

VAZÕES ESPECÍFICAS MÍNIMAS PARA SECAGEM DO MILHO COM AR NATURAL EM BOTUCATU, SP.*

V. A. Gonçalves**

W. A. Ferreira***

RESUMO

Recomendam-se à secagem com ar natural vazões específicas suficientemente baixas, reduzindo a potência requerida pelo ventilador e contribuindo para o arrefecimento da sobressecação.

Através de modelos matemáticos de simulação foram determinadas as vazões específicas mínimas necessárias à secagem com ar natural do milho a granel, nas condições climáticas do município de Botucatu, no Estado de São Paulo, correspondentes aos meses de março a junho do ano de 1971, cujo potencial de secagem foi o mais drástico dentro de um período de 10 anos analisado.

Foram considerados para o milho os teores de umidade inicial, base úmida, de 22%, 20% e 18%, obtendo-se os respectivos períodos de armazenamento seguro de 7, 11 e 29 dias, em função da temperatura média de 23,4°C do mês de março de 1975, a mais elevada do período de 10 anos analisado. Outrossim, as médias empregadas, temperatura de bulbo seco e umidade relativa, foram obtidas a partir dos registros horários do termo-higrógrafo, localizado na Estação Meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, no Estado de São Paulo. Foi considerada somente a secagem seletiva dentro dos períodos diários das 9 às 17 horas, 9 às 18 horas e 8 às 18 horas, dada a impossibilidade de realização da secagem contínua, já que as condições de equilíbrio

* Aceito para publicação em abril de 1986.

** Professor Assistente, nível 4, do Departamento de Engenharia Rural da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

*** Professor Titular do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Campus de Botucatu, SP.

entre o ar e o grão não possibilitaram a redução do teor de umidade final ao nível recomendado ao armazenamento seguro.

Constatou-se que a queda do teor de umidade de equilíbrio do grão em poucos pontos percentuais acarreta elevados decrementos nas vazões específicas mínimas requeridas. Outrossim, uma redução de poucas horas no período diário de operação do ventilador requer significativos incrementos nas vazões específicas mínimas para a realização da secagem dentro do tempo de secagem admissível.

INTRODUÇÃO

A secagem com ar natural é realizada com o emprego de vazões específicas (volume de ar por unidade de tempo e por unidade de volume de grão) suficientemente baixas, reduzindo a potência requerida pelo ventilador e atenuando a sobressecagem; vazões específicas elevadas acarretam queda na eficiência de secagem e não devem ser inferiores a determinado limite, ocorrendo o processo dentro do tempo de armazenamento seguro, que, por seu turno, é dependente do teor de umidade inicial e da temperatura média do grão (SHOVE, 1973; MOREY *et alii*, 1979; FEDDES, 1980)

A adição de calor suplementar ao ar ambiente não influi significativamente na vazão específica, podendo provocar a deterioração do produto, quando o sistema de secagem é dimensionado para vazões específicas aquém das mínimas recomendadas (THOMPSON & PIERCE, 1980).

Na determinação das vazões específicas é aceitável o emprego das médias diárias dos parâmetros climáticos, já que as oscilações horárias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente se tornam insignificantes após a passagem pelo grão; a condição do grão na camada superior, onde o processo de deterioração é mais intenso, é determinante na previsão das vazões específicas mínimas recomendadas (PIERCE & THOMPSON, 1979; THOMPSON & PIERCE, 1980).

PIERCE & THOMPSON (1979) sugerem não haver uma vazão específica ótima para a secagem a baixas temperaturas, visto que as condições climáticas são imprevisíveis; portanto, o delineamento dos projetos é baseado na probabilidade de sucesso ocorrente em anos passados. Num período de 10 anos, as vazões específicas mínimas de 1 ou 2 anos são quase sempre sensivelmente superiores às dos demais anos (PIERCE & THOMPSON, 1980).

Vazões específicas baixas permitem a introdução do conceito de teor de umidade de equilíbrio na montagem dos modelos matemáticos de simulação de secagem a baixas temperaturas (FRASER & MUIR, 1981). Vários pesquisadores têm ressaltado a importância do teor de umidade de equilíbrio na secagem realizada com vazões específicas reduzidas (STROHMAN & YOERGER,

1967; CHEN, 1971; ROSS *et alii*, 1973; ALDIS & FOSTER, 1980; ROSSI & ROA, 1980; LASSERAN, 1981). Assim, o grão acima da zona de secagem permanece com teor de umidade próximo ou igual ao inicial e abaixo em equilíbrio com as condições iniciais do ar depois de passar pelo ventilador BROOKER & McQUIGG, 1960; BROOKER *et alii*, 1974; FRIESEN & HARMS, 1980).

MOREY *et alii* (1978) e LOWER *et alii* (s. d.) sugerem à secagem do milho com ar natural teor de umidade inicial não superior a 22-24% (base úmida). Teor de umidade inicial elevado está associado a tempo de armazenamento seguro reduzido, significando decréscimo no tempo máximo de secagem admissível, provocando brusca elevação na vazão específica mínima e na potência requerida. A resistência ao fluxo de ar é significativamente aumentada na parte inferior do silo secador, quando o teor de umidade do grão é superior a 22% (base úmida), decorrente da maior susceptibilidade do produto úmido ao efeito da compressão e conseqüente redução do espaço intergranular (GREIG, 1979).

De acordo com FRASER (1979), o emprego das vazões específicas mínimas recomendadas, a secagem até um teor de umidade final correspondente à média do lote e teores de umidade inicial mais baixos são fatores decisivos na redução do consumo de energia na secagem a baixas temperaturas.

METODOLOGIA

O balanço de calor na secagem pode ser expresso pela equação (BROOKER *et alii*, 1974),

$$Ve = (hm \times MS \times v \times (TU_i - TU_e)) / (60 \times Ca \times (ts - tg) \times tp) \dots \dots \dots 1$$

Ve = vazão específica, $m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-3}$;

Ca = calor específico do ar ambiente, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

hm = calor latente de vaporização da água contida no grão, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

MS = matéria seca, $\text{kg} \cdot m^{-3}$;

tp = período de secagem, h;

tg = temperatura do ar, após a passagem pelo grão, $^\circ\text{C}$;

ts = temperatura de bulbo seco média do ar no plenum correspondente ao período tp, $^\circ\text{C}$;

TUe = teor de umidade de equilíbrio ou teor de umidade final, base seca, decimal;

TUi = teor de umidade inicial, base seca, decimal;

v = volume específico do ar no plenum, $m^3 \cdot \text{kg}^{-1}$;

60 = fator de conversão de h em minuto.

Na equação 1, o calor sensível cedido pelo ar é igual ao calor latente de vaporização da água contida no grão. Outrossim, a equação não leva em

consideração mudanças de temperatura, caso o ar seja mais frio ou mais quente que o grão no início do processo de secagem.

A duração do processo de secagem a baixas temperaturas, t_p na equação 1, não deve exceder o período de armazenamento seguro do grão (SHOVE, 1973).

Considerando-se para o milho os teores de umidade inicial (base úmida) de 22%, 20% e 18%, a Fig. 1 possibilita a estimativa do tempo de armazenamento seguro de aproximadamente 7, 11 e 29 dias, respectivamente. Nesse estudo a temperatura escolhida para o estabelecimento do período máximo de secagem foi de $23,4^{\circ}\text{C}$, média do mês de março de 1975, a mais elevada do período analisado (GONÇALVES & FERREIRA, 1985).

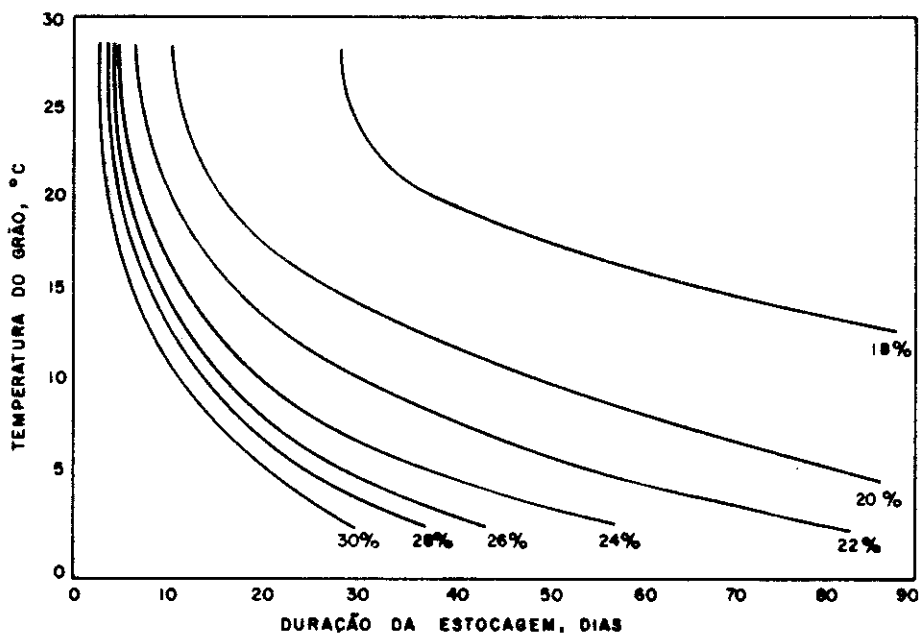


FIGURA 1 - Tempo de armazenamento seguro para o milho (THOMPSON, 1972, apud ROSSI & ROA, 1980).

($T_{Ui} - T_{Ue}$) na equação 1 representa o gradiente de umidade ao longo da zona de secagem (Fig 2), variando de T_{Ui} (teor de umidade inicial do grão) a T_{Ue} (teor de umidade de equilíbrio do grão).

O teor de umidade inicial é conhecido e o teor de umidade de equilíbrio ou final é obtido pela equação de HENDERSON modificada (AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK, 1983).

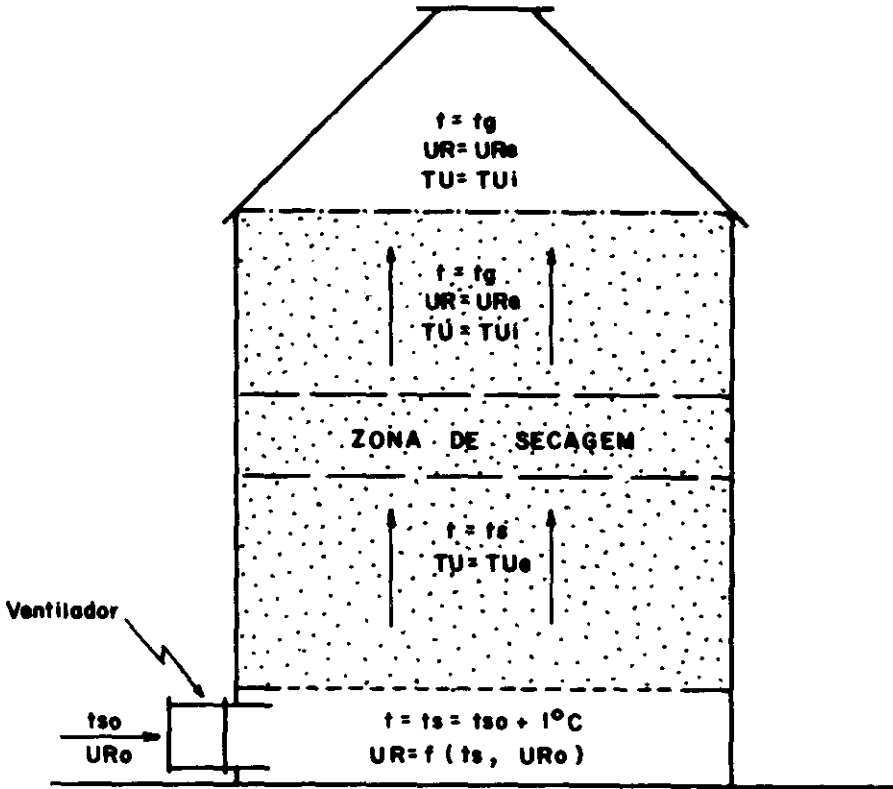


FIGURA 2 - Processo de secagem em camada fixa (BROOKER et alii, 1974).

$$TUE = ((\ln(1 - UR))/(-K \times (ts + C)))^{1/N} \dots\dots\dots 2$$

TUe = teor de umidade de equilíbrio ou final, base seca, porcentagem;
 UR = umidade relativa média do ar no plenum, decimal;
 ts = temperatura de bulbo seco média do ar no plenum, °C;
 C = 49,810, K = 8,6541 x 10⁻⁵, N = 1,8634 (C, K e N são constantes para o milho).

A temperatura do ar no plenum ts correspondente à temperatura de bulbo seco média do ar ambiente no período de secagem considerado acrescida de 1°C (SHOVE, 1973), decorrente do aquecimento do ar pelo ventilador e respectivo motor elétrico, já que a ventilação é realizada por insuflação.

A umidade relativa média do período é determinada pela equação 3. De acordo com a Fig. 3, com o aumento da temperatura de bulbo seco a pressão de vapor atual permanece constante, ao passo que a pressão de vapor do ar saturado aumenta de P_{so} para P_{ss} incrementando-se a capacidade de retenção de umidade do ar.

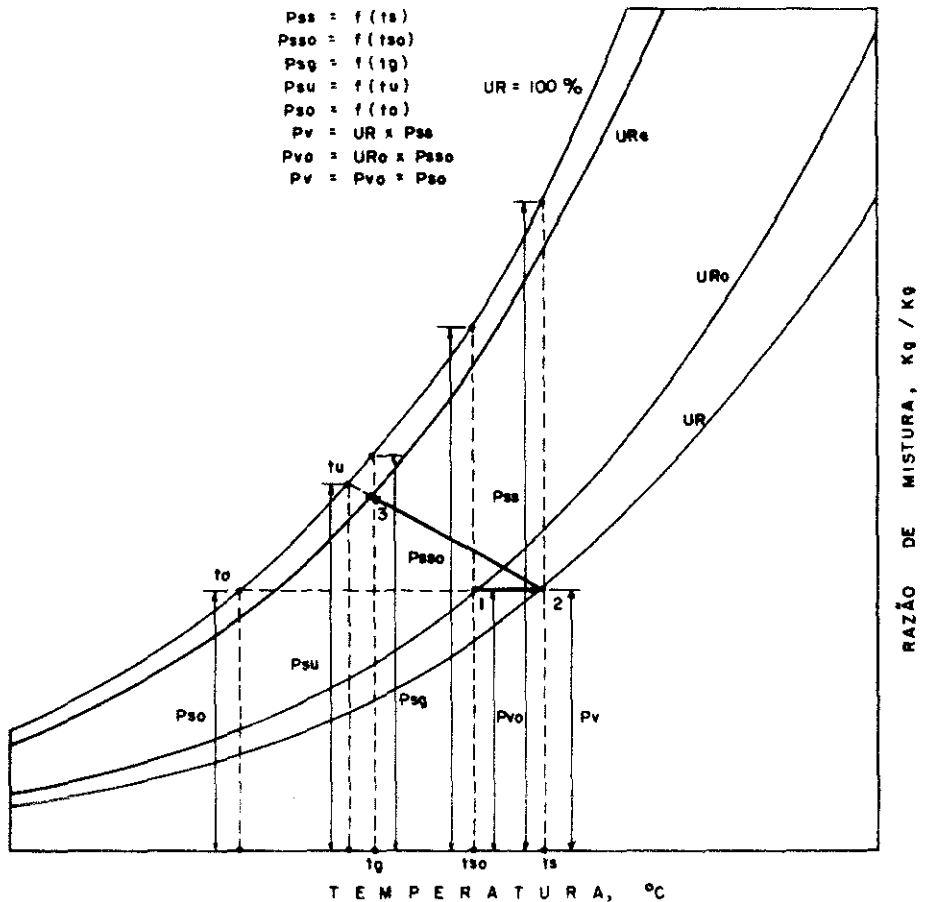


FIGURA 3 - Processo adiabático de secagem (estado 1: ar ambiente antes do ventilador e respectivo motor elétrico; estado 2: ar no plenum, aquecido pelo ventilador e respectivo motor elétrico; estado 3: ar após o processo de secagem adiabático).

$$UR = (P_{sso} \times UR_o) / P_{ss} \dots\dots\dots 3$$

UR = umidade relativa do ar ambiente, no plenum, decimal;

P_{sso} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco média do ar ambiente, antes de passar pelo ventilador, Pa;

UR_o = umidade relativa média do ar ambiente, antes de passar pelo ventilador, decimal;

P_{ss} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco média, no plenum, Pa.

Na equação 1 (ts - tg) representa o gradiente de temperatura ao longo da zona de secagem (Fig. 2), variando de ts (temperatura de bulbo seco média do ar no plenum) a tg (temperatura do ar após o processo de secagem adiabático).

A temperatura de equilíbrio tg (temperatura do ar após a passagem pelo grão) é estimada por processo iterativo através da equação 4, desenvolvida a partir das equações psicrométricas básicas propostas pelo AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK (1983).

$$((P_{su} - U_{re} \times P_{sg}) - ((1006,9254 \times (P_{su} - P_{atm})) \times (1 \times 0,15577 \times U_{re} \times P_{sg} / P_{atm}))) / (0,62194 \times hu) \times (T_u - T_g) = 0 \dots\dots\dots 4$$

hu = calor latente de vaporização da água à temperatura de bulbo úmido, J.kg⁻¹;

P_{atm} = pressão atmosférica local, 93.256 Pa;

P_{su} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo úmido, Pa;

P_{sg} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de equilíbrio tg, Pa;

T_g = temperatura de equilíbrio, K;

T_u = temperatura de bulbo úmido média do período de secagem, K;

U_{re} = umidade relativa de equilíbrio, decimal.

A temperatura de bulbo úmido média, Tu, do período de secagem considerado foi estimada mediante emprego das equações empíricas 5, 6, 7 e 8 (CHAU, 1980).

Apesar da equação 5 ser válida somente para a pressão atmosférica de 101.325 Pa, é tolerável sua aplicação para altitudes de até 1.000 m (NAVARRO, 1981).

$$t_u = t_o + (1,57853 \times 10^{-5} d^3 - 4,13278 \times 10^{-3} d^2 + 0,587189d) \times \exp((5,6038 \times 10^{-5} d - 1,97368 \times 10^{-2}) \times (t_o^{1,15724})) \dots\dots\dots 5$$

0 ≤ to ≤ 40°C e 0 ≤ ts ≤ 82°C.

$$t_o = 33,38269(P_{so})^{0,2226162} + 7,1560191n(P_{so}) - 26,39589 \dots\dots\dots 6$$

0 ≤ ts ≤ 100°C.

$$d = t_s - t_o \dots\dots\dots 7$$

$$P_{so} = UR \times P_{ss} \dots\dots\dots 8$$

- t_u = temperatura de bulbo úmido, °C;
 t_o = temperatura do ponto de orvalho, °C;
 P_{so} = pressão de vapor à temperatura do ponto de orvalho kPa;
 t_s = temperatura de bulbo seco média do ar no plenum, °C;
 UR = umidade relativa média no plenum, decimal;
 P_{ss} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco média, kPa;
 \exp = "e" elevado a... (e = 2,718281828).

O ar acima da zona de secagem (Fig. 2) está em equilíbrio com o teor de umidade inicial do grão. Ao passar pela zona de secagem, o ar retira umidade do grão por evaporação e é resfriado durante o processo de t_s (temperatura de bulbo seco média no plenum) a t_g (temperatura de equilíbrio), conforme esquema da Fig. 3. Portanto, a umidade relativa de equilíbrio UR_e da equação 4 é estimada em função do teor de umidade inicial do grão e da temperatura de equilíbrio, através da equação 9.

$$UR_e = 1 - \exp(-K \times (t_g + C) \times (TUI)^N) \dots\dots\dots 9$$

UR_e = umidade relativa de equilíbrio decimal;
 t_g = temperatura de equilíbrio, °C;
 TUI = teor de umidade inicial do grão, base seca, porcentagem;
 \exp = "e" elevado a... (e = 2,718281828);
 $C = 49,810$, $N = 1,8634$ e $K = 8,654 \times 10^{-5}$ (C, N e K são constantes para o milho).

A pressão de vapor do ar saturado P_s (AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK, 1983), equação 10, pode ser P_{so} e P_{ss} , nas equações 3 e 8, P_{su} e P_{sg} , na equação 4, e P_{so} , na equação 6, conforme t (temperatura) seja t_{so} (temperatura de bulbo seco do ar antes de passar pelo ventilador), t_s (temperatura de bulbo seco do ar no plenum), t_u (temperatura de bulbo úmido), t_g (temperatura de equilíbrio ou temperatura do grão no final do processo de secagem) e t_o (temperatura do ponto de orvalho), respectivamente (Fig. 3).

$$P_s = \exp\left(\frac{(A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4)/(FT - GT^2) + \ln R}{273,15 \text{ K} \leq T \leq 533,15 \text{ K}}\right) \dots\dots\dots 10$$

$$T = t + 273,15 \dots\dots\dots 11$$

P_s = pressão de vapor do ar saturado à temperatura T, Pa;
 T = temperatura, K;
 t = temperatura, °C;
 $A = -27405,526$, $B = 97,5413$, $C = -0,146244$, $D = 1,2558 \times 10^{-4}$,
 $E = -4,8502 \times 10^{-8}$, $F = 4,34903$, $G = 3,9381 \times 10^{-3}$,
 $R = 22105649,25$.

O calor latente de vaporização da água hu, na equação 4, é determinado pela equação 12 (AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK, 1983).

$$hu = 2502535,259 - 2385,76424 \times (Tu - 273,15) \dots\dots\dots 12$$

$273,15 \text{ K} \leq Tu \leq 338,72 \text{ K}.$

$$Tu = tu + 273,15$$

hu = calor latente de vaporização da água à temperatura de bulbo úmido, J.kg⁻¹

TU = temperatura de bulbo úmido, K;

tu = temperatura de bulbo úmido, °C.

O calor requerido à evaporação da água contida no grão é função do seu teor de umidade e da temperatura durante a secagem (BROOKER *et alii*, 1974). Foram adotados na sua estimativa os valores correspondentes ao teor de umidade de equilíbrio do grão e à temperatura de bulbo seco, conferindo-lhe o valor máximo e uma margem adicional de segurança no cálculo da vazão específica Ve.

O calor latente de vaporização da água no milho foi estimado pela equação 13 (STROHMAN & YOERGER, 1967; BROOKER, 1967).

$$hm = (2,326000325 + 2,082468091 \times \exp(-0,1232 \times T_{ue})) \times (1075,8965 - 1,025694 \times ts) \dots\dots\dots 13$$

hm = calor latente de vaporização da água contida no milho, kJ.kg⁻¹;

ts = temperatura de bulbo seco, °C;

T_{ue} = teor de umidade de equilíbrio, base seca, porcentagem;

exp = "e" elevado a. . . (e = 2,718281828).

O teor de matéria seca, MS na equação 1, é considerado o mesmo no início e no final da operação de secagem (BROOKER *et alii*, 1974). Na determinação das vazões específicas de ar é calculado o teor de matéria seca para cada metro cúbico de milho ao teor de umidade inicial, a partir da massa específica aparente estimada pela equação 14 (BRUSEWITZ, 1975). A massa específica aparente do milho, segundo o mesmo pesquisador, decresce até o teor de umidade de 30% (base úmida), aumentando a seguir.

$$MS = MA \times (1 - TU_i) \dots\dots\dots 14$$

$$MA = 1086,3 - 2971TU_i + 4810(TU_i)^2 \dots\dots\dots 15$$

MS = matéria seca, kg . m⁻³ do produto úmido;

MA = massa específica aparente, kg . m⁻³;

TU_i = teor de umidade inicial do milho, base úmida, decimal.

Com base nas equações psicrométricas fornecidas pelo AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK (1983) e na equação 10, foi

calculado o volume específico v , na equação 1, para o ar no plenum do silo secador.

- $v = 287T_s(P_{atm} - UR \times P_{ss}) \dots\dots\dots 16$
 $T_s = t_s + 273,15 \dots\dots\dots 17$
 v = volume específico do ar no plenum, $m^3 \cdot kg^{-1}$;
 P_{atm} = pressão atmosférica local, 93.256 Pa;
 P_{ss} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco média no plenum, Pa;
 T_s = temperatura de bulbo seco média do ar no plenum, K;
 t_s = temperatura de bulbo seco média do ar no plenum, °C;
 UR = umidade relativa média do ar no plenum, decimal.

O calor específico C_a , na equação 1, foi calculado para as condições no plenum pela equação (Brooker, 1966, apud BLOOME & SHOVE 1971).

- $C_a = 1,006925541 + (1,166489535 \times UR \times P_{ss}) / (P_{atm} - UR \times P_{ss}) \dots 18$
 C_a = calor específico do ar ambiente no plenum, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$;
 P_{atm} = pressão atmosférica média local, 93.256 Pa;
 P_{ss} = pressão de vapor do ar saturado à temperatura de bulbo seco média no plenum, Pa;
 UR = umidade relativa média no plenum, decimal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação da secagem do milho a granel em silo com ar natural foram empregados os parâmetros climáticos, temperatura de bulbo seco e umidade relativa, do ano de 1971, cujo potencial de secagem foi o mais baixo dentro do período de 10 anos analisado de 1971 a 1975 e de 1977 a 1981 (GONÇALVES & FERREIRA, 1985). Outrossim, não foram analisados os períodos de secagem contínua, já que não foi possível atingir o teor de umidade recomendado ao armazenamento seguro (Quadro 4).

Os valores das vazões específicas contidos nos Quadros 8, 9 e 10 correspondem aos mínimos necessários à remoção da umidade do milho até os níveis indicados pelas condições de equilíbrio entre o ar e o grão dentro dos períodos de secagem considerados (7 dias, 11 dias e 29 dias) e respectivos turnos de operação do ventilador (9 às 17 h, 9 às 18 h e 8 às 18 h). A vazão específica está estritamente relacionada ao tempo de armazenamento seguro do grão. Vazões específicas aquém do mínimo recomendado impossibilitam o percurso da frente de secagem por todo o produto dentro do tempo de armazenamento seguro compatível com o teor de umidade inicial, provocando a deterioração das camadas superiores. Outrossim, para a determinação das vazões es-

pecíficas adequadas é necessário a compreensão perfeita das relações que determinam o equilíbrio entre o teor de umidade do grão e os parâmetros climáticos médios, temperatura de bulbo seco e umidade relativa, dos períodos máximos de secagem admissíveis. Na secagem a baixas temperaturas essas condições determinam até que ponto é possível secar o produto. O volume de ar requerido por unidade de tempo e por unidade de volume do produto a ser seco (vazão específica) é apenas um recurso para a retirada da quantidade de umidade removível, cujo limite inferior é indicado pelo teor de umidade de equilíbrio, dependendo das condições climáticas médias vigentes. Permanecendo inmutáveis as características psicrométricas médias do ar ambiente durante o período de secagem, é impossível a redução do teor de umidade do produto, além do nível imposto pelas condições de equilíbrio, apenas com o aumento das vazões específicas, havendo uma sucessão intermitente de períodos de secagem e reumidificação. Daí decorre a vantagem do emprego das vazões específicas iguais ou pouco superiores às mínimas recomendadas em relação à economia de energia durante o processo.

A secagem seletiva, nos horários em que as condições climáticas foram mais favoráveis (Quadros 1, 2 e 3), requerem vazões específicas mínimas mais elevadas para o mesmo teor de umidade inicial (Quadros 8, 9 e 10). O evento está relacionado ao fato de, nos horários selecionados mais adequados à secagem, o número de horas de operação do ventilador ser inferior em relação ao horário das 8 às 18 h, em que as condições foram mais drásticas. Nas condições simuladas, foi verificada uma queda de 0,3 a 0,7 pontos percentuais no teor de umidade final do milho com a passagem do horário de operação do ventilador das 8 às 18 h para o das 9 às 17 h (Quadros 5, 6 e 7). Constatou-se que com essa mudança de horário de operação do ventilador, as vazões específicas mínimas foram aumentadas entre 12 e 25% (Quadros 8, 9 e 10). Tais incrementos foram decorrentes da redução em 2 h no tempo de operação do ventilador. Outrossim, para os teores de umidade inicial inferiores a flexibilidade do processo de secagem foi maior, já que o tempo de secagem permissível foi significativamente aumentado ao reduzir o teor de umidade inicial de poucos pontos percentuais.

Para os períodos de secagem mais longos, constatou-se com a aproximação do inverno o incremento nas vazões específicas mínimas (Quadros 9 e 10). O fenômeno é resultante da queda do potencial de secagem do ar ambiente decorrente do arrefecimento da temperatura (Quadros 1, 2 e 3).

QUADRO 1 - Parâmetros climáticos médios do ar ambiente para períodos de secagem de 7 dias, correspondentes ao ano de 1971.

Período de secagem.	contínua			9 às 17 h			9 às 18 h			8 às 18 h		
	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)
01/03 a 07/03	20,7	83,0	78,1	23,9	69,3	65,3	23,8	69,5	65,5	23,3	71,4	67,2
09/03 a 15/03	22,7	82,6	77,8	25,8	70,5	66,5	25,7	70,8	66,7	25,2	72,8	68,6
17/03 a 23/03	22,8	79,1	74,5	26,0	65,7	61,9	25,9	66,5	62,7	25,4	68,4	64,5
25/03 a 31/03	21,1	85,6	80,5	24,2	73,6	69,3	24,1	74,0	69,7	23,6	75,9	71,5
02/04 a 08/04	21,6	75,0	70,6	25,7	62,2	58,6	25,6	62,7	59,1	25,0	64,6	60,9
10/04 a 16/04	21,2	81,3	76,1	24,5	68,8	64,8	24,4	69,4	65,4	23,9	71,3	67,2
18/04 a 24/04	18,6	83,1	78,1	20,6	75,9	71,4	20,6	76,3	71,8	20,2	77,8	73,2
26/04 a 02/05	18,6	75,3	70,8	22,4	58,1	54,7	22,1	58,9	55,4	21,6	60,6	57,0
04/05 a 10/05	17,6	87,2	81,9	19,8	79,1	74,4	19,8	79,3	74,6	19,4	80,5	75,7
12/05 a 18/05	17,2	77,2	72,5	20,6	64,4	60,6	20,5	65,0	61,1	19,9	67,0	63,0
20/05 a 26/05	18,4	77,2	72,5	21,3	65,5	61,6	21,1	66,1	62,2	20,7	67,8	63,8
28/05 a 03/06	14,8	77,4	72,6	18,8	59,5	55,9	18,6	60,2	56,6	17,9	63,1	59,3
05/06 a 11/06	15,0	79,9	74,9	17,5	68,3	64,1	17,4	68,8	64,6	16,9	70,7	66,4
13/06 a 19/06	13,6	88,8	83,2	14,4	85,3	80,0	14,4	85,4	80,1	14,2	85,9	80,5
21/06 a 27/06	18,1	79,8	75,0	20,8	68,6	64,5	20,8	68,8	64,7	20,2	71,3	67,0

tso = temperatura de bulbo seco do ar antes de passar pelo ventilador.

URo = umidade relativa média do ar antes de passar pelo ventilador.

UR = umidade relativa média do ar no plenum, que é função da temperatura de bulbo seco média tso mais 1°C.

QUADRO 2 - Parâmetros climáticos médios do ar ambiente para períodos de secagem de 11 dias, correspondentes ao ano de 1971.

Período de secagem.	contínua			9 às 17 h			9 às 18 h			8 às 18 h		
	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)
01/03 a 11/03	21,2	82,9	78,0	24,4	69,4	65,4	24,3	69,7	65,7	23,9	71,6	67,4
13/03 a 23/03	23,2	79,0	74,4	26,6	64,7	61,0	26,4	65,5	61,8	25,9	67,6	63,7
25/03 a 04/04	21,3	82,4	77,5	25,0	69,9	65,9	24,8	70,4	66,3	24,3	72,2	68,0
06/04 a 16/04	21,2	80,2	75,4	24,4	68,6	64,6	24,3	69,1	65,1	23,7	71,0	66,9
18/04 a 28/04	17,6	81,5	76,5	20,4	69,1	65,0	20,3	69,7	65,5	19,8	71,3	67,0
30/04 a 10/05	18,3	83,4	78,3	20,6	75,0	70,5	20,6	75,4	70,9	20,2	76,5	71,9
12/05 a 22/05	17,6	76,8	72,1	21,1	63,2	59,5	21,0	63,9	60,1	20,4	66,0	62,1
24/05 a 03/06	15,6	79,6	74,7	18,7	65,4	61,5	18,6	66,1	62,1	18,1	68,2	64,1
05/06 a 15/06	14,3	82,6	77,4	16,2	73,4	68,9	16,2	73,7	69,2	15,8	75,3	70,7
17/06 a 27/06	16,5	84,2	79,0	18,3	76,9	72,2	18,3	77,0	72,3	17,9	78,6	73,8

tso = temperatura de bulbo seco média do ar antes de passar pelo ventilador.

URo = umidade relativa média do ar antes de passar pelo ventilador.

UR = umidade relativa média do ar no plenum, que é função da temperatura de bulbo seco média tso mais 1°C.

QUADRO 3 - Parâmetros climáticos médios do ar ambiente para períodos de secagem de 29 dias, correspondentes ao ano de 1971.

Período de secagem.	contínua			9 às 17 h			9 às 18 h			8 às 18 h		
	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)	tso (°C)	URo (%)	UR (%)
02/03 a 30/03	21,9	82,5	77,6	25,0	70,2	66,2	24,9	70,7	66,6	24,4	72,6	68,4
01/04 a 29/04	19,9	79,6	74,8	23,1	67,2	63,3	23,0	67,8	63,8	22,5	69,6	65,5
01/05 a 29/05	17,9	80,7	75,8	20,1	69,7	65,5	20,0	70,3	66,1	19,6	71,8	67,5
31/05 a 28/06	15,6	82,1	77,0	17,9	71,8	67,4	17,9	72,1	67,7	17,4	74,0	69,5

tso = temperatura de bulbo seco média do ar antes de passar pelo ventilador.

URo = umidade relativa média do ar antes de passar pelo ventilador.

UR = umidade relativa média do ar no plenum, que é função da temperatura de bulbo seco média tso mais 1°C.

QUADRO 4 - Teores de umidade de equilíbrio do milho, base úmida, no final do processo contínuo de secagem com ar natural, no ano de 1971.

Período de secagem	TUi (%)	TUe (%)	TUo (%)	Período de secagem	TUi (%)	TUe (%)	Período de secagem	TUi (%)	TUe (%)
01/03 a 07/03	22	16,1	17,3	01/03 a 11/03	20	16,0	02/03 a 30/03	18	15,9
09/03 a 15/03	22	15,8	17,0	13/03 a 23/03	20	15,1	01/04 a 29/04	18	15,5
17/03 a 23/03	22	15,1	16,2	25/03 a 04/04	20	15,9	01/05 a 29/05	18	15,9
25/03 a 31/03	22	16,6	18,0	06/04 a 16/04	20	15,5	31/05 a 28/06	18	16,4
02/04 a 08/04	22	14,5	15,4	18/04 a 28/04	20	16,1			
10/04 a 16/04	22	15,6	16,9	30/04 a 10/05	20	16,4			
18/04 a 24/04	22	16,3	17,6	12/05 a 22/05	20	15,2			
26/04 a 02/05	22	14,8	15,8	24/05 a 03/06	20	15,9			
04/05 a 10/05	22	17,3	18,9	05/06 a 15/06	20	16,6			
12/05 a 18/05	22	15,3	16,4	17/06 a 27/06	20	16,7			
20/05 a 26/05	22	15,2	16,2						
28/05 a 03/06	22	15,6	16,7						
05/06 a 11/06	22	16,0	17,2						
13/06 a 19/06	22	18,1	19,9						
21/06 a 27/06	22	15,7	16,8						

TUi = teor de umidade inicial do milho, base úmida.

TUe = teor de umidade de equilíbrio para o ar ambiente aquecido de 1°C.

TUo = teor de equilíbrio para o ar ambiente sem aquecimento.

QUADRO 5 - Teores de umidade de equilíbrio, base úmida, do milho, no final do processo de secagem seletiva com ar natural.

Período de secagem	TU _i (%)	Período de operação do ventilador		
		9 às 17 h (%)	9 às 18 h (%)	8 às 18 h (%)
01/03 a 07/03	22	13,4	13,4	13,7
09/03 a 15/03	22	13,4	13,5	13,8
17/03 a 23/03	22	12,6	12,8	13,1
25/03 a 31/03	22	14,0	14,1	14,5
02/04 a 08/04	22	12,1	12,2	12,6
10/04 a 16/04	22	13,2	13,3	13,7
18/04 a 24/04	22	14,7	14,8	15,1
26/04 a 02/05	22	11,8	11,9	12,2
04/05 a 10/05	22	15,4	15,4	15,7
12/05 a 18/05	22	12,9	12,9	13,3
20/05 a 26/05	22	13,0	13,1	13,4
28/05 a 03/06	22	12,2	12,4	12,9
05/06 a 11/06	22	13,7	13,8	14,2
13/06 a 19/06	22	17,2	17,2	17,3
21/06 a 27/06	22	13,5	13,5	14,0

TU_i = teor de umidade inicial, base úmida.

QUADRO 6 - Teores de umidade de equilíbrio, base úmida, do milho, no final do processo de secagem seletiva com ar natural.

Período de secagem	TU _i (%)	Período de operação do ventilador		
		9 às 17 h (%)	9 às 18 h (%)	8 às 18 h (%)
01/03 a 11/03	20	13,3	13,4	13,7
13/03 a 23/03	20	12,4	12,6	12,9
25/03 a 04/04	20	13,4	13,5	13,8
06/04 a 16/04	20	13,2	13,3	13,7
18/04 a 28/04	20	13,6	13,7	14,0
30/04 a 10/05	20	14,6	14,6	14,9

(Continuação)

Período de secagem	TUi (%)	Período de operação do ventilador		
		9 às 17 h (%)	9 às 18 h (%)	8 às 18 h (%)
12/05 a 22/05	20	12,6	12,7	13,1
24/05 a 03/06	20	13,2	13,3	13,7
05/06 a 15/06	20	14,7	14,8	15,1
17/06 a 27/06	20	15,1	15,1	15,5

*TUi = teor de umidade inicial, base úmida.***QUADRO 7 - Teores de umidade de equilíbrio, base úmida, do milho, no final do processo de secagem seletiva com ar natural.**

Período de secagem	TUi (%)	Período de operação do ventilador		
		9 às 17 h (%)	9 às 18 h (%)	8 às 18 h (%)
02/03 a 30/03	18	13,4	13,5	13,9
01/04 a 29/04	18	13,1	13,2	13,5
01/05 a 29/05	18	13,7	13,8	14,1
31/05 a 28/06	18	14,3	14,3	14,7

*TUi = teor de umidade inicial, base úmida.***QUADRO 8 - Vazões específicas mínimas para a secagem seletiva do milho com teor de umidade inicial de 22%, base úmida.**

Período de secagem	Período diário de secagem		
	9 às 17 h ($m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-3}$)	9 às 18 h ($m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-3}$)	8 às 18 h ($m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-3}$)
01/03 a 07/03	10,716	9,642	9,097
09/03 a 15/03	10,503	9,333	9,261
17/03 a 23/03	9,718	8,897	8,503

(Continuação)

Período secagem	Período diário de secagem		
	9 às 17 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	9 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	8 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)
25/03 a 31/03	11,310	10,043	9,718
02/04 a 08/04	9,349	8,472	8,096
10/04 a 16/04	10,486	9,542	9,109
18/04 a 24/04	12,661	11,234	10,489
26/04 a 02/05	9,598	8,858	8,246
04/05 a 10/05	13,217	12,391	11,200
12/05 a 18/05	10,082	9,700	9,019
20/05 a 26/05	10,669	9,708	9,153
28/05 a 03/06	10,432	9,572	8,975
05/06 a 11/06	11,916	10,586	9,975
13/06 a 19/06	16,911	15,220	13,542
21/06 a 27/06	11,050	10,207	9,436

QUADRO 9 - Vazões específicas mínimas para a secagem seletiva do milho com teor de umidade inicial de 20%, base úmida.

Período de secagem	Período diário de secagem		
	9 às 17 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	9 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	8 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)
01/03 a 11/03	6,066	5,373	5,058
13/03 a 23/03	5,498	5,012	4,665
25/03 a 04/04	5,979	5,293	5,129
06/04 a 16/04	6,162	5,315	5,056
18/04 a 28/04	6,426	5,687	5,585
30/04 a 10/05	6,841	6,157	5,962
12/05 a 22/05	6,042	5,358	5,217
24/05 a 03/06	6,433	5,866	5,477
05/06 a 15/06	7,511	6,630	6,206
17/06 a 27/06	7,629	6,866	6,321

QUADRO 10 - Vazões específicas mínimas para a secagem seletiva do milho com teor de umidade inicial de 18%, base úmida.

Período de secagem	Período de operação do ventilador		
	9 às 17 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	9 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)	8 às 18 h (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³)
02/03 a 30/03	2,014	1,833	1,687
01/04 a 29/04	2,073	1,887	1,781
01/05 a 29/05	2,324	2,041	1,963
31/06 a 28/06	2,378	2,253	2,035

CONCLUSÕES

A determinação das vazões específicas mínimas para a secagem do milho a granel com ar natural, em Botucatu, mediante simulação, permitiu chegar às seguintes conclusões:

1. A redução do teor de umidade do grão em poucos pontos percentuais aumenta o período máximo de secagem permissível (coincidente com o período de armazenamento seguro), refletindo na queda significativa das vazões específicas mínimas requeridas. Portanto, o atraso da colheita dentro do possível pode aumentar a flexibilidade do processo de secagem a baixas temperaturas e acarretar substancial decréscimo na energia requerida pelo ventilador;

2. A escolha de turnos diários para a realização da secagem seletiva deve ser feita com critério, já que uma redução no tempo de operação do ventilador de apenas algumas horas requer substanciais incrementos nas vazões específicas mínimas para a realização da secagem dentro do período de armazenamento seguro;

3. Com a aproximação do inverno ocorre incremento nas vazões específicas mínimas decorrente da queda do potencial de secagem do ar ambiente. Entretanto, tal incremento não é significativo quando comparado ao decréscimo brusco das vazões específicas requeridas ocasionado pela queda do teor de umidade de equilíbrio provocado pelo atraso na colheita.

ABSTRACT

Minimum airflow rates are recommended to ambient air grain drying to reduce fan power requirements and grain overdrying.

Historical weather records from 1971 were selected to determine airflow rates for drying corn with ambient air in Botucatu, São Paulo State. 1971 was the poorest drying year in the 10-year period from 1971 through 1975 and 1977 through 1981.

In the simulation of ambient air corn drying initial moisture contents, wet basis, used were 22%, 20% and 18% within allowable storage periods of 7, 11 and 29 days, respectively, for monthly average dry bulb temperature of 23,4°C, the upmost in the 10-year period. The average dry bulb temperature and relative humidity were calculated from the hourly data recorded at the Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu county, São Paulo State, weather station.

Due to impracticable continuous drying occurrence, only selective ambient air drying was considered, within daily periods from 9 a. m. to 5 p. m., 9 a. m. to 6 p. m. and 8 a. m. to 6 p. m.

The simulation results showed that the minimum airflow rates decrease rapidly with decreasing grain equilibrium moisture content a few percentage points. Furthermore, the reduction in daily fan operation a few hours requires significant increases in minimum airflow rates to accomplish ambient air corn drying within the permissible storage time.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRICULTURAL ENGINEERS YEARBOOK, 3^a ed. Saint Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1983, 853 p.
- ALDIS, D. F. & FOSTER, G. H. Moisture changes in grain from exposure to ambient air. *Trans. ASAE*, 23(3):753-60, 1980.
- BLOOME, P. D. & SHOVE, G. C. Near equilibrium simulation of shelled corn drying. *Trans. ASAE*, 14(4): 709-12, 1971.
- BROOKER, D. B. Mathematical model of the psychrometric chart. *Trans. ASAE*, 10(4): 558-60, 563, 1967.
- BROOKER, D. B.; F. W. BAKKER-ARKEMA; HALL, C. W. Introductory analysis of fixed bed drying systems. In: *Drying cereal grains*. Westport, the AVI Publishing Company, 1974. Cap. 6, p. 130-39.
- BROOKER, D. B. & McQUIGG, J. D. Analysis of weather data pertinent to grain drying. *Trans. ASAE*, 3:116-18, 119, 1960.
- BRUSEWITZ, G. H. Density of rewetted high moisture grains. *Trans. ASAE* 18(5):935-37, 938, 1975.

GONÇALVES, Vicente A. & FERREIRA, W. A. Vazões específicas mínimas para... 151

CHAU, K. V. *Some new empirical equations for properties of moist air.* **Trans. ASAE**, 23(5): 1266-71, 1980.

CHEN, C. S. Equilibrium moisture curves for biological materials. **Trans ASAE**, 14(5): 924-26, 1971.

FEDDES, J. J. R.; McQUITTY, J. B.; HARRISON, H. P. Grain drying with solar-heated air. **Canadian Agric. Eng.**, 22:81-84, 1980.

FRASER, B. M. **Solar grain drying in Canada: a simulation study.** Winnipeg, Universidade de Manitoba, 1979. 175 p. (Tese Mestrado).

FRASER, B. M. & MUIR, W. E. Airflow requirements predicted for drying grain with ambient and solar-heated air in Canada. **Trans ASAE**, 24(1): 208-10, 1981.

FRIESEN, O. H. & HARMS, H. P. **Movement of natural air through grain.** Winnipeg, Ministry of Agriculture, Agdex 732-1, 1980.

GONÇALVES, V. A. & FERREIRA, W. A. Potencial de secagem do milho a granel com ar natural em Botucatu, SP.

GREIG, D. J. **Drying in bulk storages - the principles.** University of Newcastle upon Tyne, 1979. 5 p.

LASSERAN, J. C. Aeração de grãos. Viçosa, CENTREINAR, 1981.

LOEWER Jr., O. J.; OVERHULTS, D. G.; HAMILTON, H. E. **Low temperature drying - use and limitations.** University of Kentucky, AEN-23, s. d. 3 p.

MOREY, R. V.; CLOUD, H. A.; GUSTAFSON, R. J.; PETERSON, D. W. Management of ambient air drying systems. **Trans. ASAE**, 22(6):1418-25, 1979.

MOREY, R. V.; GUSTAFSON, R. J.; CLOUD, H. A.; WALTER, K. L. Energy requirements for high-low temperature drying. **Trans ASAE**, 21(3): 562-67, 1978.

NAVARRO, S. **Aeration of grain in subtropical climates.** Bet-Dagan (Israel), Agricultural Research Organization, 1981. 124 p.

PIERCE, R. O. & THOMPSON, T. L. Management of solar and low-temperature grain drying systems - part I: operation strategies with full bin. **Trans. ASAE**, 1020-23, 1980.

PIERCE, R. O. & Thompson, T. L. **Solar grain drying in the North Central Region - simulation results.** **Trans. ASAE**, 22(1):178-87, 1979.

ROSS, I. J.; HAMILTON, H. E.; WHITE, G. M. **Principles of grain storage.** University of Kentucky, AEN-20, 1973. 10 p.

- ROSSI, S. J. & ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural.** São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295 p.
- SHOVE, G. C. New techniques in grain conditioning. In: SINHA, R. N. & MUIR, W. E. **Grain storage: part of a system.** Westport, The AVI Publishing Company, 1973. p. 209-28.
- STROHMAN, R. D. & YOERGER, R. R. A new equilibrium moisture-content equation. **Trans. ASAE**, 10(5): 675-77, 1967.
- THOMPSON, T. L. & PIERCE, R. O. Solar grain drying management. **Agric. Energy** 1:25-30, 1980.