, mm;

Ta_d = temperatura média diária do ar, em °C;

β = fator de evapotranspiração anual, °C;

FC = fator de correção mensal, adim.;

Ih = índice de energia anual, °C;

i_n = índice de energia do mês n, °C;

n = mês do ano, variando de 1 a 12.

Ta_n = temperatura média mensal do ar do mês n, °C;

A adoção da metodologia de THORNTHWAITE & MATHER (1955) como referência para cálculo da evapotranspiração potencial diária se deve, sobretudo, ao fato de que o cálculo necessita de apenas dos dados de temperatura da localidade em estudo, o que facilita sua utilização em outras regiões, muitas vezes desprovidas de dados climatológicos completos.

Para tanto, necessita-se exclusivamente se saber as temperaturas médias diárias ao longo do ano, obtendo-se, inicialmente, os índices de energia mensal e anual, possibilitando o cálculo do fator de evapotranspiração anual (β) e, finalmente, calcular a evapotranspiração potencial diária, ajustando-a com o fator de correção mensal (FC), estabelecido por THORNTHWAITE & MATHER (1955) segundo o número de dias do mês, a duração média do dia e latitude (22° Sul) da região em observação, apresentados na Tabela 2 a seguir :

Tabela 2. Caracterização dos estágios da cultura de cana-de-açúcar na Usina São Luiz ao longo dos meses do ano, seus respectivos coeficientes de cultura (Kc) e fatores de correção mensal (FC).

meses do ano	Kc (*)	estágios da cultura (*)	FC (**)
JAN	1,25	I I I	34,5
FEV	1,25	I I I	30,0
MAR	1,10	I I I	31,5
ABR	0,90	I V	29,1
MAI	0,70	I V	28,5
JUN	0,50	V & I	27,0
JUL	0,40	V & I	28,2
AGO	0,40	V & I	29,4
SET	0,50	V & I	30,0
OUT	0,70	I I	32,7
NOV	0,90	I I	33,0
DEZ	1,10	I I	34,8

estágio I : brotação a 10% do desenvolvimento vegetativo

estágio II : 10% a 80% do desenvolvimento vegetativo

estágio III : 80% a 100% do desenvolvimento vegetativo

estágio IV : maturação

estágio V : colheita

(*) Adaptado de OMETTO (1988), TULER (1983) e VILLA NOVA (1983)

(**) Fonte : THORNTHWAITTE & MATHER (1955)

E, finalmente, para o cálculo da evapotranspiração real diária em condições de campo, será aplicado uma série de fatores para obtenção muito próxima das perdas de umidade local, segundo a equação (10) proposta por WITNEY *et alii* (1982) e WITNEY (1988), adaptando à seqüência de cálculo em desenvolvimento :

$$ETr_d = ETP_d \cdot Kc \cdot Ku \cdot Kw \quad (17)$$

onde:

ETr_d = evapotranspiração real diária, mm;

ETp_d = evapotranspiração potencial diária, mm;

Kc = coeficiente de cultura, adim.;

Ku = coeficiente de umidade do solo, adim.;

Kw = fator de correção de dias úmidos, adim..

As adaptações feitas no cálculo proposto por estes autores foram a supressão do fator de correção do comprimento do dia, o qual já está inserido no ajuste aplicado no resultado da evapotranspiração (Tabela 2), assim como o fator de correção para cobertura vegetal da superfície também foi desprezado, já que para a cultura da cana-de-açúcar convencional, com a queima da palhada para o corte, pode-se considerar como nula a quantidade de restos culturais deixados sobre o solo após sua colheita.

Para determinação do coeficiente de cultura foi considerado que toda a cultura de cana de açúcar, estabelecida na área em observação, teve um ciclo vegetativo uniforme, constituindo-se a Tabela 2, onde pode-se acompanhar a evolução das diversas fases da cultura ao longo do ano. Os valores do coeficiente de cultura (Kc) utilizados no cálculo do balanço hídrico foram obtidos baseando-se em OMETTO (1988), TULER *et alii* (1983) e VILLA NOVA (1983).

Foi considerado na estimativa dos dias úteis para trabalhos de mobilização do solo na frente de serviço de operações pesadas, que tais operações foram executadas imediatamente após a operação de colheita, sem que o solo se expusesse por muito tempo sem cobertura vegetal, simplificando os cálculos da evapotranspiração real diária não alterando os valores do coeficiente de cultura ao longo do ano, estabelecidos na Tabela 2.

O coeficiente de umidade do solo (Ku) adotado foi aquele proposto por SEDIYAMA *et alii* (1979), conforme a equação 7.

O fator de correção de dias úmidos adotado foi proposto por WITNEY *et alii* (1980) e WITNEY (1988), conforme consta na Tabela 3 a seguir :

Tabela 3. Fator de correção de dias úmidos (Kw).

número de dias com precipitações consecutivas	Kw
0	1,00
1	0,75
2	0,65
3 ou mais	0,55

Fonte : WITNEY *et alii* (1980) e WITNEY (1988)

O modelo para a estimativa da capacidade de água disponível do solo foi conduzido em planilha eletrônica, cujo procedimento de cálculo, de acordo com a ordem natural de determinação, poderá ser constatado segundo as indicações do Apêndice 1, compreendendo um arquivo gravado no disquete que acompanha este trabalho.

A título de ilustração do método adotado para balanço hídrico, elaborou-se com base nos dados obtidos na planilha eletrônica o gráfico da Figura 1.

Nota-se que a oscilação ficou entre um teto máximo, que corresponde à capacidade de campo do solo, e um mínimo que é o seu ponto de murcha permanente.

Não ocorrem perdas significativas de umidade do solo quando este chega em seu ponto de murcha permanente, dentro do que se pode observar em processos de transferências no sistema solo-planta-atmosfera descritos por REICHARDT (1985), e, em situações em que o solo se encontra acima de sua capacidade de campo, a água é drenada instantaneamente para as camadas subseqüentes, de acordo com as considerações apresentadas anteriormente por CRUCIANI (1986). Esta faixa delimitada entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo é a capacidade de água disponível do solo, sendo expressa em milímetros, conforme ilustrado na Figura 1.

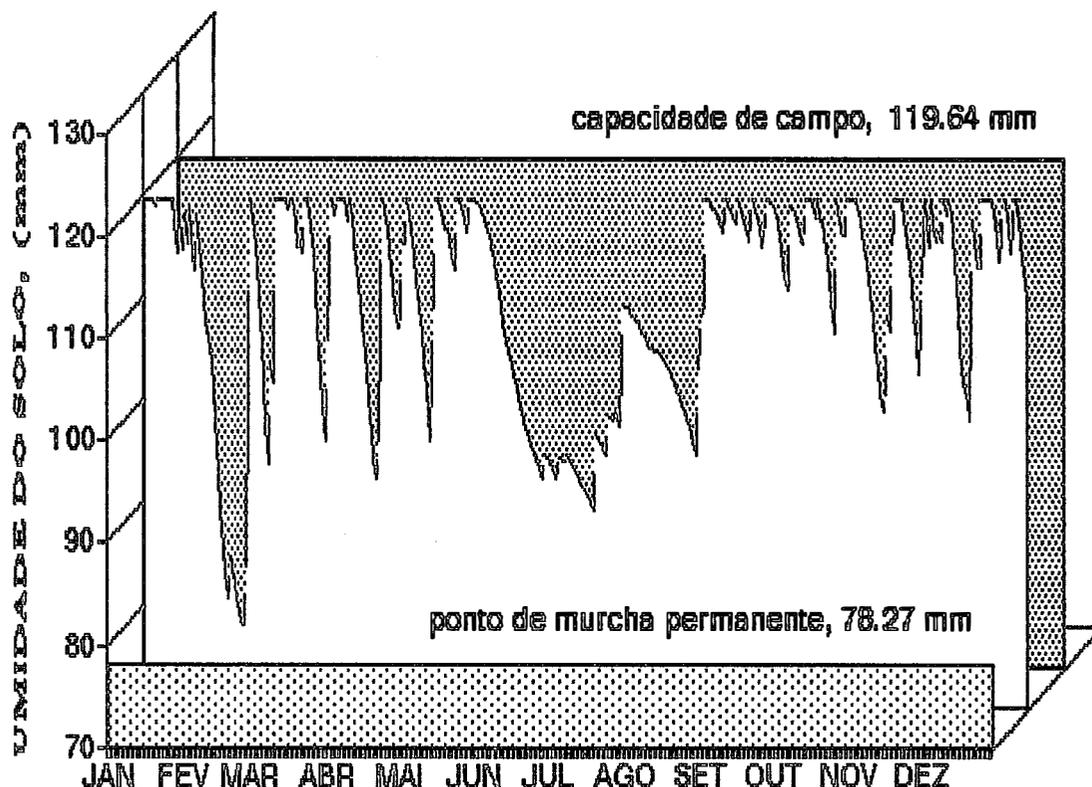


Figura 1. Variação da umidade do solo ao longo do ano de 1990. Profundidade da camada OL = 300 mm. Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.

Para casos isolados de solos que possuem drenagem deficiente ou elevação do lençol freático ao longo do ano, é necessário o conhecimento de seus respectivos coeficientes de drenagem e dos possíveis ganhos por ascensão capilar.

Para uma determinação da variação da umidade do solo entre a capacidade de campo e a saturação, são necessários registros instantâneos dos ganhos e perdas de água ao longo do dia, como por exemplo registros de precipitação fornecidos por pluviógrafos.

Através deste modelo de balanço hídrico, estimou-se, portanto, a capacidade de água disponível no solo (CAD) diariamente, por todo o período observado, de setembro de 1988 a junho de 1991.

3.2.2.2. Método para concepção do modelo não determinístico para a estimativa das condições de tráfego

A partir do pressuposto na hipótese de trabalho, de que um modelo não determinístico estimaria as condições de tráfego em solos agrícolas a partir de um correlacionamento entre as horas de paradas diárias observadas com a variação da umidade do solo, já que existe concordância na variação entre estas variáveis, ilustrado no gráfico da Figura 2 a seguir, concebeu-se o modelo baseando-se no comportamento diretamente proporcional entre estas variáveis.

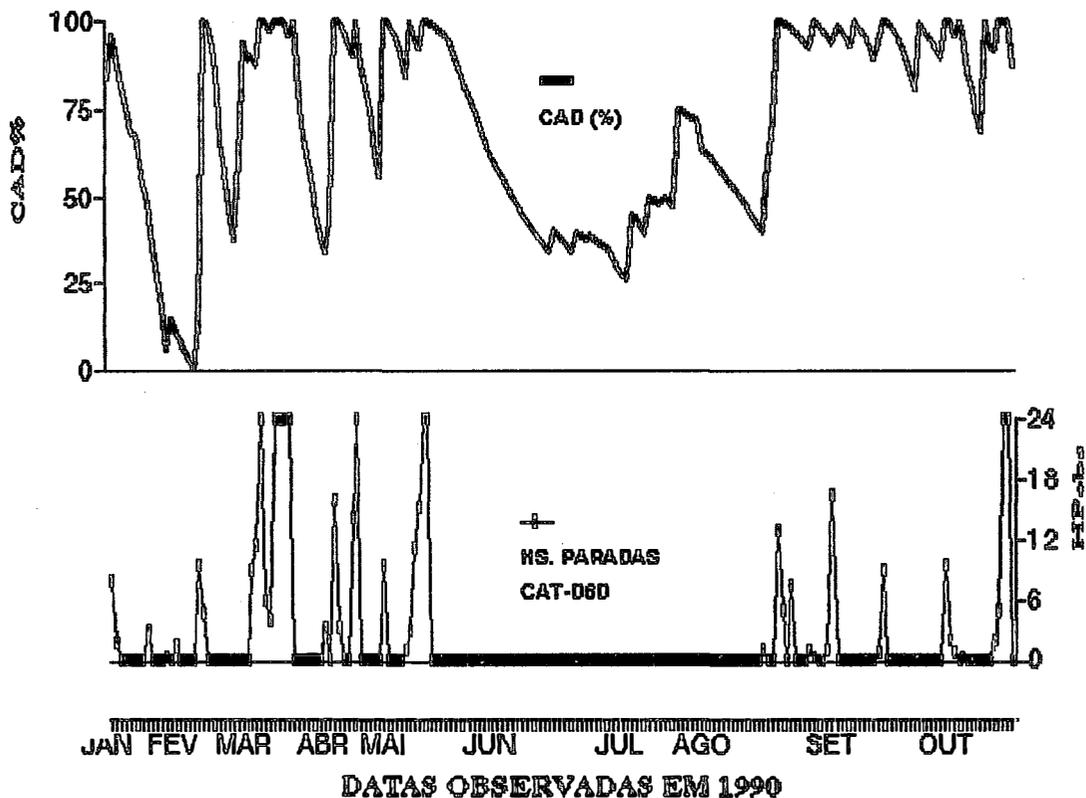


Figura 2. Ilustração da forma de concordância entre as variáveis consideradas para a estimativa feita através do modelo não determinístico.

A ilustração anterior refere-se à variação da umidade do solo na camada OL = 300 mm (Apêndice 2) e das horas paradas por motivos climáticos ocorridas em datas observadas ao longo do ano de 1990 (Apêndice 5), durante a execução de operações pesadas na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria), a qual revela a concordância avultada na hipótese de trabalho. Conforme já descrito anteriormente, tratam-se de datas pelo fato de que os dados observados relativos às operações agrícolas não são contínuas ao longo do ano.

Para se atingir um maior correlacionamento linear entre as variáveis envolvidas, estas foram transformadas, sendo os dados da capacidade de água disponível do solo em média porcentual no decêndio e, quanto as horas paradas, estas foram acrescidas de uma unidade e passadas para escala logarítmica, resultando o equacionamento apresentado a seguir :

$$\log(\Sigma HPD+1) = \frac{\Sigma CAD_n \%}{10} \quad (18)$$

onde:

HPD = horas paradas por decêndio, horas;
 CAD_n% = capacidade de água disponível do solo no dia n, %;
 n = dias do decêndio (1,2,...,10).

Para maior consistência, foram consideradas as médias decendiais da capacidade de água disponível do solo ao longo do período observado, pois não houve um correlacionamento razoável quando se comparou dia a dia estas variáveis, adotando-se, então, os procedimentos preconizados por VON BARGEN *et alii* (1986) e OSKOUI (1986).

Quanto a descontinuidade dos dados de horas paradas das máquinas observadas, desconsiderou-se os dias que não tinham registros, conforme já discutido, sendo adotado o mesmo procedimento quanto aos correspondentes dados de umidade, armazenando estes dados em um arquivo, contendo de forma contínua os dias com o número de horas e paradas, e sua respectiva umidade do solo.

Apesar da referência bibliográfica citada quanto às duas profundidades da camada OL a serem consideradas no balanço hídrico, pelo fato de se estar relevando dois tipos de tráfego em solos agrícolas, foram testadas, inicialmente, diferentes profundidades da camada OL, na tentativa de se verificar qual seria a profundidade cujos valores da variação da média decendial da capacidade de água disponível porcentual do solo melhor se correlacionavam com as respectivas variações das horas paradas por decêndio.

Pode-se observar que as espessuras das camadas superficiais OL que melhor se correlacionaram foram a de 100 mm e 300 mm, para as observações de tráfego simplesmente e, respectivamente, de mobilização do solo, confirmando o que foi considerado a partir dos trabalhos revisados. A gama de variação da espessura da camada superficial OL abrangeu de 5 mm a 500 mm.

3.2.2.3. Método para validação do modelo

A validação do modelo tem grande importância para revelar sua precisão e nortear os estudos em desenvolvimento no sentido de cada vez mais aproximar os resultados reais observados daqueles estimados pelo modelo.

Através do índice de correlação linear avaliou-se o quanto o modelo proposto pode explicar a estimativa das condições de tráfego em solos agrícolas, ao se relacionar linearmente com os dados observados de horas paradas das operações agrícolas consideradas, assim como foi feito por ELLIOT *et alii* (1977), WITNEY *et alii* (1982), BABEIR *et alii* (1986) e VON BARGEN *et alii* (1986).

Os modelos também foram testados através da raiz do quadrado médio das diferenças de horas paradas e das diferenças porcentuais, sendo esta última mais comumente utilizada como parâmetro avaliativo. Trata-se, portanto, de um parâmetro que nada mais é do que uma estimativa do erro global cometido pelo modelo. O cálculo da raiz do quadrado médio (RMS) foi através da seguinte equação :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (HP_{obs} - HP_{est})^2}{n}} \quad (19)$$

onde:

RMS = raiz do quadrado médio da diferença em horas paradas, horas;

HP_{obs} = horas paradas observadas, horas;

HP_{est} = horas paradas estimadas pelo modelo, horas;

n = número de decêndios considerados.

Quanto ao cálculo da raiz do quadrado médio das diferenças percentuais entre os dados observados e aqueles estimados pelo modelo, foi feito através da seguinte equação, tendo-se em vista a equação 19 :

$$RMS\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum \left(1 - \frac{HP_{obs}}{HP_{est}}\right)^2}{n}} \quad (20)$$

onde:

RMS% = raiz do quadrado médio da diferença percentual das horas paradas, %;

4. RESULTADOS DA HIPÓTESE PRELIMINAR

4.1. Estimativas de horas paradas

Para as máquinas que simplesmente trafegavam sobre o solo, realizando a operação de carregamento de cana, obteve-se os seguintes resultados de estimativa das horas paradas por motivo climático, apresentados na Figura 3 a seguir :

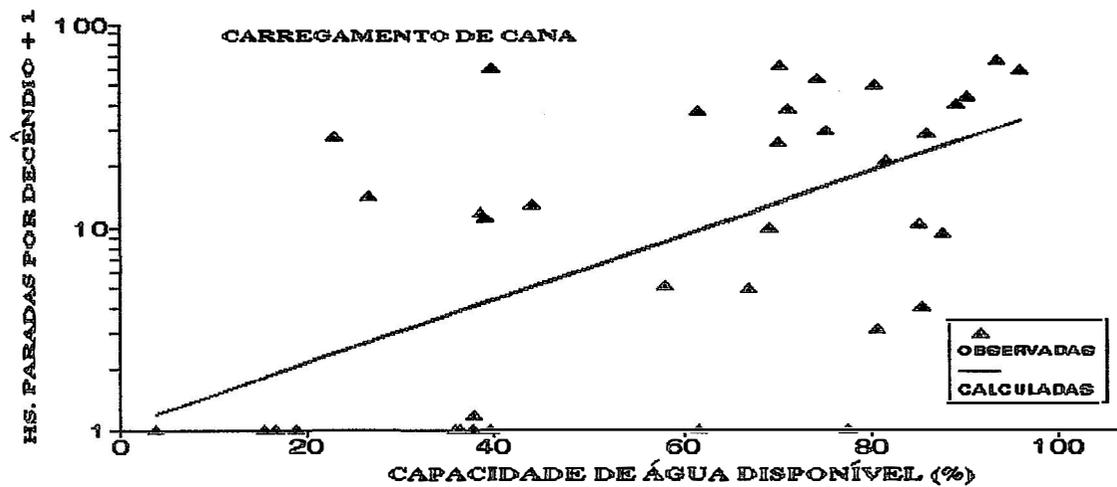


Figura 3. Estimativa decencial das horas paradas durante a operação de carregamento de cana por motivo climático em função da média decencial da capacidade de água disponível porcentual do solo.

De um total de 9.120 horas (38 decêndios) de operação contínua de carregamento de cana, foram observadas um total de 808,86 horas com paralisações por motivo climático e se estimou, através do modelo não determinístico, 442,36 horas.

Pelo índice de correlação linear, este modelo não determinístico explicou 58,20% dos casos ($r = 0,5820$), que é significativo ao nível de 99% de significância, sendo o valor calculado de F igual a 18,44.

Todos os dados, observados e estimados, se encontram no Apêndice 4.

A estimativa do erro global cometido pelo modelo, apresentado na equação 21 a seguir, foi de 23,34 horas, testada através da raiz do quadrado médio das diferenças de horas paradas, sendo que, percentualmente, o erro estimado foi de 306,98%.

$$\log^{(\sum HPD_{cc} + 1)} = 0,02008 + 0,01569 \cdot \frac{\sum CAD_n \%}{10} \quad (21)$$

onde:

HPD_{cc} = horas paradas durante as operações de carregamento de cana por decêndio, horas.

De um total de 11.760 horas (49 decêndios) de operação contínua de mobilização do solo através de tratores de esteira, foram observadas um total de 1.253,76 horas com paralisações por motivo climático e se estimou, através do modelo não determinístico, 761,97 horas.

Pelo índice de correlação linear, este modelo não determinístico explicou 73,66% dos casos ($r = 0.7366$), que é significativo ao nível de 99% de significância, sendo o valor calculado de F igual a 55,77.

Todos os dados, estimados e observados, se encontram no Apêndice 5.

A estimativa do erro global cometido pelo modelo, representado pela equação 22 a seguir, foi de 23,02 horas, testada através da raiz do quadrado médio das diferenças de horas paradas, sendo que, percentualmente, o erro estimado é de 293,76%.

$$\log^{(\Sigma HPD_{ms} + 1)} = -0,18499 + 0,01769 \cdot \frac{\sum CAD_n \%}{10} \quad (22)$$

onde:

HPD_{ms} = horas paradas durante as operações de mobilização do solo por decêndio, horas.

As estimativas relativas às operações pesadas estão apresentadas na Figura 4 a seguir :

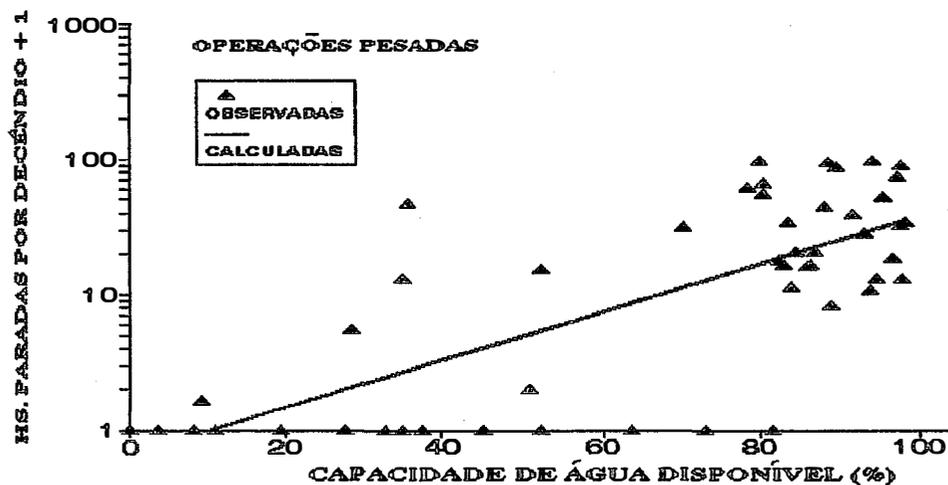


Figura 4. Estimativa decencial das horas paradas durante as operações pesadas de mobilização do solo por motivos climáticos em função da média decencial da capacidade de água disponível porcentual do solo.

Os resultados das estimativas do porcentual das horas paradas por decênio foram transformados no logaritmo das horas paradas mais 1 (um), melhorando o correlacionamento linear das estimativas com as observações realizadas. Nas Figuras 3 e 4 apresentadas, foi utilizado a escala logarítmica no eixo das abscissas, reproduzindo o mesmo efeito da transformação estipulada no modelo.

4.2. Discussão

Nos gráficos das Figuras 3 e 4 anteriores, é possível se observar que uma grande concentração de pontos da estimativa das horas paradas, devidamente transformados, se concentraram entre os valores de 80 e 100% da média decendial da capacidade de água disponível do solo e, simultaneamente, acima de 5% de horas paradas por decêndio, ou melhor, doze horas. Inclusive, estes pontos aglomerados apresentam uma grande variabilidade das horas paradas (no eixo das abscissas), sob médias decendiais da capacidade de água disponível porcentual do solo muito próximas.

Outra concentração de pontos está por todo o eixo das ordenadas, indicando ausência de paralisações mesmo sob elevados níveis da média decendial da capacidade de água disponível porcentual do solo, tanto nas estimativas das condições de tráfego propriamente dito como das condições de operação de mobilização do solo.

Neste caso, estes pontos concentrados no eixo das ordenadas referem-se a períodos do ano em que se verificou um intervalo prolongado entre as precipitações e baixos níveis de evapotranspiração (baixas temperaturas), mantendo a umidade do solo sob os níveis que alcançou com a última precipitação, registrando uma lenta queda durante estes intervalos entre precipitações.

Portanto, conclue-se que as condições de tráfego sobre solos agrícolas nestas circunstâncias aqui apresentadas estão também correlacionadas com a ocorrência e intensidade de precipitação, e não apenas com as características físicas do solo, traduzida pela sua umidade.

Depreende-se, então, que o modelo a ser instituído para a estimativa das condições de tráfego deve ser determinístico, ficando em função destas duas variáveis : precipitação e umidade do solo.

Apesar do modelo não determinístico ter apresentado um razoável índice de correlacionamento linear ($r = 0,7366$), no caso das estimativas das condições de mobilização do solo, seu erro global foi demasiadamente grande, na ordem de 293,76%, sendo também dentro desta ordem de grandeza para o caso das estimativas das condições de tráfego simplesmente, ficando em 306,98%.

De acordo com os trabalhos revisados, nenhum deles apresentou ou sugeriu um modelo não determinístico, estudando as diferenças e erros que se possa cometer estimando estas condições.

Todos aqueles que adotaram critérios baseados exclusivamente na umidade do solo (NATH & JOHSON, 1980; WITNEY *et alii*, 1982; WÖSTEN & BOUMA, 1985; VON BARGEN *et alii*, 1986; MÜLLER *et alii*, 1990; FLORES *et alii*, 1990) conduziram seus trabalhos sob condições controladas ou mesmo laboratoriais, onde o operador não exercia qualquer influência nas operações executadas pelas máquinas, sendo o tráfego sobre o solo função exclusiva das características dinâmicas deste solo, que por sua vez são função da umidade do solo.

Já os autores que conduziram seus trabalhos em condições normais de campo, isto é, situações reais, adotaram também como critério a precipitação, valendo-se de sua ocorrência e intensidade. O que se depreende de ELLIOTT *et alii*, 1977; SEDYAMA *et alii*, 1979; BABEIR *et alii*, 1986; OSKOU, 1986; MEHNER *et alii*, 1988; ASSIS, 1988; ASSIS *et alii*, 1989) é que o HOMEM, operador da máquina agrícola em

observação, interage neste sistema, havendo paralisação das operações agrícolas sob determinados níveis de precipitação, podendo, ou não, a camada de solo em consideração atingir uma umidade tal que não mais proporcionar condições de tráfego.

4.3. Conclusões

Em vista da discussão, presume-se a existência de um sistema definido pelo conjunto homem - máquina, onde a condição de operação sobre solos agrícolas não é função exclusiva da capacidade do solo em proporcionar tração, de acordo com os conceitos de dinâmica de solos. Este sistema é, também, função da ocorrência e intensidade de precipitação, comportando-se de um modo determinístico, isto é, de forma rígida quanto a designação da condições de tráfego em solo agrícola

Conclui-se, finalmente, que se faz necessária a adoção de um modelo determinístico para se estimar as condições de tráfego sobre solos agrícolas em situações reais de campo, seguindo as recomendações dadas por ANDERSON (1983), que propõe um modelo determinístico dotado de um balanço hídrico no contexto de previsão das condições de tráfego em solos, considerando ser o método mais capacitado para resolução destes modelos, pois, conforme já discutido anteriormente, se impõe uma rigidez na determinação das condições de tráfego num determinado dia com a adoção de um modelo determinístico, desprezando-se as possibilidades de se executar operações agrícolas ao longo de um dia, tendo o registro de precipitações feito através de pluviômetros.

5. MÉTODO DEFINITIVO

Diante do exposto, o método a ser utilizado na geração de um modelo determinístico, para estimativa das condições de tráfego em solos agrícolas, continua a incorporar o mesmo balanço hídrico utilizado anteriormente para estimativa da capacidade de água disponível no solo, sendo que sua estrutura de estimativa foi modificada, adaptando-se às características necessárias para a utilização de critérios determinantes das condições de tráfego sobre o solo agrícola em situações reais, conforme se apresenta esquematicamente na Figura 5 a seguir :

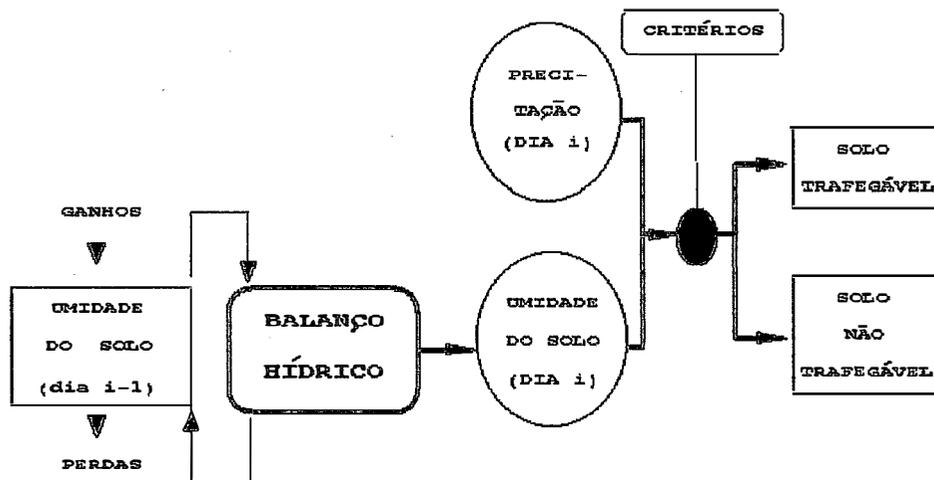


Figura 5. Esquema do modelo determinístico para estimativa das condições de tráfego em solo agrícola.

5.1. Método para concepção do modelo determinístico para a estimativa das condições de tráfego com máquinas agrícolas

Trata-se de um modelo determinístico dependente de critério pré fixado, isto é, suas estimativas diárias das condições de tráfego do solo são rígidas : há ou não há condições do solo em proporcionar condições de tráfego.

A concepção da metodologia foi feita a partir das recomendações e sugestões encontradas nos trabalhos revisados, baseando-se naqueles que conduziram seus trabalhos em condições normais de campo, isto é, em situações reais, os quais adotaram como critérios características não só edáficas do local como também a precipitação, valendo-se de sua ocorrência e intensidade (ELLIOTT *et alii*, 1979; BABEIR *et alii*, 1986; OSKOU, 1986; MEHNER *et alii*, 1988; ASSIS, 1988; ASSIS *et alii*, 1989).

Seguindo a mesma metodologia adotada no modelo não determinístico quanto ao balanço hídrico, assim sendo, consideraram-se as mesmas espessuras da camada superficial OL, sendo de 100 mm e 300 mm, respectivamente para as estimativas das condições de tráfego simplesmente e para as operações de mobilização de solo, conservando o seu fundamento básico : a contabilidade das quantidades de água que entram e saem de uma camada de solo que vai de sua cota superficial O até uma determinada profundidade L.

O balanço hídrico vai atualizando o status de umidade do solo diariamente. A partir do resultado proveniente do balanço e do registro de precipitação diários, o modelo realiza a operação de determinação das condições de tráfego comparando estes dados com os critérios determinísticos selecionados, a partir dos quais este solo não proporcionaria mais condições de tráfego, designando desta forma se este período de 24 horas era impróprio ou não execução da operação agrícola em questão.

Para maior consistência dos dados e com o intuito de utilizar praticamente este modelo em trabalhos de planejamento de operações e dimensionamento de frotas, seguiu-se o mesmo procedimento adotado no modelo não determinístico apresentado anteriormente, fazendo-

se o agrupamento dos resultados destas comparações em tempos regulares ao longo do período estudado, resultando em estimativas do número de horas com condições de tráfego por decêndios, ou seja, horas disponíveis para trabalho com máquinas agrícolas por decêndio, o inverso da forma de apresentação anterior. Além disto, também se agruparam estes resultados por períodos por trinta dias, apresentando as estimativas de horas disponíveis por trintídios.

5.2. Método para determinação dos critérios empregados no modelo determinístico

A definição de critério encontrada na revisão bibliográfica se restringe apenas quanto às características dinâmicas do solo, onde seu estado em proporcionar ou não condições de tráfego é determinado por uma faixa de umidade deste solo (ELLIOTT *et alii*, 1977; BABEIR *et alii*, 1986; WITNEY, 1988; ASSIS *et alii*, 1989).

Sob condições controladas, isto é, em ensaios laboratoriais, somente o critério definido pela umidade do solo foi necessário para as estimativas das condições de tráfego, segundo os trabalhos de NATH & JOHNSON (1980), WITNEY *et alii* (1982), WÖSTEN & BOUMA (1985), VON BARGEN *et alii* (1986), MÜLLER *et alii* (1990) e FLORES *et alii* (1990).

Em condições reais de trabalho no campo, um segundo critério foi considerado: trata-se de um nível mínimo de ocorrência de precipitação acima do qual não há designação de proporcionalidade das condições de tráfego sobre solo agrícola (ELLIOTT *et alii*, 1977; SEDIYAMA *et alii*, 1979; BABEIR *et alii*, 1986; OSKOU, 1986; MEHNER *et alii*, 1988; ASSIS, 1988 e ASSIS *et alii*, 1989).

Alguns autores não só consideraram a ocorrência e a precipitação no dia para aplicação do critério determinístico, como também uma combinação da ocorrência e intensidade de precipitações nos dias anteriores (SEDIYAMA *et alii*, 1979; BABEIR *et alii*, 1986; ASSIS, 1988 e ASSIS *et alii*, 1989), chegando ao caso extremo de HETZ & RIQUELME (1989), onde em seu trabalho somente a precipitação e suas combinações

de intensidade e ocorrência em períodos anteriores foram consideradas para determinação de condições de tráfego sobre solos agrícolas.

Tal procedimento adotado por estes autores pode proporcionar grande precisão e utilidade prática em estimativas das condições de tráfego, sendo exclusivos, porém, para a localidade estudada, já que o regime pluviométrico local seria o principal fator determinante das combinações adotadas.

Isto impossibilitaria o uso deste critério em outras regiões se não aquela em que foi considerada pelos referidos autores. Portanto, este procedimento não foi adotado no presente trabalho, pois sua proposição inicial é a aplicação do modelo para qualquer localidade e que os critérios possam ser estabelecidos de forma generalizada sob quaisquer circunstâncias, mesmo sem subsídios para a avaliação da precisão das estimativas.

OSKOU (1986) considerou que a ocorrência e intensidade de precipitação do dia deveria ser privilegiada em relação ao critério referente a umidade do solo, devendo este último ser aplicado em segunda instância, porém sem desprezá-lo.

Isto pode ser explicado pelo fato de que no sistema homem - máquina a ocorrência e a quantidade de precipitação estão diretamente relacionadas com a exequibilidade do trabalho humano, independente da umidade do solo.

Assim sendo, a sintaxe de aplicação dos critérios determinísticos considerados no modelo proposto, consistiu no seguinte :

Comparava-se, inicialmente se no dia em questão ocorreu precipitação com uma intensidade menor que um volume pré determinado (aplicação do critério baseado na precipitação), se positivo, o solo neste dia era designado como capaz de proporcionar condições de tráfego (24 horas com condições de tráfego), independentemente da umidade do solo contida neste dia.

Do contrário, verificava-se se esta umidade era menor que um porcentual pré determinado da capacidade de água disponível deste solo (aplicação do critério baseado na umidade do solo), se positivo, o solo neste dia era designado como capaz de proporcionar condições de tráfego (24 horas disponíveis para tráfego), se negativo, não haveria tais

condições em relação ao solo (zero hora disponível para tráfego).

Através de cálculos de simulação em microcomputador, testaram-se os níveis de precipitação utilizados nos referidos trabalhos revisados, ajustando desta forma o nível que melhor correlacionou os resultados das estimativas com os dados observados.

Observa-se na prática que, após alguns dias sem precipitação e/ou irrigação, os solos agrícolas sob tráfego ou mobilização formam sob sua superfície uma fina camada desestruturada (pó), principalmente em se tratando de solos argilosos como neste caso.

A ocorrência de precipitação, na ordem de alguns milímetros sobre este local nestas condições, é suficiente para tornar impraticável o tráfego e/ou a mobilização. Esta fina camada atinge rapidamente seu ponto de liquidez, quando desestruturado e umedecido, não permitindo a movimentação de máquinas sem excessiva patinagem, pois se torna lama e se adere a toda banda de rodagem do rodado.

A camada superficial (OL), considerada no balanço hídrico, se encontra nestas circunstâncias com uma umidade inferior ao critério estipulado referente a umidade do solo, pois a quantidade de ganho de água não é suficiente para tanto, conforme pode-se constatar no confronto com os dados reais observados. Sem a aplicação do critério do nível mínimo de precipitação não há como se estimar as condições de tráfego em situações como esta, freqüentes nos períodos de índices pluviométricos reduzidos e esparsos durante o ano.

Além desta situação, deve-se considerar as condições de operacionalidade das máquinas envolvidas no sistema: a existência de toldos protetores ou cabines, a operação agrícola em execução, hábitos dos operadores, ordens gerenciais e outras mais que possam influenciar na designação das condições de tráfego. Este critério pode ter seu valor exclusivamente arbitrado a partir de uma análise de ordem gerencial, baseando-se nestas ou outras considerações que se fizerem necessárias.

Estes critérios variam de solo para solo, de máquina para máquina e de gerente para gerente, ficando irreal a adoção de um único valor de umidade do solo ou do nível mínimo de precipitação para se determinar quando este solo proporciona ou não condições de tráfego para máquinas agrícolas (WITNEY, 1988). Desta forma, procurou-se não só

considerar um critério relativo a precipitação e um relativo a umidade do solo, dentro daquilo que foi preconizado por este autor.

O critério relativo a umidade do solo também teve sua determinação auxiliada pelos cálculos de simulação em microcomputador, realizados simultaneamente com os cálculos anteriores, referentes a determinação do critério baseado em níveis pluviométricos.

A metodologia sugerida por FLORES *et alii* (1990), baseada nas características dinâmicas do solo, foi a adotada para subsidiar a determinação da ordem de grandeza da umidade do solo, de forma que o critério inicialmente testado seria a umidade coincidente com aquela que proporcionasse a tensão máxima de cisalhamento deste.

Segundo estes autores, acima desta umidade o solo não proporcionaria condições de tráfego sem que não houvesse excessiva patinagem e compactação, além de que sua mobilização feita através de implementos agrícolas não produziria resultados satisfatórios. O solo passaria a ter um comportamento cada vez mais plástico, indo ao estado de liquidez com o aumento da quantidade de umidade, até chegar ao seu ponto de saturação. Não mais se esboroando ao ser mobilizado, o solo se molda ou se deixa fluir com a passagem de uma ferramenta agrícola, apresentando baixa resistência à penetração apontada pela diminuição do índice de cone médio (I_c) acima da referida umidade.

Com relação a estas características dinâmicas do solo na área em questão, através do "sheargraph" de Cohron foram realizadas as determinações do ângulo de atrito interno do solo (Φ), sob condições de cisalhamento máximo e, através do penetrógrafo de mola, se determinaram os índices de cone médio (I_c), ambos sob diferentes umidades do solo na área em estudo, as quais também foram amostradas junto aos pontos de mensuração das referidas determinações. Estes equipamentos foram previamente calibrados, de acordo com o método preconizado por MIALHE, 1983. Todas estas determinações consistiram em amostragens feitas de acordo com as recomendações estatísticas de praxe referentes a procedimentos similares em condições de campo.

Tomou-se o valor da umidade correspondente a maior tensão de cisalhamento do solo ($\tau_{máx}$) como referência nos cálculos de simulação, onde, a partir de sua ordem de grandeza, se adotou o valor

que melhor precisão dava ao modelo, medido simultaneamente pelo índice de correlação e pelo erro global estimado, seguindo o mesmo procedimento de validação utilizado no modelo não determinístico anterior.

Quanto aos índices de cone médio (I_c), estes foram empregados no modelo de simulação da eficiência de tração de WISMER & LUTH (1972), estimando-se o desempenho de tratores sob diferentes umidades do solo.

Procurou-se, então, verificar como se comportava o desempenho do trator com o solo na mesma umidade determinada pelo método preconizado por FLORES *et alii* (1990), adotada como referência para este critério determinístico, plotando-se os resultados das estimativas da eficiência de tração com o índice de mobilidade do solo, destacando-se, graficamente, a faixa correspondente a capacidade de água disponível deste para melhor compreensão.

Somente foi considerado trator de pneu nestes cálculos, já que o modelo de WISMER & LUTH (1972) só se refere a este tipo de trator, adotando-se um trator representativo para a frota de carregamento de cana em observação (pesos e medidas vide Apêndice 3).

Portanto, a partir dos modelos propostos por estes autores, que consideraram tanto a ocorrência e intensidade de precipitação como a umidade do solo, e diante de tudo aquilo que foi exposto, adotou-se a faixa de intensidade de precipitação entre 5,0 e 10,0 mm e a ordem de grandeza da umidade em que o solo apresentasse o ponto de máxima tensão de cisalhamento ($\tau_{máx}$), observando a estimativa da eficiência de tração, como parâmetros de simulação para ajuste destes critérios determinísticos das estimativas das condições de tráfego em solos agrícolas, a cada dia da localidade em questão dentro do período estudado de setembro de 1988 a junho de 1991.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Critérios relativos a umidade do solo

Segundo a metodologia apresentada no ítem 5.2 e invocando as recomendações de FLORES *et alii* (1990), constituiu-se uma superfície de resposta da tensão de cisalhamento, apontando a umidade e de 29,27% no ponto de máxima tensão de cisalhamento sob qualquer nível de pressão normal, conforme Apêndices 7 e 8 e demonstrado na Figura 6 a seguir :

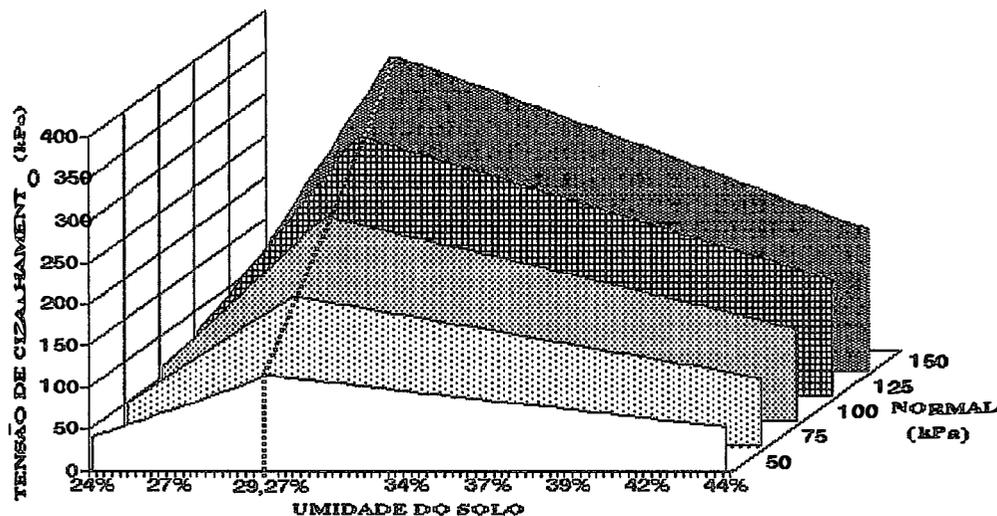


Figura 6. Superfície de resposta da tensão de cisalhamento do solo em relação a umidade e a pressão normal. Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.

Determinando, assim, a ordem de grandeza do critério relativo a umidade do solo, ficando em 88,75% da capacidade de campo para este solo.

Todos os critérios encontrados na revisão bibliográfica, relativos a umidade do solo, adotam como referência para o critério determinístico das condições de tráfego a umidade relativa a capacidade de campo do solo, variando este valor de 0,8 a 1,15.

A partir da determinação dos índices de cone médio sob diferentes umidades do solo da área em estudo (Apêndice 8) e do modelo proposto por WISMER & LUTH (1972), simulou-se o desempenho de tratores sob as condições reais consideradas, destacando-se a faixa da capacidade de água disponível do solo em questão. Preliminarmente, estimou-se o índice de mobilidade através da equação 4, conforme a Figura 7 a seguir:

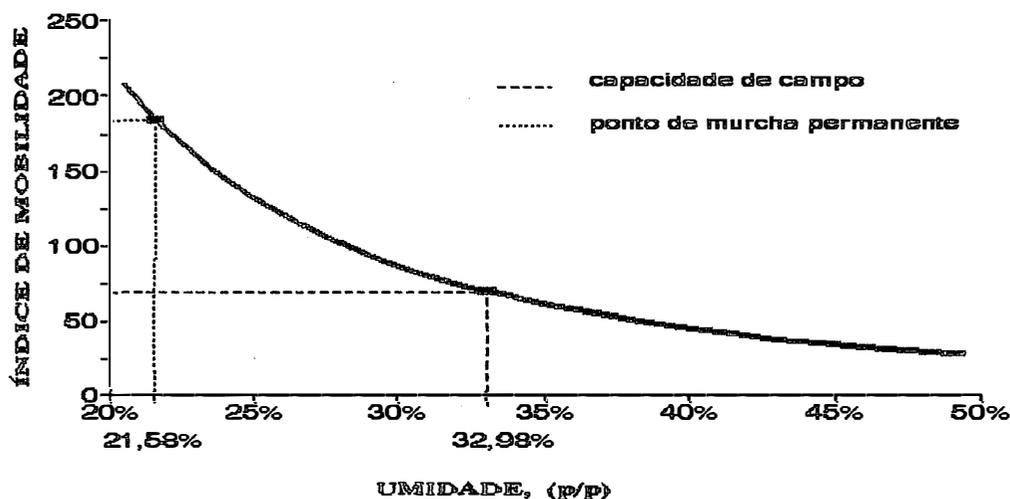


Figura 7. Variação do índice de mobilidade em relação a umidade do solo da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.

A faixa relativa a capacidade de água disponível do solo está entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, faixa esta onde se compreende o balanço hídrico do solo em sua camada superficial (OL) considerada.

Em seguida, através da equação 5, estimou-se as curvas da eficiência de tração em relação ao índice de mobilidade, sob quatro níveis de patinagem, onde indiretamente pode-se observar a variação do desempenho do trator em relação a umidade do solo, destacando-se, para tanto, a faixa de umidade contida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, ou seja, a capacidade de água disponível do solo, conforme se apresenta na Figura 8 a seguir :

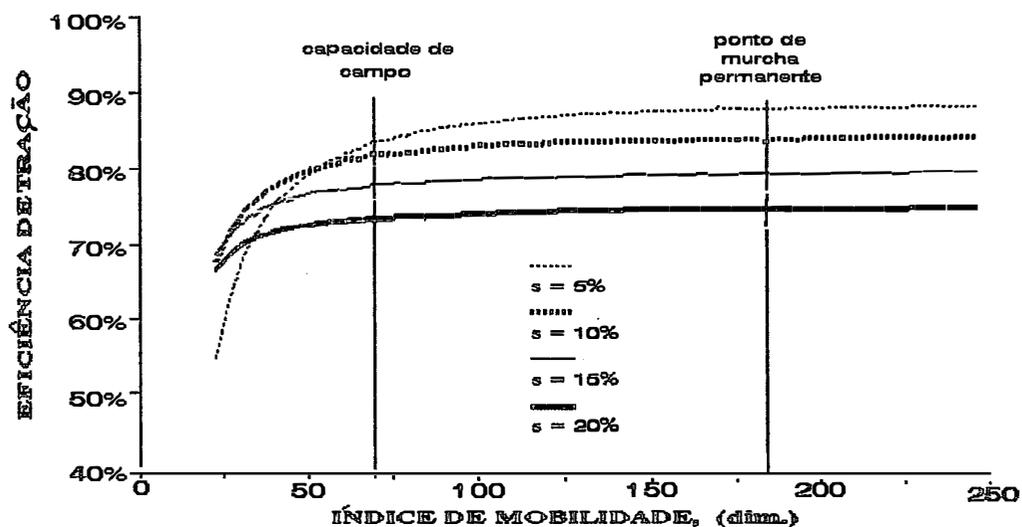


Figura 8. Estimativa da eficiência de tração através do modelo de WISMER & LUTH (1972), considerando quatro níveis de patinagem (s).

Para obtenção destes resultados foi considerado apenas um tipo representativo de trator de pneu, conforme a metodologia adotada.

Mesmo não possibilitando se repetir tal procedimento para análises e discussões em relação aos tratores de esteiras, utilizados nas operações pesadas de mobilização do solo, adotou-se a mesma umidade

como referência ao critério a ser aplicado nas estimativas das condições deste tipo de tráfego em solos agrícolas, face a indistinção quanto ao tipo de rodado a que se aplica a metodologia preconizada por FLORES *et alii* (1990).

A partir da análise da Figura 8 depreende-se que acima da capacidade de campo do solo, a eficiência tratória apresenta uma queda acentuada, independentemente do nível de patinhagem considerado. Os níveis de patinhagem em torno de 10% são os que normalmente ocorrem durante operações normais de campo (WITNEY, 1988).

Portanto, a faixa de umidade entre 88 e 100% da capacidade de água disponível do solo foi adotada como referência para as simulações empregadas para o ajuste dos critérios determinísticos do modelo, coincidindo com os valores encontrados nos trabalhos revisados, não ultrapassando, porém, a umidade máxima de 100% da capacidade de água disponível do solo, isto é, a umidade à sua capacidade de campo, teto máximo da faixa em que se realiza o balanço hídrico do solo considerado neste modelo.

6.2. Critérios relativos a precipitação

De acordo com a metodologia, a faixa a ser considerada nos cálculos de simulação para ajuste do critério referente a ocorrência e intensidade de precipitação para cada dia está entre 5,0 e 10,0 mm.

6.3. Ajuste dos critérios determinísticos

Estabelecida a faixa de valores que os critérios determinísticos podem assumir, deu-se início aos cálculos de simulação para se determinar qual o valor que melhor resultado proporcionaria para as estimativas das condições de tráfego no solo da área em questão, através de aproximações sucessivas.

Em primeiro lugar se fixou a umidade em 88,0% da capacidade de água disponível do solo (CAD), e foi-se elevando o volume

de precipitação, partindo-se do patamar inferior de 5,0 mm estabelecido no item anterior.

Os critérios definitivamente adotados foram aqueles que proporcionaram ao modelo estimar o número de horas em que o solo proporcionou condições de tráfego satisfatórias, sejam elas agrupadas em decêndios e/ou em trintídios, quando comparadas às horas observadas em que o solo proporcionou realmente condições de tráfego, respectivamente agrupadas da mesma forma.

A avaliação da melhor combinação, entre o critério baseado na ocorrência e intensidade de precipitação e o critério referente a umidade do solo, tomou como base a menor estimativa do erro global cometido pelo modelo, porcentualmente e em número de horas por período decendial e trintidial, e pelo maior índice de correlação linear, indicando a porcentagem em que o modelo consegue estimar em relação aos dados observados, devidamente testado pelo teste F ao nível de 99% de significância.

Inicialmente, foram simulados os valores tomados como referência aos critérios relativos às estimativas das condições de tráfego relacionadas com a operação de carregamento de cana, considerando os 380 dias (9.120 horas) contínuos de observação desta frente de serviço, obtendo-se 38 decêndios e 12 trintídios, sendo desprezados neste último caso os vinte dias finais, de forma a não prejudicar estatisticamente a comparação das estimativas agrupadas da mesma forma que os dados observados, não comprometendo, portanto, as conclusões finais.

Nas Tabelas 4 e 5 a seguir, apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações efetuadas no modelo, referentes ao período de setembro de 1988 a junho de 1991, totalizando 8.311,14 horas úteis observadas, sendo os critérios adotados para as estimativas referentes a operação de carregamento de cana foram, quanto a precipitação, 6,8 mm e quanto a umidade do solo, 100% ou seja, o solo na sua capacidade de campo, tanto para as estimativas decendiais como as trintidiais (combinação nº 12) :

Tabela 4. Selecionamento dos critérios determinísticos para tráfego de carregadoras a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos decendiais.

nº	P (mm)	CAD %	RMS		r	F		Horas
			%	horas				Totais Estimadas
1	5,0	88,0	15,28%	20,98	0,851	94,50	**	7.992,0
2	5,5	88,0	14,74%	20,21	0,832	80,70	**	8.040,0
3	6,0	88,0	11,76%	17,92	0,858	100,08	**	8.064,0
4	7,0	88,0	9,72%	16,70	0,794	61,23	**	8.256,0
5	8,0	88,0	10,65%	19,71	0,693	33,17	**	8.376,0
6	7,5	88,0	9,90%	17,18	0,776	54,49	**	8.280,0
7	6,5	88,0	9,37%	15,69	0,841	87,12	**	8.184,0
8	6,7	88,0	9,16%	15,35	0,837	84,31	**	8.208,0
9	6,8	88,0	9,11%	15,22	0,841	86,72	**	8.232,0
10	6,9	88,0	9,72%	16,70	0,794	61,23	**	8.256,0
11	6,8	95,0	7,20%	13,21	0,869	110,65	**	8.256,0
12	6,8	100,0	7,01%	12,73	0,879	122,73	**	8.280,0

Tabela 5. Selecionamento dos critérios determinísticos para tráfego de carregadoras a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos trintidiais.

nº	P (mm)	CAD %	RMS		r	F		Horas
			%	horas				Totais Estimadas
1	5,0	88,0	10,13%	52,11	0,883	35,30	**	7.992,0
2	5,5	88,0	9,72%	49,64	0,851	26,22	**	8.040,0
3	6,0	88,0	8,15%	43,85	0,875	32,71	**	8.064,0
4	7,0	88,0	6,32%	35,84	0,806	18,51	**	8.256,0
5	8,0	88,0	7,66%	46,77	0,638	6,87		8.376,0
6	7,5	88,0	6,58%	37,81	0,768	14,40	**	8.280,0
7	6,5	88,0	6,80%	38,49	0,819	20,32	**	8.184,0
8	6,7	88,0	6,37%	36,05	0,825	21,23	**	8.208,0
9	6,8	88,0	6,12%	34,35	0,836	23,26	**	8.232,0
10	6,9	88,0	6,32%	35,84	0,806	18,51	**	8.256,0
11	6,8	95,0	4,95%	29,12	0,862	29,02	**	8.256,0
12	6,8	100,0	4,72%	27,77	0,863	29,13	**	8.280,0

Conforme se pode observar nas Tabelas 4 e 5 anteriores, a estimativa do erro global e o índice de correlação apresentados pelo modelo se elevaram com o aumento do critério relativo a precipitação a partir da referência de 5,0 mm adotada na metodologia, atingindo os melhores resultados em 6,8 mm em ambos os períodos agrupados para estimativa (decendial e trintidial), e, finalmente, ajustando o critério relativo a umidade do solo, o modelo teve sua precisão maximizada na umidade de 100% da capacidade de água disponível do solo, ou o mesmo que o solo em sua capacidade de campo (combinação nº 12).

Muito embora se possa observar que o índice de correlação linear se eleve a medida em que se vai ajustando os critérios em busca de maior precisão por parte das estimativas geradas pelo modelo, através do teste do qui-quadrado pode-se afirmar que as combinações entre os critérios testados de 1 a 12 conferem a mesma precisão ao modelo, ao nível de 99% de significância, exceto a combinação de nº 5 referente às estimativas trintidiais, cujo índice de correlação (r) não é significativo.

Portanto, a adoção da combinação nº 12, entre a precipitação e a umidade do solo, tem seu propósito em função dela apresentar a menor estimativa do erro global, não se podendo, portanto, se basear a escolha exclusivamente a partir do índice de correlação.

Na Tabela 6 a seguir, apresentam-se os valores calculados de qui-quadrados (X_c^2), respectivamente para os índices de correlação obtidos entre as estimativas e os dados observados agrupados em períodos decendiais e, respectivamente, trintidiais, sendo todos inferiores a 6,64, valor correspondente ao limite unilateral de qui-quadrado em tabela (X_t^2), com 1 grau de liberdade e 1% de probabilidade:

Tabela 6. Teste do qui-quadrado para os índices de correlação das estimativas das condições de tráfego de carregadoras.

- 38 períodos decendiais :					
nº	r	F		U_2	Xc^2
1	0,851	94,50	**	1,26	0,22
2	0,832	80,70	**	1,19	0,56
3	0,858	100,08	**	1,28	0,14
4	0,794	61,23	**	1,08	1,49
5	0,693	33,17	**	0,85	4,73
6	0,776	54,49	**	1,04	1,99
7	0,841	87,12	**	1,23	0,38
8	0,837	84,31	**	1,21	0,46
9	0,841	86,72	**	1,22	0,39
10	0,794	61,23	**	1,08	1,49
11	0,869	110,65	**	1,33	0,04
12	0,879	122,73	**		
$U_1(r_{12}) =$				1,37	
- 12 períodos trintidiais :					
nº	r	F		U_2	Xc^2
1	0,883	35,30	**	1,39	0,03
2	0,851	26,22	**	1,26	0,01
3	0,875	32,71	**	1,35	0,01
4	0,806	18,51	**	1,11	0,16
5	0,638	6,87		0,76	1,36
6	0,768	14,40	**	1,02	0,37
7	0,819	20,32	**	1,15	0,10
8	0,825	21,23	**	1,17	0,08
9	0,836	23,26	**	1,21	0,04
10	0,806	18,51	**	1,11	0,16
11	0,862	29,02	**	1,30	0,00
12	0,863	29,13	**		
$U_1(r_{12}) =$				1,30	

Em seguida, foram simulados da mesma forma os valores tomados como referência aos critérios relativos às estimativas das condições de tráfego relacionadas com as operações de mobilização do solo (operações pesadas).

Considerando os 495 dias (11.880 horas) contínuos de observação desta frente de serviço, obteve-se 49 decêndios e 16 trintídios, sendo desprezados para tanto, respectivamente, os cinco últimos dias no primeiro caso e, para o último, quinze dias, de forma a não prejudicar estatisticamente a comparação das estimativas agrupadas da mesma forma que os dados observados, não comprometendo, portanto, as conclusões finais.

Nas Tabelas 7 e 8 a seguir, apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações efetuadas, referentes ao período de observação de setembro de 1988 a junho de 1991, totalizando 10.626,24 horas úteis observadas :

Tabela 7. Selecionamento dos critérios determinísticos de mobilização do solo a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos decendiais.

nº	P (mm)	CAD %	RMS		r	F	Horas Totais Estimadas
			%	horas			
1	5,0	88,0	15,85%	22,97	0,819	95,90	** 10.152,00
2	6,0	88,0	11,30%	19,77	0,829	103,31	** 10.248,00
3	7,0	88,0	9,65%	17,50	0,829	103,05	** 10.488,00
4	8,0	88,0	8,83%	17,13	0,822	98,19	** 10.608,00
5	9,0	88,0	8,41%	16,60	0,832	105,59	** 10.728,00
6	10,0	88,0	8,91%	17,95	0,821	97,51	** 10.920,00
7	9,7	88,0	8,93%	17,73	0,814	92,12	** 10.824,00
8	9,5	88,0	8,38%	16,53	0,835	108,25	** 10.752,00
9	9,1	88,0	8,38%	16,53	0,835	108,25	** 10.752,00
10	9,1	90,0	8,73%	17,40	0,817	94,31	** 10.776,00
11	9,1	100,0	8,84%	17,68	0,815	92,90	** 10.824,00

Tabela 8. Selecionamento dos critérios determinísticos de mobilização do solo a partir do índice de correlação (r) e da estimativa do erro global (RMS) - períodos trintidiais.

nº	P (mm)	CAD %	RMS			F		Horas Totais Estimadas
			%	horas	r			
1	5,0	88,0	9,72%	58,05	0,823	31,58	**	10.152,00
2	6,0	88,0	7,50%	47,23	0,850	39,02	**	10.248,00
3	7,0	88,0	5,76%	35,62	0,876	49,51	**	10.488,00
4	8,0	88,0	5,07%	30,96	0,898	62,76	**	10.608,00
5	9,0	88,0	4,16%	24,34	0,951	141,65	**	10.728,00
6	10,0	88,0	6,04%	33,56	0,955	157,13	**	10.920,00
7	9,7	88,0	4,85%	27,20	0,957	161,68	**	10.824,00
8	9,5	88,0	3,92%	22,36	0,964	198,70	**	10.752,00
9	9,1	88,0	3,92%	22,36	0,964	198,70	**	10.752,00
10	9,1	90,0	4,64%	25,97	0,950	138,89	**	10.776,00
11	9,1	100,0	4,75%	26,84	0,952	144,58	**	10.824,00

Os critérios adotados para as estimativas referentes a operação de mobilização do solo foram, quanto a precipitação, de 9,1 mm e quanto a umidade do solo, 88,0%, sendo este último coincidindo com a ordem de grandeza da umidade determinada pelo método de FLORES *et alii* (1990).

Tanto para as estimativas decendiais como as trintidiais as combinações de número 8 e 9 foram aquelas que proporcionaram o melhor ajuste de precisão ao modelo, mesmo variando o critério de precipitação entre 9,1 e 9,5 mm.

A justificativa pela adoção do volume de precipitação menor, igual a 9,1 mm, se deve pelo fato de que à medida em que se vai incrementando este critério, o modelo tende a superestimar suas

estimativas. Desta forma, portanto, se resguardaria a precisão no planejamento de operações e projetos de dimensionamento de frotas futuros relativos a área em questão, baseando-se nas estimativas geradas por este modelo.

Quanto ao critério referente a umidade do solo, acima do valor de 88,0% adotado também faz com que o modelo superestime seus resultados, elevando as estimativas do erro global e diminuindo, respectivamente, seus índices de correlação.

Da mesma forma que as discussões anteriores referente às operações de carregamento de cana, observa-se que também neste caso, o índice de correlação se eleva a medida em que se vai ajustando os critérios em busca de maior precisão por parte das estimativas geradas pelo modelo, porém em todas as combinações e em ambas as circunstâncias de agrupamento em períodos regulares, todos os índices são significativos, ao nível de 99%, e através do teste do qui-quadrado em relação a estes índices, pode-se afirmar que todas combinações conferem a mesma precisão ao modelo, adotando-se, portanto, a combinação que apresentou a menor estimativa de erro global, a de nº 9.

Na Tabela 9 a seguir, apresentam-se os valores calculados de qui-quadrados (Xc^2), respectivamente para os índices de correlação obtidos entre as estimativas e os dados observados agrupados em períodos decendiais e, respectivamente, trintidiais, sendo todos inferiores a 6,64, valor correspondente ao limite unilateral de qui-quadrado em Tabela (Xt^2), com 1 grau de liberdade e 1% de probabilidade:

Tabela 9. Teste do qui-quadrado para índices de correlação das estimativas das condições de mobilização em solo agrícola.

- 49 períodos decendiais :					
nº	r	F		U_2	Xc^2
1	0,819	95,90 **		1,15	0,06
2	0,829	103,31 **		1,19	0,01
3	0,829	103,05 **		1,18	0,01
4	0,822	98,19 **		1,16	0,04
5	0,832	105,59 **		1,19	0,00
6	0,821	97,51 **		1,16	0,04
7	0,814	92,12 **		1,14	0,10
8	0,835	108,25 **		1,20	0,00
9	0,835	108,25 **			
10	0,817	94,31 **		1,15	0,07
11	0,815	92,90 **		1,14	0,09
$U_1(r_{12}) =$				1,20	
- 16 períodos trintidiais :					
nº	r	F		U_2	Xc^2
1	0,823	31,58 **		1,17	4,54
2	0,850	39,02 **		1,26	3,63
3	0,876	49,51 **		1,36	2,70
4	0,898	62,76 **		1,46	1,89
5	0,951	141,65 **		1,84	0,17
6	0,955	157,13 **		1,89	0,08
7	0,957	161,68 **		1,90	0,06
8	0,964	198,70 **		2,00	0,00
9	0,964	198,70 **			
10	0,950	138,89 **		1,83	0,19
11	0,952	144,58 **		1,85	0,15
$U_1(r_{12}) =$				2,00	

6.4. Estimativas das condições de tráfego

Determinado os critérios a serem aplicados nas estimativas das condições de tráfego, apresentam-se a seguir os resultados obtidos referentes as duas frentes de serviços observadas no período de setembro de 1988 a junho de 1991, pertencentes a Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria), a saber :

6.4.1. Carregamento de cana

As estimativas das condições de tráfego simplesmente, compreenderam nesta frente 38 decêndios e 12 trintídios dentro do período total de observação, concordando de forma contínua com os mesmos dias em que se registraram os apontamentos referentes a esta operação.

Apresenta-se a seguir, nas Tabelas 10 e 11, as estimativas geradas pelo modelo determinístico :

Tabela 10. Horas úteis para carregamento de cana por decêndio : estimadas x observadas.

Decêndio	Horas		$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
	estimadas	observadas		
1	240,00	240,00	0,00	0,00
2	240,00	240,00	0,00	0,00
3	240,00	213,50	0,01	702,17
4	240,00	237,00	0,00	9,00
5	240,00	240,00	0,00	0,00
6	240,00	240,00	0,00	0,00
7	240,00	240,00	0,00	0,00
8	192,00	180,79	0,00	125,62
9	240,00	240,00	0,00	0,00
10	240,00	229,84	0,00	103,16
11	192,00	191,05	0,00	0,90

Tabela 10. continuação :

Decêndio	Horas		$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
	estimadas	observadas		
12	192,00	182,00	0,00	99,92
13	192,00	188,42	0,00	12,84
14	192,00	203,39	0,00	129,69
15	240,00	237,88	0,00	4,51
16	240,00	240,00	0,00	0,00
17	168,00	142,68	0,02	641,35
18	216,00	229,25	0,00	175,51
19	240,00	240,00	0,00	0,00
20	240,00	240,00	0,00	0,00
21	240,00	235,81	0,00	17,54
22	216,00	231,75	0,01	248,10
23	240,00	236,00	0,00	15,99
24	240,00	240,00	0,00	0,00
25	192,00	178,90	0,00	171,71
26	192,00	197,15	0,00	26,50
27	240,00	230,62	0,00	87,92
28	216,00	220,12	0,00	17,00
29	192,00	212,35	0,01	414,20
30	240,00	231,00	0,00	81,00
31	144,00	174,87	0,05	953,18
32	240,00	239,83	0,00	0,03
33	168,00	201,25	0,04	1.105,54
34	192,00	203,91	0,00	141,76
35	192,00	215,08	0,01	532,89
36	216,00	228,29	0,00	151,11
37	216,00	211,33	0,00	21,77
38	240,00	227,07	0,00	167,28
Totais	8.280,00	8.311,14	RMS: 7,01%	12,73hs
r = 0,879				
F = 122,73 **				

Tabela 11. Horas úteis para carregamento de cana por trintídio :
estimadas x observadas

Trintídio	Horas		$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
	estimadas	observadas		
1	720,00	693,50	0,00	702,17
2	720,00	717,00	0,00	9,00
3	672,00	660,79	0,00	125,62
4	624,00	602,90	0,00	445,35
5	624,00	629,68	0,00	32,27
6	624,00	611,92	0,00	145,85
7	720,00	715,81	0,00	17,54
8	696,00	707,75	0,00	138,13
9	624,00	606,67	0,00	300,43
10	648,00	663,48	0,00	239,48
11	552,00	615,96	0,01	4.090,57
12	600,00	647,28	0,01	2.235,74
Subtot.	7.824,00	7.872,74	RMS: 4,72%	27,77hs
$r = 0,863$				
$F = 29,13 **$				
20 dias	456,00	438,40		
Totais	8.280,00	8.311,14		

A partir destes resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11, constituiu-se a Figura 9 a seguir, permitindo a visualização gráfica das estimativas e as observações realizadas :

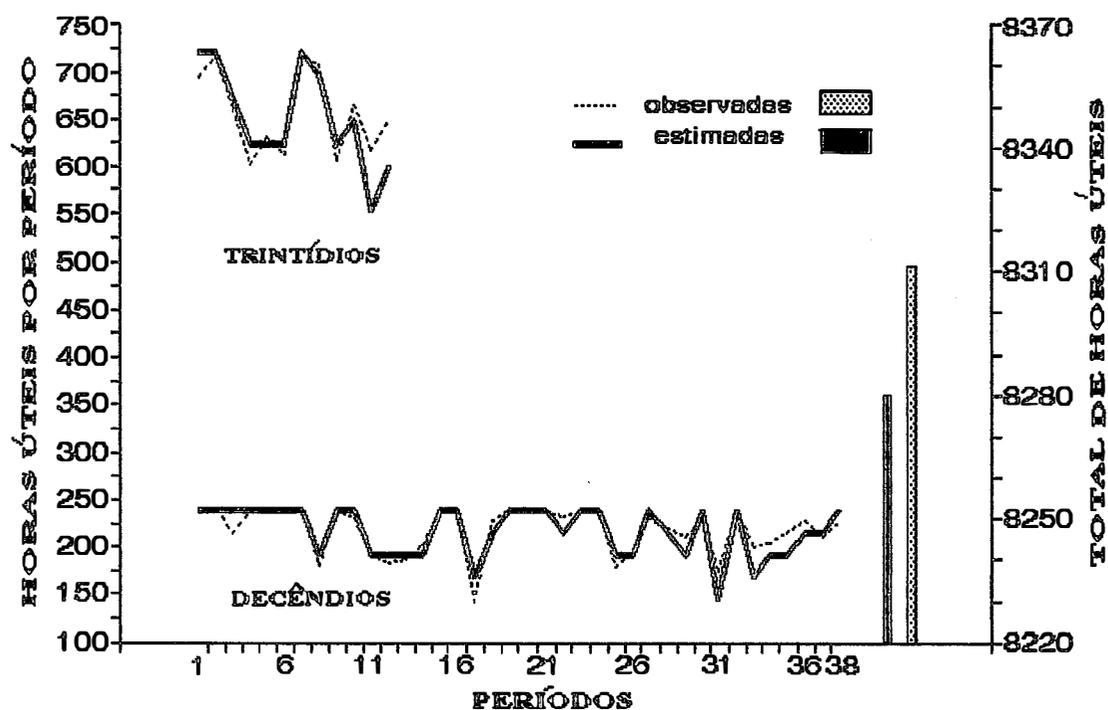


Figura 9. Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas na operação de carregamento de cana, durante o período de set/1988 a jun/1991 na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.

6.4.2. Operações pesadas

As estimativas das condições de tráfego de máquinas agrícolas que mobilizaram o solo através dos órgãos ativos de seus implementos, compreenderam 49 decêndios e 16 trintídios dentro do período total de observação, concordando de forma contínua com os mesmos dias em que se registraram os apontamentos referentes a esta operação.

Apresenta-se a seguir, nas Tabelas 12 e 13, as estimativas geradas pelo modelo determinístico :

Tabela 12. Horas úteis para mobilização do solo por decêndio :
estimadas x observadas.

Decêndio	Horas		$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
	estimadas	observadas		
1	240,00	240,00	0,00	0,00
2	240,00	239,38	0,00	0,39
3	240,00	240,00	0,00	0,00
4	192,00	193,46	0,01	2,12
5	192,00	188,83	0,03	10,03
6	216,00	207,17	0,17	78,03
7	240,00	220,67	0,65	373,78
8	168,00	153,00	0,80	225,00
9	240,00	228,00	0,25	144,00
10	240,00	240,00	0,00	0,00
11	240,00	240,00	0,00	0,00
12	240,00	240,00	0,00	0,00
13	240,00	240,00	0,00	0,00
14	240,00	240,00	0,00	0,00
15	216,00	224,50	0,15	72,25
16	240,00	240,00	0,00	0,00
17	216,00	225,00	0,17	81,00
18	240,00	228,00	0,25	144,00
19	192,00	212,75	1,17	430,56
20	192,00	196,93	0,07	24,34
21	216,00	202,00	0,42	196,00
22	192,00	223,00	2,61	961,00

Tabela 12. continuação :

Decêndio	Horas		$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
	estimadas	observadas		
23	216,00	207,27	0,16	76,17
24	240,00	235,54	0,03	19,88
25	216,00	225,75	0,20	95,06
26	192,00	185,50	0,11	42,25
27	192,00	144,00	6,25	2.304,00
28	192,00	179,33	0,44	160,44
29	192,00	229,50	3,81	1.406,25
30	216,00	165,83	5,39	2.516,69
31	240,00	240,00	0,00	0,00
32	240,00	240,00	0,00	0,00
33	240,00	240,00	0,00	0,00
34	240,00	240,00	0,00	0,00
35	240,00	240,00	0,00	0,00
36	240,00	240,00	0,00	0,00
37	240,00	239,00	0,00	1,00
38	192,00	208,67	0,75	277,78
39	240,00	222,50	0,53	306,25
40	240,00	230,20	0,17	96,04
41	240,00	227,88	0,26	147,02
42	192,00	232,75	4,50	1.660,56
43	168,00	144,50	1,96	552,25
44	144,00	150,50	0,20	42,25
45	216,00	224,50	0,15	72,25
46	216,00	210,00	0,08	36,00
47	192,00	173,83	0,90	330,03
48	168,00	146,00	1,71	484,00
49	216,00	220,50	0,04	20,25
Subtot.	10.632,00	10.506,24	RMS: 8,38%	16,53hs
	r = 0,835			
	F = 108,25 **			
05 dias	120,00	120,00		
Totais	10.752,00	10.726,24		

Tabela 13. Horas úteis para mobilização do solo por trintídio :
estimadas x observadas.

Horas				
Trintídio	estimadas	observadas	$(1 - (h_{obs} \div h_{est}))^2$	$(h_{obs} - h_{est})^2$
1	720,00	719,38	0,00	0,39
2	600,00	589,46	0,03	111,14
3	648,00	601,67	0,59	2.146,78
4	720,00	720,00	0,00	0,00
5	696,00	704,50	0,01	72,25
6	696,00	693,00	0,00	9,00
7	600,00	611,68	0,04	136,50
8	648,00	665,81	0,07	317,34
9	600,00	555,25	0,65	2.002,56
10	600,00	574,67	0,19	641,78
11	720,00	720,00	0,00	0,00
12	720,00	720,00	0,00	0,00
13	672,00	670,17	0,00	3,36
14	672,00	690,83	0,07	354,38
15	528,00	519,50	0,03	72,25
16	576,00	529,83	0,76	2.131,36
Subtot.	10.416,00	10.285,74	RMS: 3,92%	22,36 h
$r = 0,964$ $F = 198,70 **$				
15 dias	336,00	340,50		
Totais	10.752,00	10.626,24		

A partir destes resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13, constituiu-se a Figura 10 a seguir, permitindo a visualização gráfica das estimativas e as observações realizadas :

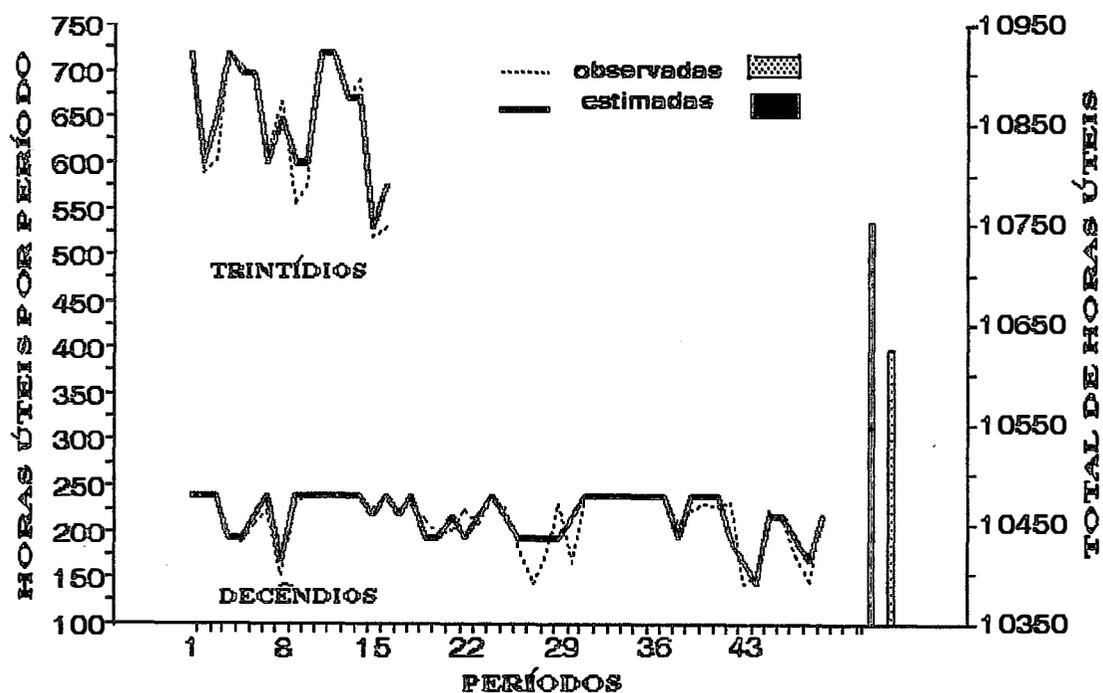


Figura 10. Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas em operações de mobilização do solo no período de set/88 a jun/91, Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.

7. CONCLUSÕES

- A umidade do solo é fator de proporcionalidade às condições de tráfego e de trabalho de mobilização do solo.
- Ao analisar um sistema formado pelo homem - máquina, a umidade do solo não mais atua isoladamente na paralisação das atividades observadas. A ocorrência de precipitação e sua intensidade também entram como fatores determinantes da disponibilidade de tempos para trabalhos motomecanizados agrícolas.
- Ambos os fatores, com privilégio do critério relativo a precipitação, determinam se um mesmo solo proporciona ou não condições de tráfego e/ou mobilização no solo, considerando-se apenas que a espessura da camada superficial (OL), onde se executa o balanço hídrico, se diferencia, sendo de 100 mm para estimativas das condições de tráfego simplesmente, e de 300 mm, para estimativas das condições de mobilização do solo.

- A concepção de um modelo determinístico é a que melhor se aproxima dos dados reais observados.

- O tráfego sobre solos agrícolas está, simultaneamente, sob a influência gerencial humana e edafoclimática, podendo ser estimada, satisfatoriamente, considerando períodos de tempo regulares (decêndios ou trintídios), através da aplicação de critérios determinísticos aplicados sobre as estimativas provenientes do balanço hídrico, relativos a um nível mínimo de precipitação e a umidade do solo no dia em questão.

- A concepção de um modelo determinístico é a que melhor se aproxima dos dados reais observados.

- Para casos generalizados, a adoção destes critérios deve ser baseada em uma análise de ordem gerencial, no que diz respeito ao nível mínimo de precipitação, e, quanto ao critério relativo a umidade do solo, deve ser adotado um valor igual a capacidade de campo deste solo, considerando estimativas de tráfego simplesmente, ou igual a ordem de grandeza da umidade que proporcionar ao solo a tensão máxima de cisalhamento, em casos de estimativas das condições de mobilização para este solo.

- Estes critérios variam de solo para solo e de máquina para máquina, ficando irreal a adoção de um único valor de umidade do solo ou do nível mínimo de precipitação para se determinar se este solo proporciona ou não condições de tráfego para máquinas agrícolas.

- Não se pode, exclusivamente, basear-se no índice de correlação linear para avaliação do nível de precisão das estimativas geradas pelo modelo proposto, tendo este como único parâmetro avaliativo. Devem ser incluídas as estimativas do erro global cometidas pelas referidas estimativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M.G. On the applicability of soil water finite difference models to operational trafficability models. Journal of Terramechanics, Hanover, 20(3/4): 139-52, 1983.
- ASSIS, S. V. de. Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com tratores agrícolas em função de parâmetros do solo e clima. Viçosa, 1988. 92p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa)
- ASSIS, S.V. de; SEDIYAMA,G.C.; VIANELLO,R.L.; MARTYN, P.J. Probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis com tratores agrícolas em Uberaba, Minas Gerais. Revista Ceres, Viçosa, 36(206):299-316, 1989.
- BABEIR, A. S.; COLVIN, T. S.; MARLEY, S. J. Predicting field tractability with a simulation model. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 29(6): 1520-5, Nov/Dec,1986.
- BARBIERI, J.L.; POLI, D.M.; DONZELLI, J.L. Os latossolos roxos e a cultura da cana-de-açúcar. Boletim Técnico. COPERSUCAR, São Paulo (32): 2-10, out. 1985.
- BRIXIUS, W. W. Traction prediction equations for bias ply tyres. St. Joseph, ASAE, 1987. (ASAE Paper, 871622)
- CAMARGO, A. P. Balanço hídrico do Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1960. 15p. (IAC. Boletim, 116)

- CARDOSO JR., M. M. Análise do desempenho de tratores agrícolas, com tração 4x2 e 4x2 auxiliar em condição de campo. Piracicaba, 1991. 104p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- COPERSUCAR. Balanco hídrico. São Paulo, Caderno Copersucar, s/d. 40p. (Agronômica, 12)
- _____. Climatologia de regiões canavieiras do Estado de São Paulo. São Paulo, Caderno Copersucar, 1989. 32p. (Agronômica, 20)
- CRUCIANI, D. E. A drenagem na agricultura. 4. ed. São Paulo, Nobel, 1986. 337p.
- ELLIOTT, R. L.; LEMBKE, W. D.; HUNT, D. R. Simulation model for predicting available days for soil tillage. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 20(1):4-8, 1977.
- FLORES, J. A.; VON BARGEN, K.; GRISSE, R. D. Soil moisture criteria for estimating workdays. St. Joseph, ASAE, 1990. 20p.(ASAE Paper,90-1083)
- GEE-CLOUGH, D.; McALLISTER, M.; EVERNDEN, D. W. Tractive performance of tractor drive tyres. I. The effect of lug height. Journal of Agricultural Engineering Research, London, 22:373-84, June, 1977.
- GILL, W. R. & VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. Washington, USDA, 1967. 511p. (USDA. Agricultural Handbook, 316).
- GROHMANN, F. & MEDINA, H. P. Características de umidade dos principais solos do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, 21(18):285-95, mar. 1962.
- HETZ, E. & RIQUELME, J. Desarrollo y validación de un modelo computacional que determina días apropiados para ejecutar faenas agrícolas mecanizadas. Agro Sur, Santiago, 17(2):95-104, 1989.

INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., Washington, 1986.
Tour Guide, USDA/SCS & EMBRAPA/SNLCS, 1986. 285p.

MEHNER, M. L.; BENDER, D. A.; CURRY, G. L. Simulation / optimization of sorghum - methane production systems. St. Joseph, ASAE, December, 1988. 21p. (ASAE Paper, 88-7507)

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

MIALHE, L. G. Ensaio de tratores agrícolas em solos cultivados; Piracicaba, ESALQ/DER/GEP, 1983. 100 p.

MORETTI FILHO, J. Caracterização da seca agrônômica na zona canvieira do Estado de São Paulo como base para os estudos de irrigação. Piracicaba, 1965. 94p. (Cátedra - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

MÜLLER, L.; TILLE, P.; KRETSCHMER, H. Trafficability and Workability of alluvial clay soils in reponse to drainage status. Soil & Tillage Research, Amsterdam, 16:273-87, 1990.

NATH, S. & JOHNSON, W. H. Development of soil-moisture model to predict soil moisture and tractability for harvesting. Agricultural Mechanization in Asia, 11(1): 73-8, 1980.

OMETTO, J. C. Frequência de irrigação em cana-de-açúcar. Piracicaba, FEALQ, 1988. 77p.

OSKOU, K. E. Technical Note. Scotland, Scottish Agricultural Colleges, October, 1986. 4p. (ISSN 0142 7695, No. 97)

PAIVA NETO, J.E. de; CATANI,R.A.; KÜPPER,A.; MEDINA, H.P.; VERDADE, E. C.; GUTMANS, M.; NASCIMENTO, A. C. Observações gerais sobre os grandes tipos de solo do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, 11(7-9): 227-53, jul/set. 1951.

REECE, A. R. Tractor design and tractive performance. In: AGRICULTURAL ENGINEERING SYPOSIUM OF THE INSTITUTION OF AGRICULTURAL ENGINEERS, Silsoe, 1967. Silsoe, (Paper, 3/4/E/34).

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo - planta - atmosfera. Campinas,Fundação Cargill,1985. 466p.

_____. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole,1987. 188p.

SAAD, A. M.; TOGNON, A. A.; SANSIGOLO, C. A. Subsídios para projetos e manejo de irrigação por aspersão. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. Anais. Florianópolis, Centro Integrado de Cultura; Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem - ABID, 1988. v.1, p. 555-85.

SANS, L. M. A.. Estimativa do regime de umidade, pelo método de Newhall, de um latossolo vermelho-amarelo álico da região de Sete Lagoas, M.G.. Viçosa, 1986. 190p. (Doutorado - Universidade Federal de Viçosa)

SEDIYAMA, G.C.; PRUIT, W.O.; COSTA, J.M.N. da; BERNARDO, S. Modelo para computação da irrigação suplementar e do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas na produção da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Revista Ceres, Viçosa, 26(145): 238-50, 1979.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Centerton, The Laboratory of climatology, 1955. 104p. (Climatology, v.8)

TIBAU, A. O. Técnicas modernas de irrigação. 5. ed. São Paulo, Nobel, 1985. 228p.

TULER, V. V.; NASCIF, A. E.; SOUZA, D. de; AZEVEDO, H. J. Controle da irrigação pelo tanque classe A; manual de instrução. Piracicaba, PLANALSUCAR, I.A.A., 1983. 12p.

VILLA NOVA, N. A. Principais métodos climáticos de estimativa de aplicação de água de irrigação. Piracicaba, ESALQ/DFM, 1983. 22p.

VON BARGEN, K.; MENG, J.; SCHROEDER, M. A. Field working time for agricultural equipment. St. Joseph, ASAE, 1986. 17p. (ASAE Paper, 86-1024)

WISMER, R. D. & LUTH, H. J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. Journal of Terramechanics, Hanover, 10(2):49-61, 1972.

WITNEY, B. D. Chossing & using farms machines. London, Longman Scientific & Technical, 1988. 412p.

_____ ; OSKOU, K. E.; SPEIRS, R. B. A simulation model for predicting soil moisture status. Soil & Tillage Research, Amsterdam, 2:67-80, 1982.

WÖSTEN, J. H M. & BOUMA, J. Using simulation to define moisture availability and trafficability for a heavy clay soil in the Netherlands. Geoderma, Amsterdam, 35:187-96, 1985.

A P Ê N D I C E S

- APÊNDICE 1 :

Resultados do balanço hídrico na camada OL = 100 mm, dos anos de 1988 a 1991 - Arquivo APEND-1.PRN, em ASCII - incluindo os dados climáticos da área em estudo (temperatura média e precipitação diária) e todos os termos e constantes usadas.

- APÊNDICE 2 :

Resultados do balanço hídrico na camada OL = 300 mm, dos anos de 1988 a 1991 - Arquivo APEND-2.PRN, em ASCII - incluindo os dados climáticos da área em estudo (temperatura média e precipitação diária) e todos os termos e constantes utilizadas.

- APÊNDICE 3 :

Características do trator de pneu que foi considerado como representativo da frota que integra a frente de serviço de carregamento de cana na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria), utilizadas no modelo de WISMER & LUTH (1972) :

- trator convencional de pneu (4x2);
- potência média entre 65 e 100 kW (90 e 130 HP);
- características do pneumático traseiro (de tração):
 - dimensões : 18.3/30
 - secção de largura : 0,46736 m
 - diâmetro : 1,69672 m
- peso total : 53.936,575 N
- transferência de peso no eixo traseiro com o trator em movimento: 80,0%
- peso dinâmico por rodado traseiro : 21.574,63 N

- APÊNDICE 4 :

Dados de horas paradas por dia e, respectivamente, das horas disponíveis nos período de setembro de 1988 a junho de 1991 observadas e estimadas pelo modelo não determinístico, durante as operações de carregamento de cana na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P. - Arquivo APEND-4.PRN, em ASCII - acompanhadas pelas características dos tratores utilizados e pelos dados climáticos do período, porcentagem da capacidade de água disponível diárias.

Tabela 14. Estimativa decendial das horas paradas durante a operação de carregamento de cana por motivo climático em função da média decendial da capacidade de água disponível porcentual do solo e a estimativa do erro global (RMS).

Dec.	log		CAD%	HPD _{est} +1	RMS	
	HPD _{obs} +1	HPD _{obs} +1			$(1 - \text{HPD}_{\text{obs}} \div \text{HPD}_{\text{est}})^2$	$(\text{HPD}_{\text{obs}} - \text{HPD}_{\text{est}})^2$
1	1,00	0,00	35,83	3,82	0,55	7,97
2	1,00	0,00	3,87	1,20	0,03	0,04
3	27,50	1,44	22,92	2,40	109,58	630,04
4	4,00	0,60	85,54	23,04	0,68	362,44
5	1,00	0,00	61,48	9,66	0,80	74,97
6	1,00	0,00	36,38	3,90	0,55	8,41
7	1,00	0,00	16,69	1,91	0,23	0,84
8	60,21	1,78	39,85	4,42	159,25	3112,22
9	1,00	0,00	77,39	17,16	0,89	261,15
10	11,16	1,05	39,24	4,32	2,50	46,69
11	49,95	1,70	80,45	19,16	2,58	947,74
12	59,00	1,77	96,01	33,63	0,57	643,53
13	52,58	1,72	74,48	15,45	5,78	1378,90
14	37,61	1,58	71,18	13,71	3,04	571,19
15	3,12	0,49	80,69	19,34	0,70	262,89
16	1,00	0,00	39,62	4,38	0,60	11,45
17	98,32	1,99	78,66	17,97	20,00	6457,17

Tabela 14. continuação :

Dec.	log		CAD%	HPD _{est} +1	RMS	
	HPD _{obs} +1	HPD _{obs} +1			$(1 - \text{HPD}_{\text{obs}} \div \text{HPD}_{\text{est}})^2 (\text{HPD}_{\text{obs}} - \text{HPD}_{\text{est}})^2$	
18	11,75	1,07	38,80	4,26	3,10	56,20
19	1,00	0,00	15,45	1,83	0,21	0,69
20	1,00	0,00	18,80	2,07	0,27	1,14
21	5,19	0,71	57,90	8,49	0,15	10,87
22	9,25	0,97	87,72	24,92	0,40	245,74
23	5,00	0,70	67,02	11,80	0,33	46,25
24	1,00	0,00	37,76	4,10	0,57	9,60
25	62,10	1,79	70,47	13,36	13,30	2375,55
26	43,85	1,64	90,44	27,50	0,35	267,30
27	10,38	1,02	85,15	22,72	0,30	152,26
28	20,88	1,32	81,66	20,03	0,00	0,72
29	28,65	1,46	85,76	23,23	0,05	29,40
30	10,00	1,00	69,07	12,71	0,05	7,33
31	66,13	1,82	93,55	30,77	1,32	1249,81
32	1,17	0,07	37,99	4,13	0,52	8,80
33	39,75	1,60	89,17	26,27	0,26	181,74
34	37,09	1,57	61,47	9,65	8,08	752,93
35	25,92	1,41	70,28	13,27	0,91	159,87
36	12,71	1,10	44,09	5,15	2,15	57,08
37	29,67	1,47	75,24	15,88	0,75	190,00
38	13,93	1,14	26,60	2,74	16,71	125,33

Totais :

846,86h

480,36h

306,98%

23,34horas

índice de correlação (r) : 0,5820

Análise de variância da regressão utilizada nas as estimativas geradas pelo modelo não determinístico:

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	6,1683	6,1683	18,4372**
Resíduo	36	12,0440	0,3346	
Total	37	18,2123		

- Modelo :

$$\log(\Sigma_{HPD+1}) = 0,02008 + 0,01569 \cdot \frac{\sum CAD_n \%}{10}$$

- APÊNDICE 5 :

Dados de horas paradas por dia e, respectivamente, das horas disponíveis nos período de setembro de 1988 a junho de 1991 observadas e estimadas pelo modelo não determinístico, durante as operações pesadas de mobilização do solo na Usina São Luíz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P. - Arquivo APEND-5.PRN, em ASCII - acompanhadas pelas características dos tratores utilizados e pelos dados climáticos do período, porcentagem da capacidade de água disponível diárias.

Tabela 15. Estimativa decencial das horas paradas durante as operação de mobilização do solo por motivo climático em função da média decencial da capacidade de água disponível porcentual do solo e a estimativa do erro global (RMS) :

Dec.	log		CAD%	HPD _{est} +1	RMS	
	HPD _{obs} +1	HPD _{obs} +1			$(1 - \text{HPD}_{\text{obs}} \div \text{HPD}_{\text{est}})^2$	$(\text{HPD}_{\text{obs}} - \text{HPD}_{\text{est}})^2$
1	1,00	0,00	0,04	0,65	0,28	0,12
2	1,63	0,21	9,38	0,96	0,49	0,45
3	1,00	0,00	3,66	0,76	0,10	0,06
4	47,54	1,68	35,73	2,80	255,32	2001,88
5	52,17	1,72	95,44	31,88	0,40	411,41
6	33,83	1,53	98,16	35,62	0,00	3,20
7	20,33	1,31	86,79	22,42	0,01	4,33
8	88,00	1,94	89,60	25,14	6,25	3951,61
9	13,00	1,11	34,88	2,70	14,49	105,99
10	1,00	0,00	8,33	0,92	0,01	0,01
11	1,00	0,00	32,86	2,49	0,36	2,22
12	1,00	0,00	27,55	2,01	0,25	1,01
13	1,00	0,00	19,43	1,44	0,09	0,19
14	1,00	0,00	11,10	1,03	0,00	0,00
15	16,50	1,22	86,29	21,96	0,06	29,83
16	1,00	0,00	81,56	18,11	0,89	292,78
17	16,00	1,20	85,86	21,58	0,07	31,15
18	13,00	1,11	97,92	35,28	0,40	496,47
19	28,25	1,45	93,04	28,91	0,00	0,44
20	44,07	1,64	87,98	23,53	0,76	421,72
21	39,00	1,59	91,74	27,43	0,18	133,89
22	18,00	1,26	82,24	18,62	0,00	0,38
23	33,73	1,53	83,52	19,62	0,52	199,02
24	5,46	0,74	28,38	2,08	2,66	11,45
25	15,25	1,18	52,07	5,45	3,24	96,07
26	55,50	1,74	80,37	17,26	4,91	1462,43
27	97,00	1,99	79,99	16,99	22,17	6401,47
28	61,67	1,79	78,32	15,87	8,33	2097,21
29	11,50	1,06	83,99	20,00	0,18	72,19

Tabela 15. continuação :

Dec.	log		CAD%	HPD _{est} +1	RMS	
	HPD _{obs} +1	HPD _{obs} +1			$(1 - \text{HPD}_{\text{obs}} \div \text{HPD}_{\text{est}})^2 (\text{HPD}_{\text{obs}} - \text{HPD}_{\text{est}})^2$	
30	75,17	1,88	97,34	34,46	1,40	1657,38
31	1,00	0,00	72,97	12,76	0,85	138,37
32	1,00	0,00	45,03	4,09	0,57	9,54
33	1,00	0,00	37,52	3,01	0,45	4,05
34	1,00	0,00	34,84	2,70	0,40	2,89
35	1,00	0,00	52,12	5,46	0,67	19,88
36	1,00	0,00	63,56	8,70	0,78	59,32
37	2,00	0,30	50,68	5,15	0,37	9,91
38	32,33	1,51	97,61	34,83	0,01	6,26
39	18,50	1,27	96,54	33,35	0,20	220,40
40	10,80	1,03	93,80	29,82	0,41	361,74
41	13,13	1,12	94,54	30,73	0,33	310,11
42	8,25	0,92	88,85	24,38	0,44	260,10
43	96,50	1,98	94,35	30,49	4,68	4356,68
44	90,50	1,96	97,76	35,05	2,50	3075,00
45	16,50	1,22	82,95	19,17	0,02	7,13
46	31,00	1,49	70,06	11,34	3,01	386,57
47	67,17	1,83	80,42	17,29	8,32	2487,29
48	95,00	1,98	88,67	24,20	8,56	5012,88
49	20,50	1,31	84,57	20,47	0,00	0,00

Totais :

1302,76h

810,97h

293,76%

23,02horas

índice de correlação (r) : 0,7366

Análise de variância da regressão utilizada nas as estimativas geradas pelo modelo não determinístico:

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	14,1450	14,1450	55,7650**
Resíduo	47	11,9217	0,2537	
Total	48	26,0667		

- Modelo :

$$\log^{(\Sigma HPD+1)} = -0,18499 + 0,01769 \cdot \frac{\sum CAD_n\%}{10}$$

- APÊNDICE 7 :

Determinações das tensões de cisalhamento sob sete condições diferentes de umidade do solo da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) Pirassununga - S.P., através do "sheargraph" de Cohron :

- Local : 1

Umidade do solo (0-10cm) : 26,73%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 1,49757 \cdot \sigma + 1,94887$ ($r^2 = 0,9911$) Análise de variância da regressão				
		FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
23,56908	15,87762					
35,42578	25,07068					
67,95570	41,55192	Reg. 1		11278,7949	11278,7949	445,8464
96,83740	60,26931	Res. 4		101,1900	25,2974	
119,03071	75,85609					
145,32826	99,52613	Tot. 5		11379,9854		

- Local : 2

Umidade do solo (0-10cm) : 27,19%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 1,75342 \cdot \sigma - 2,97626$ ($r^2 = 0,9647$) Análise de variância da regressão				
		FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
30,86551	16,95429					
36,03382	25,56760					
61,41931	35,17476	Reg. 1		18649,0996	18649,0996	163,9550
91,82111	51,73882	Res. 6		682,4716	113,7453	
98,81352	61,09751					
117,20660	66,56365	Tot. 7		19331,5703		
135,44768	89,42205					
186,97871	99,69177					

- Local : 3

Umidade do solo (0-10cm) : 24,87%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 0,93862 \cdot \sigma + 3,04769$ ($r^2 = 0,9647$) Análise de variância da regressão				
		FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
13,38448	13,22737					
20,83292	16,04327					
27,06529	23,24863	Reg. 1		6307,8955	6307,8955	163,9850
34,20971	29,87426	Res. 6		230,7979	38,4663	
46,06641	51,98728					
64,61150	64,90724	Tot. 7		6538,6934		
69,01976	80,56028					
105,04589	99,27767					

- Local : 4

Umidade do solo (0-10cm) : 34,06%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 2,13821 \cdot \sigma - 10,08874$ ($r^2 = 0,9838$) Análise de variância da regressão				
15,20859	10,24584	FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
36,79386	22,00633					
71,14789	36,74834	eg. 1		30424,4297	30424,4297	364,7054
87,26084	43,37397	Res. 6		500,5316	83,4716	
112,34232	65,48699					
147,45638	74,26594	Tot. 7		30924,9609		
153,99277	78,32413					
216,77247	100,60280					

- Local : 5

Umidade do solo (0-10cm) : 35,44%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 1,93097 \cdot \sigma - 7,56687$ ($r^2 = 0,9846$) Análise de variância da regressão				
19,31283	12,39917	FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
46,97846	24,65658					
73,27601	42,04884	Reg. 1		26655,3027	26655,3027	319,3336
93,49320	57,95034	Res. 5		417,3582	83,4716	
123,59098	74,26594					
186,97871	96,87588	Tot. 6		27072,6602		
195,33921	101,92792					

- Local : 6

Umidade do solo (0-10cm) : 44,90%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 1,07009 \cdot \sigma - 4,22890$ ($r^2 = 0,9859$) Análise de variância da regressão				
0,61573	7,76123	FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
11,71239	13,14455					
16,27265	20,76402	Reg. 1		8237,0566	8237,0566	419,1494
41,20212	34,51219	Res. 6		117,9110	19,6518	
46,82645	49,50267					
61,57132	65,15571	Tot. 7		8354,9678		
76,31619	76,83337					
101,39767	96,54460					

- Local : 7

Umidade do solo (0-10cm) : 27,83%

τ kPa	σ kPa	$\tau = 2,34473 \cdot \sigma - 29,68403$ ($r^2 = 0,9908$) Análise de variância da regressão				
19,76886	17,69967	FV	GL	S.Q.	Q.M.	F
23,72109	24,65658					
51,53873	37,07962	Reg. 1		14852,0742	14852,0742	429,0205
87,56486	50,99343	Res. 4		138,4743	34,6186	
128,45526	65,65263					
150,95259	76,91619	Tot. 5		14990,5488		

- APÊNDICE 8 :

Obtenção da superfície de reposta da tensão de cisalhamento do solo em relação a umidade e a pressão normal. (Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P.:

- 19 - determinações do índice de cone médio (I_c), a profundidade de 0-10 cm sob sete condições diferentes de umidade do solo da Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) Pirassununga - S.P., através do penetrógrafo de mola, determinação do índice de mobilidade (CN) para o trator de pneu representativo da frota que atende a frente de serviço de carregamento de cana e o correlacionamento linear entre CN e a respectiva umidade local, ordenadas de forma crescente, sendo ambos transformado na escala logarítmica:

Loc.	umidade% (0-10cm)	log umidade %	Ic		log CN	CNcalc.
			determ. kPa	CN		
3	24,86951	1,3956672	4143,842	152,308	2,1827216	132,931
1	26,72591	1,4269324	2863,933	105,264	2,0222812	112,710
2	27,18648	1,4343530	2824,348	103,809	2,0162366	108,381
7	27,83296	1,4445594	3174,014	116,661	2,0669272	102,698
4	34,05995	1,5322439	1419,087	52,1588	1,7173275	64,651
5	35,43788	1,5494678	1445,477	53,1287	1,7253296	59,033
6	44,90130	1,6522589	1104,397	40,5923	1,6084437	34,315

Análise de variância da regressão :

$$\log^{(CN)} = 5,32267 - 2,292123 \cdot \log^{(U)}$$

$$r^2 = 0,9161$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	0,2610	0,2610	54,6035**
Resíduo	5	0,0239	0,0048	
Total	6	0,2849		

29 - Superfície de resposta da tensão de cisalhamento do solo em relação a umidade e da pressão normal, variando de 50 a 150 kPa - Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - S.P., determinando-a a partir da metodologia proposta por FLORES *et alii* (1990) :

- a) a partir das regressões apresentadas no Apêndice 6, determinou-se, respectivamente para cada local, a tensões de cisalhamento do solo a cada uma das pressões normais a seguir :

σ (kPa) =		50,00	75,00	100,00	125,00	150,00
Local	Umidade	τ	τ	τ	τ	τ (*)
3	24,87%	50,98	72,26	93,53	114,81	136,09
1	26,73%	75,76	117,42	159,09	200,75	242,41
2	27,19%	81,89	128,59	175,30	222,00	268,70
7	27,83%	90,42	144,14	197,85	251,57	305,29
(**)	29,27%	109,58	179,06	248,54	318,02	387,50
4	34,06%	95,94	148,53	201,11	253,69	306,27
5	35,44%	89,99	139,26	188,54	237,82	287,09
6	44,90%	49,15	75,77	102,40	129,02	155,65

(*) τ em kPa

(**) umidade em que o solo apresenta $\tau_{\text{máx}}$, independentemente da pressão normal aplicada no "sheargraph" de Cohron

b) a partir da metodologia proposta por FLORES *et alii* (1990), estabeleceu-se as regressões relativas a superfície de resposta da tensão de cisalhamento do solo em relação a umidade e da pressão normal, sendo agrupadas em duas fases :

I - da umidade do local 3 até a umidade em que o solo apresenta a $\tau_{\text{máx}}$;

II - da umidade do local 4 a até o local 6.

Análise de variância das regressões I :

$$\sigma = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma = -280,3972 + 1332,437 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	1832,3630	1832,3630	$108,1528 \cdot 10^7 **$
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	1832,3630		

$$\sigma = 75 \text{ kPa}$$

$$\sigma = -531,7134 + 2428,502 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	6086,8799	6086,8799	$109,7149 \cdot 10^7 **$
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	6086,8799		

$$\sigma = 100 \text{ kPa}$$

$$\sigma = -531,7134 + 2428,502 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	12820,709	12820,709	$327,7312 \cdot 10^6 **$
Resíduo	3	0,0001	0,0000	
Total	4	12820,7091		

$$\sigma = 125 \text{ kPa}$$

$$\sigma = -1034,331 + 4620,596 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	22035,0625	22035,0625	$310,6335 \cdot 10^6$ **
Resíduo	3	0,0002	0,0001	
Total	4	22035,0627		

$$\sigma = 150 \text{ kPa}$$

$$\sigma = -1285,63 + 5716,602 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	33728,2700	33728,2700	$288,2042 \cdot 10^6$ **
Resíduo	3	0,0004	0,0001	
Total	4	33728,2704		

Análise de variância das regressões II :

$$\sigma = 50 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 242,9827 - 431,7042 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	1297,7561	1297,7561	$291,3464 \cdot 10^8$ **
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	1297,7561		

$$\sigma = 75 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 377,1187 - 671,1513 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	3136,6169	3136,6169	$396,9260 \cdot 10^7$ **
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	3136,6169		

$$\sigma = 100 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 511,2535 - 910,5969 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	5773,9478	5773,9478	$843,3500 \cdot 10^6$ **
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	5773,9478		

$$\sigma = 125 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 645,3906 - 1150,042 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	9209,7559	9209,7559	$255,3622 \cdot 10^8$ **
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	9209,7559		

$$\sigma = 150 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 779,5261 - 1389,491 \cdot \text{umidade}$$

$$r = 1,0000$$

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	13444,1084	13444,1084	$175,8283 \cdot 10^7$ **
Resíduo	3	0,0000	0,0000	
Total	4	13444,1084		

- APÊNDICE 9 :

Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas na operação de carregamento de cana, observadas durante o período de setembro de 1988 a junho de 1991 na Usina São Luiz (DEDINI S/A-Agro Indústria) - Pirassununga - SP e estimadas pelo modelo determinístico, adotando-se os critérios que conferiram a melhor precisão aos resultados gerados pelo modelo (6,8 mm, quanto a precipitação e 100% da capacidade da água disponível), incluindo os dados climáticos da área em estudo (precipitação diária) - Arquivo APEND-9.PRN, em ASCII.

- APÊNDICE 10 :

Horas úteis com condições de tráfego com máquinas agrícolas em operações de mobilização do solo, observadas durante o período de setembro de 1988 a junho de 1991 na Usina São Luiz (DEDINI S/A - Agro Indústria) - Pirassununga - SP e estimadas pelo modelo determinístico, adotando-se os critérios que conferiram a melhor precisão aos resultados gerados pelo modelo (9,1 mm, quanto a precipitação e 88% da capacidade da água disponível), incluindo os dados climáticos da área em estudo (precipitação diária) - Arquivo APEND-10.PRN, em ASCII.

- APÊNDICE 11 :

Análise de variância das estimativas em períodos decendiais no selecionamento de critérios determinísticos para tráfego de carregadoras :

nº 1 : P (mm) = 5,0 e CAD% = 88,0
r = 0,851

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	33730,6760	33730,6760	94,50 **
Resíduo	36	12849,2520	356,9237	
Total	37	46579,9280		

nº 2 : P (mm) = 5,5 e CAD% = 88,0
r = 0,832

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	29359,0215	29359,0215	80,70 **
Resíduo	36	13097,6924	363,8248	
Total	37	42456,7149		

nº 3 : P (mm) = 6,0 e CAD% = 88,0
r = 0,858

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	28403,9648	28403,9648	100,08 **
Resíduo	36	10217,8398	283,8289	
Total	37	38621,8056		

nº 4 : P (mm) = 7,0 e CAD% = 88,0
r = 0,794

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	17372,6699	17372,6699	61,23 **
Resíduo	36	10214,6211	283,7395	
Total	37	27587,2910		

nº 5 : P (mm) = 8,0 e CAD% = 88,0
r = 0,693

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	12074,4307	12074,4307	33,17 **
Resíduo	36	13102,7451	363,9652	
Total	37	25177,1758		

nº 6 : P (mm) = 7,5 e CAD% = 88,0
r = 0,776

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	16219,0117	16219,0117	54,49 **
Resíduo	36	10716,4248	297,6785	
Total	37	26935,4365		

nº 7 : P (mm) = 6,5 e CAD% = 88,0
r = 0,841

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	21590,4492	21590,4492	87,12 **
Resíduo	36	8921,8789	247,8300	
Total	37	30512,3281		

nº 8 : P (mm) = 6,7 e CAD% = 88,0
r = 0,837

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20182,0000	20182,0000	84,31 **
Resíduo	36	8617,8984	239,3861	
Total	37	28799,8984		

nº 9 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 88,0
r = 0,841

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20747,3340	20747,3340	86,72 **
Resíduo	36	8613,1738	239,2548	
Total	37	29360,5078		

nº 10 : P (mm) = 6,9 e CAD% = 88,0
r = 0,794

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	17372,6699	17372,6699	61,23 **
Resíduo	36	10214,6211	283,7395	
Total	37	27587,2910		

nº 11 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 95,0
r = 0,869

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	19945,3008	19945,3008	110,65 **
Resíduo	36	6489,3369	180,2594	
Total	37	26434,6377		

nº 12 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 100,0
r = 0,869

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20825,8730	20825,8730	122,73 **
Resíduo	36	6109,1748	169,6993	
Total	37	26935,0478		

Análise de variância das estimativas em períodos trintidiais no selecionamento de critérios determinísticos para tráfego de carregadoras :

nº 1 : P (mm) = 5,0 e CAD% = 88,0
r = 0,883

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	50115,3910	50115,3910	35,30 **
Resíduo	10	14200,4229	1420,0422	
Total	11	64315,8139		

nº 2 : P (mm) = 5,5 e CAD% = 88,0
r = 0,851

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	42805,5470	42805,5470	26,22 **
Resíduo	10	16327,7656	1632,7766	
Total	11	59133,3126		

nº 3 : P (mm) = 6,0 e CAD% = 88,0
r = 0,875

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	40103,7850	40103,7850	32,71 **
Resíduo	10	12262,0586	1226,2058	
Total	11	52365,8436		

nº 4 : P (mm) = 7,0 e CAD% = 88,0
r = 0,806

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	25024,1797	25024,1797	18,51 **
Resíduo	10	13518,0996	1351,8099	
Total	11	38542,2813		

nº 5 : P (mm) = 8,0 e CAD% = 88,0
r = 0,638

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	16183,3506	16183,3506	6,87
Resíduo	10	23560,0371	2356,0037	
Total	11	39743,3877		

nº 6 : P (mm) = 7,5 e CAD% = 88,0
r = 0,768

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	22317,9023	22317,9023	14,40 **
Resíduo	10	15504,3711	1550,4371	
Total	11	37822,2730		

nº 7 : P (mm) = 6,5 e CAD% = 88,0
r = 0,819

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	28437,6348	28437,6348	20,32 **
Resíduo	10	13992,6709	1399,2671	
Total	11	42430,3057		

nº 8 : P (mm) = 6,7 e CAD% = 88,0
r = 0,825

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	26983,0410	26983,0410	21,23 **
Resíduo	10	12710,2188	1271,0219	
Total	11	39693,2580		

nº 9 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 88,0
r = 0,836

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	27389,3262	27389,3262	23,26 **
Resíduo	10	11777,3350	1177,7335	
Total	11	39166,6612		

nº 10 : P (mm) = 6,9 e CAD% = 88,0
r = 0,806

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	25024,1797	25024,1797	18,51 **
Resíduo	10	13518,0996	1351,8099	
Total	11	38542,2893		

nº 11 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 95,0
r = 0,862

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	25236,2344	25236,2344	29,02 **
Resíduo	10	8698,1035	869,8104	
Total	11	26434,6379		

nº 12 : P (mm) = 6,8 e CAD% = 100,0
r = 0,863

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	23867,7988	23867,7988	29,13 **
Resíduo	10	8194,2861	819,4286	
Total	11	32062,0849		

Análise de variância das estimativas em períodos decendiais no selecionamento de critérios determinísticos para mobilização do solo :

nº 1 : P (mm) = 5,0 e CAD% = 88,0
r = 0,819

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	43372,5820	43372,5820	95,90 **
Resíduo	47	21257,0840	452,2784	
Total	48	64629,6660		

nº 2 : P (mm) = 6,0 e CAD% = 88,0
r = 0,829

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	34693,1450	34693,1450	103,31 **
Resíduo	47	15783,4463	335,8180	
Total	48	50476,5913		

nº 3 : P (mm) = 7,0 e CAD% = 88,0
r = 0,829

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	29014,7461	29014,7461	103,05 **
Resíduo	47	13233,1436	281,5562	
Total	48	42247,8897		

nº 4 : P (mm) = 8,0 e CAD% = 88,0
r = 0,822

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	24803,8340	24803,8340	98,19 **
Resíduo	47	11872,2305	252,6006	
Total	48	36676,0645		

nº 5 : P (mm) = 9,0 e CAD% = 88,0
r = 0,832

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	21913,9004	21913,9004	105,59 **
Resíduo	47	9754,3359	207,5391	
Total	48	31668,2363		

nº 6 : P (mm) = 10,0 e CAD% = 88,0
r = 0,821

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	18402,1582	18402,1582	97,51 **
Resíduo	47	8870,0039	188,7235	
Total	48	27272,1621		

nº 7 : P (mm) = 9,7 e CAD% = 88,0
r = 0,814

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20783,3320	20783,3320	92,12 **
Resíduo	47	8921,8789	247,8300	
Total	48	31386,4453		

nº 8 : P (mm) = 9,5 e CAD% = 88,0
r = 0,835

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	22458,3223	22458,3223	108,25 **
Resíduo	47	9750,9658	207,4674	
Total	48	32209,2891		

nº 9 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 88,0
r = 0,835

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	22458,3223	22458,3223	108,25 **
Resíduo	47	9750,9658	207,4674	
Total	48	32209,2891		

nº 10 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 90,0
r = 0,817

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	21073,2246	21073,2246	94,31 **
Resíduo	47	10501,3203	223,4323	
Total	48	31574,5449		

nº 11 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 100,0
r = 0,815

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	20842,3789	20842,3789	92,90 **
Resíduo	47	10544,1318	224,3432	
Total	48	31386,5107		

Análise de variância das estimativas em períodos trintidiais no selecionamento de critérios determinísticos para mobilização do solo :

nº 1 : P (mm) = 5,0 e CAD% = 88,0
r = 0,823

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	84330,5550	84330,5550	29,48 **
Resíduo	14	40049,9610	2860,7114	
Total	15	124380,5160		

nº 2 : P (mm) = 6,0 e CAD% = 88,0
r = 0,850

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	69249,3050	69249,3050	36,42 **
Resíduo	14	26618,9492	1901,3535	
Total	15	95868,2542		

nº 3 : P (mm) = 7,0 e CAD% = 88,0
r = 0,876

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	57440,4920	57440,4920	46,21 **
Resíduo	14	17403,5664	1243,1119	
Total	15	74843,9584		

nº 4 : P (mm) = 8,0 e CAD% = 88,0
r = 0,898

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	51603,3590	51603,3590	58,58 **
Resíduo	14	12333,0791	880,9342	
Total	15	63936,4381		

nº 5 : P (mm) = 9,0 e CAD% = 88,0
r = 0,951

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	49447,6840	49447,6840	132,20 **
Resíduo	14	5236,3999	374,0286	
Total	15	54684,0839		

nº 6 : P (mm) = 10,0 e CAD% = 88,0
r = 0,955

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	34670,5310	34670,5310	146,65 **
Resíduo	14	3309,7449	236,4104	
Total	15	37980,2759		

nº 7 : P (mm) = 9,7 e CAD% = 88,0
r = 0,957

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	43979,8910	43979,8910	150,89 **
Resíduo	14	4080,3687	291,4549	
Total	15	48060,2597		

nº 8 : P (mm) = 9,5 e CAD% = 88,0
r = 0,964

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	51281,4570	51281,4570	185,46 **
Resíduo	14	3871,1470	276,5105	
Total	15	55152,6040		

nº 9 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 88,0
r = 0,964

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	51281,4570	51281,4570	185,46 **
Resíduo	14	3871,1470	276,5105	
Total	15	55152,6040		

nº 10 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 90,0
r = 0,950

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	47015,1290	47015,1290	129,63 **
Resíduo	14	5077,6016	362,6858	
Total	15	52092,7306		

nº 11 : P (mm) = 9,1 e CAD% = 100,0
r = 0,952

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão	1	47717,8240	47717,8240	134,94 **
Resíduo	14	4950,6177	353,6155	
Total	15	52668,4410		