

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

Embalagens para comercialização de hortaliças e frutas no Brasil

**Rita de Fátima Alves Luengo
Adonai Gimenez Calbo**
(Editores Técnicos)

Brasília, DF
2009

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Hortaliças
BR 060 Rodovia Brasília-Anápolis, Km 9
Caixa Postal 218, 70351-970
Brasília-DF
Telefone: (61) 3385-9105
E-mail: sac@cnph.embrapa.br

Comitê de Publicação da Embrapa Hortaliças

Presidente
Warley Marcos Nascimento

Editor Técnico
Mirtes Freitas Lima

Membros
Milza Moreira Lana
Ronessa Bartolomeu de Souza
Jadir Borges Pinheiro
Miguel Michereff Filho

Créditos

Normalização Bibliográfica
Rosane Mendes Parmagnani

Projeto Gráfico e Capa
Samuel Tabosa de Castro

Diagramação
Samuel Tabosa de Castro

1ª Edição

1ª Impressão (2010): 1.000 exemplares

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

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Hortaliças**

Luengo, Rita de Fátima Alves
Calbo, Adonai Gimenez

Embalagens para comercialização de hortaliças e frutas no Brasil / Rita de Fátima Alves Luengo e Adonai Gimenez Calbo, editores técnicos. - Brasília : Embrapa Hortaliças, 2009.

256 p. il.

ISBN 978-85-86413-18-6

1. Hortaliça - Comercialização - Embalagem 2. Hortaliça - Conservação I. Calbo, Adonai Gimenez. II. Título.

CDD 635.046

©Embrapa, 2009

Interações embalagem/umidade

Adonai Gimenez Calbo

Pesquisador Embrapa Instrumentação Agropecuária

Teor de água e frescor das frutas e hortaliças

Frutas e hortaliças usualmente possuem elevados teores de água (75 a 97%) que é muito importante para o desenvolvimento e o valor comercial das mesmas. Sob o ponto de vista de aparência, o frescor ou viço destes produtos depende principalmente da água no interior das células, a pressão de turgescência celular, que dá a sensação de firmeza do tato. O viço também está associado a um brilho das frutas e hortaliças, que diminui conforme o produto seca fazendo com que a água seja retida mais fortemente entre os componentes minúsculos, micrométricos e nanométricos nas paredes celulares. Para manter a pressão interna, as células precisam acumular água em quantidade suficiente, e a célula controla este reservatório de água graças à absorção e estocagem de moléculas orgânicas e minerais, que promovem a entrada de água por osmose. Destacada da planta, a fruta ou hortaliça não consegue mais absorver água e ao mesmo tempo continua perdendo água por transpiração. Como consequência a perda excessiva de água por transpiração causa:

- a) Amolecimento, ou perda de turgescência em berinjela, beterraba, cenoura, pimentão, laranja e uva;
- b) Perda de brilho em beterraba, cenoura, laranja, nectarina e uva. Este efeito visual é usualmente detectável com pequenas perdas de água inferiores a 2% (v/v);

- c) Enrugamento de produtos com elevados teores de água (> 95%), quando sujeitos a perda excessiva de água;
- d) Perda de peso de produto comercializável (água) em geral da ordem de 5% ou mais. A perda de valor de venda é muito maior;
- e) Aumento na liberdade de rotação do fruto em pêra e aumento da vibração das bagas da uva no interior das embalagens. Liberdade de rotação que facilita a ocorrência de danos mecânicos de rolamento, na pêra, e de despencamento, na uva durante o transporte rodoviário;
- f) Ressecamento e endurecimento superficial de alguns órgãos com alto teor de matéria seca como a batata-doce e a mandioca.

Para um balizamento, de acordo com KAYS (1991), a quantidade máxima de perda de água tolerável para algumas frutas e hortaliças com base na massa inicial do produto no momento da colheita é: alface (3,7%), aipo (10%), alho-poró ou alho-poró (7,0%), aspargo (8%), batata (7%), beterraba (7%), brócolos (4%), caqui (13%), cebola (10%), cenoura (8%), couve-flor (7%), ervilha verde (5%), espinafre (3%), feijão-vagem (41%), maçã (7,5%), milho-verde (7%), nectarina (21%), pepino (5%), pêra (6%), pêsego (16%), pimentão (7%), repolho (8%) e tomate (7%).

Transpiração

A evaporação da água a partir das superfícies hidratadas dos organismos vivos é denominada transpiração. Na superfície de certos produtos e no interior dos volumes gasosos intercelulares dos vegetais a pressão de vapor de água pouco difere da de uma superfície livre de água à mesma temperatura (Tabela 1), sendo, em geral, 1% menor. Diferentemente, ao redor dos órgãos, a atmosfera da câmara, em geral, possui pressão de vapor muito menor que a pressão de saturação. Conseqüentemente, o vapor de água se movimenta de onde a pressão é maior, nas superfícies hidratadas, para onde a pressão de vapor é menor, atmosfera da câmara de acordo com a equação que modula a taxa de transpiração.

Os órgãos vegetais, para se desenvolverem, possuem barreiras ao transporte do vapor de água como as cutículas pouco permeáveis à água em frutos, caules e folhas e peridermes formadas por camadas de células

achatadas e impregnadas de substâncias hidrofóbicas (e.g. suberina) nas superfícies de certos caules e raízes. A restrição às trocas de gases nas plantas, no entanto, não pode ser total, e por isto ocorrem aberturas reguláveis, os estômatos de frutos jovens e de folhas, e por aberturas intercelulares “permanentes”, as lenticelas, distribuídas em diferentes órgãos vegetativos e reprodutivos das plantas.

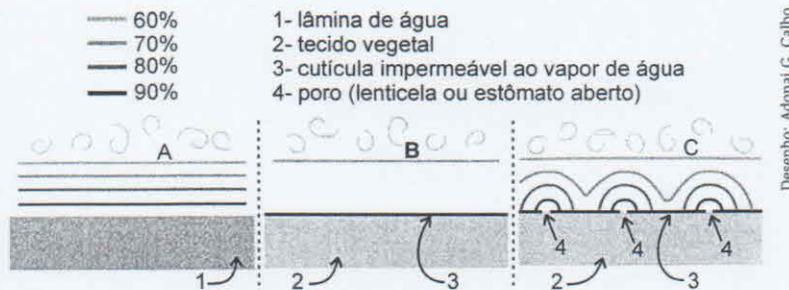


Figura 1- Ilustração de difusão de vapor de água através de camadas de ar estagnados sobre uma superfície livre de água (A), sobre um tecido vegetal revestido de cutícula impermeável ao vapor de água (B) e sobre um tecido dermal com cutícula impermeável e poros.

Em pós-colheita, sob condições equivalentes, as raízes são os órgãos que apresentam as maiores taxas de transpiração. Isto ocorre porque a raiz é um órgão especializado de absorção de água que é envolta por um tecido dermal através do qual a água se movimentava livremente, o que facilita a transpiração, que ocorre quase como se a raiz fosse recoberta por um filme de água. Frutos, folhas e estruturas caulinares como bulbos e tubérculos por outro lado possuem diversos tipos de proteção contra a transpiração.

Fatores que governam a evaporação

A evaporação de uma superfície livre de água é a base para se entender a transpiração dos produtos hortícolas. A quantidade de água evaporada por unidade de tempo depende da diferença de pressão de vapor entre a superfície de água e a atmosfera vizinha (**dpv**). Esta e outras variáveis básicas que controlam a taxa de evaporação são relacionadas pela equação de Dalton (eq. 1):

$$E = k A dpv p_R / p_B$$

eq. 1

Onde E é a taxa de evaporação (g); k é um parâmetro aerodinâmico que depende da velocidade do vento, das dimensões, da forma e da natureza da superfície; A é a área da superfície, p_R é a pressão atmosférica ao nível do mar (760 mm Hg) e p_B é pressão barométrica local expressa na mesma unidade que p_R . Assim, na equação de Dalton observa-se que a taxa de evaporação depende da velocidade do vento e da forma do objeto através do parâmetro k e da altitude mediante o efeito da pressão barométrica local (p_B).

Estas mesmas variáveis se prestam para estimar a evaporação a partir de superfícies aproximadamente saturadas, por exemplo, de caixas molhadas e de órgãos que perdem água como uma simples superfície molhada, como é o caso de algumas raízes recém colhidas. É interessante notar que a equação 1 também é utilizada para quantificar a condensação de água sobre superfícies molhadas e frias, sobre as quais a pressão de vapor de equilíbrio é menor do que a pressão de vapor na atmosfera ao redor. Isto ocorre, por exemplo, quando caixas de produtos hortícolas são retiradas da câmara fria e colocadas em ar quente e úmido. Sobre superfícies ligeiramente hidrofóbicas como a cutícula de certos frutos, a condensação é percebida como acúmulo e crescimento e formação de gotículas de água, enquanto que em superfícies mais molháveis, como raízes e a maioria das embalagens, a água condensada se espalha e molha enquanto é parcial ou totalmente absorvida pelo produto. A condensação sobre a superfície fria cessa quando a temperatura da superfície supera a denominada temperatura do ponto de orvalho, que é tanto menor quanto menor for a umidade relativa do ar.

Quanto ao termo déficit de pressão de vapor (dp_v), convém esclarecer que em pós-colheita, este é freqüentemente tomado como o necessário incremento na pressão de vapor para se atingir a saturação a uma dada temperatura ambiente (Tabela 1). Para estimar transpiração ou condensação com a equação 1, por outro lado, o termo dp_v deve realmente ser entendido como a diferença entre a pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície do produto com e a de vapor da atmosfera da câmara.

Espessura da camada de ar estagnada

O desenvolvimento de camadas espessas de ar estagnado é uma das formas efetivas para reduzir a transpiração de frutas e hortaliças durante o

transporte e o armazenamento. Uma das formas mais simples de aumentar a espessura da camada de ar estagnado é mediante o uso de embalagens ou da redução da ventilação aos valores mínimos necessários, para equilíbrio térmico e a manutenção de níveis adequados de O₂ e outros componentes gasosos (Fig. 1).

Para se ter uma idéia a respeito da formação da camada de ar estagnada sobre os órgãos vegetais, considera-se que o vento se move paralelamente a uma superfície plana de comprimento (L), uma folha, por exemplo. Exatamente sobre a lâmina, a velocidade do vento é considerada nula, e conforme a distância aumenta, a velocidade do vento também aumenta, de modo que camadas de ar de espessura infinitesimal e friccionando-se umas contra as outras representam o modo como a folha obstrui, parcialmente, a passagem do vento ao seu redor. Quando a distância até a folha se torna suficiente, o padrão de arraste do ar pelo vento deixa de ser laminar e passa a ser turbulento, o que faz com que as massas de ar nestas posições se movimentem como rodamoinhos, ou pequenos "pacotes de ar", enquanto a velocidade já assume valores ao redor da velocidade média do vento.

Assim, a espessura da camada de ar "estagnada" (δ) sob o órgão é uma barreira onde apenas transporte de vapor de água por difusão modula a transpiração, ou a perda de CO₂, de acordo com os gradientes de concentração destes gases. Segundo NOBEL (1991), a espessura da camada estagnada δ sobre uma superfície plana é dada aproximadamente por:

$$\delta = 4,0 (L / v)^{1/2} \quad \text{eq. 2}$$

Onde L é o comprimento em metros e v é a velocidade do vento em metros por segundo e δ é a espessura da camada de ar estagnada em milímetros. Nesta aproximação, não se espera que a espessura da camada de ar estagnada seja exatamente igual sobre toda a superfície e por esta razão variações locais de transpiração e de temperatura são esperadas. Para órgãos com outros formatos a relação entre a espessura da camada de ar estagnada também é proporcional à raiz quadrada da velocidade do vento, porém a relação não é exatamente igual à apresentada para uma folha plana (NOBEL, 1974).

Em pós-colheita, a espessura de camada de ar estagnada (laminar) costuma variar grosseiramente entre 1 mm ou menos em órgãos sob a

ação direta de ventos fortes ($30,0 \text{ km h}^{-1}$), no campo, até espessuras superiores a 10 mm no caso de órgãos embalados e sob ventilação restrita ($< 0,06 \text{ km h}^{-1}$).

Sensores de umidade relativa

Atualmente, em geral, os sensores mais utilizados para medir umidade relativa em pós-colheita são eletrônicos, porque são simples e possibilitam a obtenção de registros em computadores. Nestes sensores, uma resistência elétrica ou uma capacitância varia em função da umidade relativa do ar. Bons higrômetros deste tipo possuem uma faixa de trabalho, que em geral se estende entre 20% e 90% de umidade relativa com uma modesta precisão, que dificilmente excede 3%. Estes sensores eletrônicos, apesar de portáteis e práticos, infelizmente, não possuem precisão e sensibilidade para medir com confiabilidade as umidades relativas superiores a 90%. No microclima da embalagem, no entanto, a umidade relativa quase sempre é muito maior que 95%, mesmo quando a umidade relativa da câmara de armazenamento é baixa, isto é, 75%, e isto ocorre por causa do acondicionamento compacto dos produtos e da reduzida quantidade de aberturas de ventilação, usualmente da ordem de 5%. Consequentemente, os higrômetros comuns se tornam inúteis para estudar o microclima no interior das embalagens. Mais ainda, não é de se esperar que em curto espaço de tempo, instrumentos portáteis e de baixo custo possam subsidiar efetivamente o estudo de armazenamento de produtos embalados, mediante medidas confiáveis e com erro inferior a 1%, nesta faixa de 90 e 100% de umidade relativa.

Umidade relativa na embalagem

Em manuais de armazenamento e de transporte, valores de temperatura e de umidade relativa recomendáveis são tabelados, para diversas frutas e hortaliças. Estas temperaturas e umidades são valores práticos e seguros para boas câmaras de armazenamento. Convém salientar, no entanto, que estes valores não representam condições ideais de tempera-

tura e de umidade relativa para estas frutas e hortaliças. Esta dicotomia entre o prático e o ideal é explicável com simplicidade, apesar de parecer desconcertante, à primeira vista. ROBINSON et al. (1975) estudaram esta dicotomia para muitas frutas e hortaliças, e deixaram evidente que a dificuldade para ajustar rigorosamente a temperatura e a umidade relativa do ar em câmaras de armazenamento de frutas e hortaliças é a raiz do problema. Temperaturas rigorosamente ajustadas e umidades elevadas (> 95%) sem a ocorrência de condensação somente são conseguidas em pequenas câmaras de laboratório. Assim, na prática as temperaturas recomendadas são sempre maiores que as ideais e ao mesmo tempo estes valores tabelados de umidade relativa recomendada para frutas e hortaliças são sempre bem menores do que o ideal para cada fruta e hortaliça. Com esta estratégia, boas câmaras de armazenamento e transporte de hortaliças são utilizadas com mínimos riscos de perdas causadas por congelamento do produto ou por deterioração induzida por condensação de água na superfície dos produtos.

Para raízes, tubérculos e outros órgãos subterrâneos, especialmente se ainda dormentes, como cenoura, beterraba e batata presume-se que o ideal seria manter estes órgãos em atmosferas com umidade relativa próxima a de seu ecossistema no solo, isto é, sob umidade relativa de quase 99,7%, o que corresponderia a um potencial de água no solo da ordem de 100 kPa. Neste ambiente, evitar-se-ia a desidratação destes produtos. No manuseio pós-colheita, no entanto, níveis de umidade desta ordem, em geral, não podem ser mantidos, exceto mediante ajustes extremamente rigorosos da temperatura, assunto que vem sendo objeto de artigos e patentes sobre desenvolvimentos para embalagens, refrigeradores e câmaras frias especiais. Na prática, talvez a aproximação maior possível desta condição de umidade relativa elevada e estável é aquela obtida na exportação de batata-doce em caixa de papelão contendo de vermiculita entre as raízes. Transportadas nestas condições, as raízes recém desembaladas apresentam a surpreendente aparência de recém colhidas.

Para a maioria das folhosas, frutos e alguns bulbos como a cebola, a umidade relativa no ecossistema de cultivo não é adequada durante a pós-colheita. No caso das folhosas, isto ocorre porque após serem destacadas da planta, usualmente não recebem mais reposição de água, exceto em alguns sistemas de menor aplicação usados para a couve e a taioba,

nas quais o pecíolo é mantido imerso em água, como se usa para flores destacadas. Assim, nestes órgãos com elevada relação superfície/volume, a umidade relativa deve ser elevada e a ventilação restrita para se evitar que a perda de água comprometa o frescor. Destacados, frutos, como a berinjela, a laranja e a uva também murcham rapidamente em ambiente com elevado déficit de pressão de vapor (baixa umidade relativa e elevada temperatura) e ventilação intensa.

Casos particulares interessantes, por outro lado, são os das hortaliças que precisam ser armazenadas em ambientes mais secos como os bulbos de alho e de cebola, que possuem escamas ou folhas de proteção contra a perda de água, que devem ser mantidas secas. A conservação destes produtos, sem o ataque de fungos, é feita em caixas com aberturas de ventilação no interior de câmaras com umidade relativa entre 70 e 80%. Adicionalmente, antes do armazenamento, estes produtos requerem um tratamento denominado cura, isto é, uma secagem inicial das escamas de proteção. Apesar disto, mesmo para o alho e a cebola, deve-se evitar ambientes com excessivo poder evaporativo, visto que também nestes produtos a perda de água é causa de perda de peso e de amolecimento que prejudicam a qualidade e o valor do produto.

Assim, como regra geral, a maioria das frutas e hortaliças deve ser armazenada em ambiente com temperatura estável, umidade relativa elevada, não a ponto de facilitar condensação, e ventilação restrita ao mínimo necessário para o atendimento às necessidades de trocas de calor e componentes gasosos de relevância fisiológica, como o oxigênio para a respiração. Estas condições técnicas são convenientemente aproximadas no interior das embalagens mediante o uso de procedimentos simples. Por exemplo, na exportação, bananas pré-resfriadas são acondicionadas em um saco plástico acomodado em caixa de papelão, que dá o suporte mecânico e que também auxilia na estabilização da temperatura, de modo a evitar a condensação de água no interior da embalagem plástica. Isto além do espetacular efeito que o acúmulo de CO₂ no interior da embalagem plástica tem sobre o retardamento do amadurecimento neste fruto. Esta tecnologia, por conseguinte tem possibilitado a exportação da banana sem a ocorrência de manchas na casca ou o desenvolvimento de fungos nas pencas, o que ocorreria caso houvesse suficiente condensação de água sobre o produto.

Controle da condensação de água

A maioria dos filmes plásticos é hidrofóbico e por esta razão as moléculas de água condensadas ao redor de núcleos de condensação agregam-se na forma de gotículas quando o filme é resfriado em uma câmara fria. Estas gotículas, eventualmente, crescem, se deslocam e coalescem formando gotas maiores que escorrem e molham o produto embalado. Há também filmes plásticos especiais recobertos por moléculas hidrofílicas. Nestes filmes "molháveis", a água condensada se espalha formando uma lâmina fina, transparente e invisível. As embalagens plásticas deste tipo, são as denominadas embalagens "anti-fog". O uso de embalagens ou filmes "anti-fog" é importante porque melhora a visualização irrestrita do produto, sem o inconveniente do esbranquiçamento, que é produzido pela dispersão da luz através de numerosas gotículas aderidas. Adicionalmente, estes filmes "anti-fog" ajudam a reduzir problemas de molhamento do produto e deterioração causados pela condensação de água em balcões de refrigeração que, quase forçosamente, apresentam variações expressivas ($> 4^{\circ}\text{C}$) da temperatura ao longo do dia. A ação física do filme "anti-fog" é espalhar as moléculas de água, o que favorece os mecanismos de transporte da água, que assim retorna com mais facilidade para a atmosfera interna da embalagem e até mesmo para o interior dos tecidos do produto armazenado (transporte em fase líquida e gasosa).

Outra forma de diminuir o problema da condensação no interior de embalagens é com o "seal-packaging" (BEN-YEHOSHUA, 1985). Neste caso um filme fino de polietileno de alta densidade (10 a 15 μm) é encolhido diretamente sobre órgãos, como frutos de laranja ou pimentão. Este filme finíssimo bloqueia o transporte de vapor de água e ao mesmo tempo não impede a permeação do oxigênio e do dióxido de carbono. Por "aderir" à superfície do produto, este filme plástico quase elimina a ocorrência visível de condensação de água ao mesmo tempo em que corta a valores diminutos a perda de peso e transpiração. Uma modificação desta técnica é o denominado plastivácuo, no qual filmes de polietileno de baixa densidade com cerca de 50 μm são mantidos em contato direto com o produto causando efeitos semelhantes aos descritos para o "seal-packaging". No plastivácuo, no "seal-packaging" e em outras aplicações com envolvimento do produto com filmes finos de PVC, a redução do

volume de ar (volume morto) dentro da embalagem é a principal causa da reduzida condensação de água (CALBO et al., 1987).

Uma variante deste princípio de evitar a condensação é o acondicionamento de frutas e hortaliças, como a berinjela, em bandejas de poliestireno expandido (isopor) envoltas com um filme de PVC. O efeito do filme de PVC é do tipo descrito no parágrafo anterior. Quanto a bandeja, que dá sustentação mecânica, esta também é importante para reduzir a condensação de água mediante a atenuação nas oscilações térmicas que proporciona no interior da embalagem.

Um terceiro método para reduzir a condensação de água é mediante o uso de perfurações nas embalagens plásticas. Neste método a condensação é reduzida graças ao aumento da ventilação e a diminuição da umidade relativa do ar no interior da embalagem. O emprego de perfurações é indispensável em alguns sistemas, porém, deve-se ter em mente que esta redução da condensação é feita mediante uma perda de efetividade da embalagem como barreira para conter a perda de peso por transpiração.

O método ideal para evitar condensação na embalagem, no entanto, seria resfriar o produto até a temperatura definida, embalar e depois mantê-lo em temperatura perfeitamente estável. Por exemplo, quando produtos frágeis são acondicionados em pequenas embalagens plásticas e agrupados dentro de embalagens de papelão maiores, em geral, se consegue boa estabilidade térmica de armazenamento refrigerado, no interior da embalagem, e como resultado pouca condensação de água ocorre. Nos refrigeradores domésticos modernos, a solução envolve gavetas especiais que promovem a estabilidade térmica, de modo a possibilitar a manutenção de umidade relativa elevada, baixa transpiração, e praticamente a ausência de condensação de água.

Poder evaporativo do ar

Na prática de pós-colheita, manter registro da temperatura e da umidade é comum, o registro de velocidade do vento praticamente não é feito e o uso de expressões matemáticas para integrar estas três variáveis em estimativas de transpiração de frutas e hortaliças somente ocorre em estudos de modelamento. Adicionalmente, sabe-se que é quase impossível, com a

tecnologia atualmente disponível, manter registros de umidade relativa e de velocidade do vento no interior de embalagens.

A evaporatividade, ou poder evaporativo do ar, por outro lado pode ser medida com relativa facilidade empregando-se o atmômetro de pós-colheita (CALBO, 2001; 2007). A evaporatividade, por outro lado, pode ser utilizada como uma variável de proporcionalização para explicar a perda de peso. Em ecofisiologia, Crundwell (1986) fez uso de proporcionalizações tomando a evaporatividade como variável auxiliar para comparar a capacidade de perda de água por unidade de área de diferentes plantas de ambiente úmido (*hydrophytes*). Assim, tendo-se em vista a simplicidade de uso, imagina-se que medir a evaporatividade no interior de embalagens e em outros ambientes de pós-colheita venha a se tornar uma ferramenta comum em futuro próximo, visto que é uma forma de superar as limitações associadas com as enormes dificuldades envolvidas nas medições de umidade e de velocidade do vento nestes ambientes.

A evaporatividade, ou a capacidade evaporativa do ar, das atmosferas determina o sucesso das práticas de pós-colheita, visto que a transpiração de um produto armazenado é proporcional à evaporatividade. Em pós-colheita, a evaporatividade é determinada com atmômetro (Fig. 2), que é um tipo de evaporômetro, que integra as condições micro-meteorológicas do ambiente de armazenamento. A medida da evaporatividade pode ser feita de maneira simples, por exemplo, através do registro da perda de peso do atmômetro em um intervalo de tempo (CALBO et al., 2007). Esta medida simples que integra os efeitos de temperatura, altitude, ventilação e umidade somente poderia ser substituída por estimativas teóricas, por exemplo, mediante o modelo de balanço de energia contido na componente aerodinâmica da equação de Penman (MAROUELLI et al., 1996; PEREIRA et al., 2002), uma equação que tem sido utilizada como ferramenta auxiliar em certos métodos de manejo de irrigação, fundamentados em medições de variáveis micrometeorológicas.

Interações embalagem/produto/ambiente

A forma como o produto, embalagem e atmosfera trocam vapor de água, calor e gases é o que modula o comportamento fisiológico das frutas e hortaliças. Como simplificação, o ambiente de pós-colheita na embala-

gem (Fig. 3) pode ser tratado restritivamente mediante o monitoramento das variáveis micrometeorológicas, isto é: temperatura, umidade relativa, pressão de vapor, pressão barométrica e velocidade do vento.

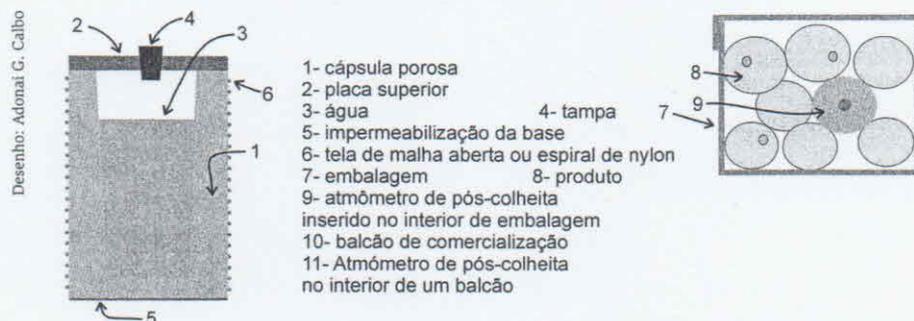


Figura 2- Esquema de um atmômetro para medir a capacidade evaporativa do ar (evaporatividade) preparado com vela de filtro, que funciona como uma superfície de água, deste instrumento que é um tipo de evaporímetro. Uma tela plástica é utilizada para evitar o contato direto entre o atmômetro e o produto embalado. Para medir a evaporatividade de outros ambientes em carrocerias e câmaras frias o atmômetro é acomodado sobre embalagens, por exemplo.

Como considerado inicialmente, manter a hidratação de hortaliças com elevados teores de água é fundamental para preservar a firmeza, frescor e valor comercial destes produtos, cuja hidratação deve ser mantida sempre acima de certos valores limiares. Assim, para manter o frescor e outras qualidades, a embalagem principal, e eventuais

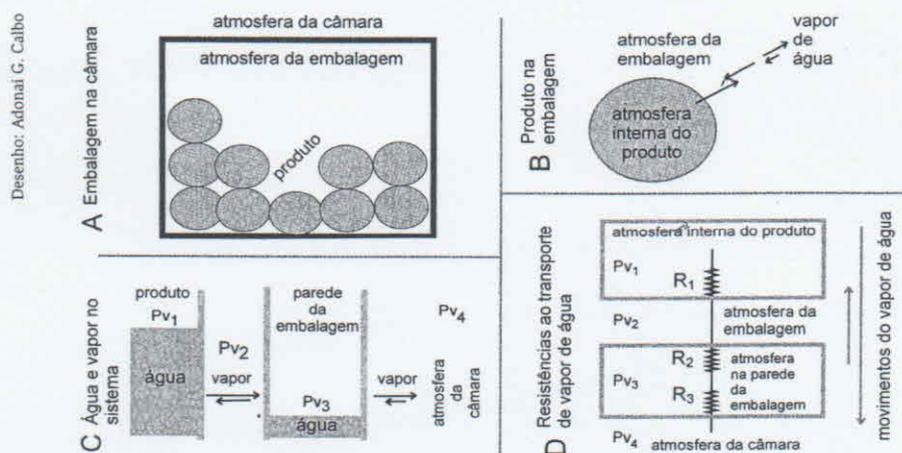


Figura 3- Modelo de trocas de vapor de água o sistema produto/embalagem/câmara de armazenamento. No sistema as pressões de vapor na atmosfera interna do produto (Pv_1), no interior das paredes da embalagem (Pv_2) e na atmosfera da câmara (Pv_4) são variáveis controladas, ou ao menos moduladas, pelo ajuste e a estabilidade da temperatura. No modelo o transporte de água entre os componente é abordado mediante a noção de resistências ao transporte do vapor de água. As resistências modeladas são: da casca do produto (R_1) e das faces interna (R_2) e externa (R_3) da embalagem. O modelo relaciona a hidratação, isto é, o frescor, dos produtos hortícolas em um sistema no qual o teor de água que impregna embalagens, como papelão ou madeira, não deve aumentar a ponto de prejudicar capacidade da embalagem suportar peso, ou de converter a embalagem em um ambiente para desenvolvimento de fitopatógenos.

componentes adicionais como almofadas, toalhas de papel e outros elementos, precisam proteger o produto, inclusive contra a perda de água.

O conteúdo de água das embalagens preferencialmente deveria ser nulo, porém, em geral, não é. Este teor de água, variável, modula as trocas de água entre a parede da embalagem com o produto e com a atmosfera. Adicionalmente, o aumento da quantidade de água na parede da embalagem causa redução da resistência mecânica de algumas embalagens, como as de papelão, que quando umedecidas colapsam sob ação de peso com muito mais facilidade.

Na Figura 1 também se ilustra que os movimentos de água, em geral, ocorrem dos produtos hortícolas em direção ao ambiente externo, de acordo com gradientes de pressão de vapor de água. A velocidade com que o produto hortícola perde água, por outro lado, é modulada pelas dimensões das embalagens e por algumas resistências como:

- a) a parede da embalagem é uma barreira que protege o produto hortícola da desidratação. Mesmo embalagens secas e hidrofílicas, que são um dreno de água, como as caixas de papelão ou os laminados de madeira, oferecem valiosa proteção contra a perda de água, além da proteção mecânica considerada em outros capítulos. Esta barreira ao transporte de vapor de água, no entanto, em geral, precisa ser atenuada pela inclusão de aberturas laterais nas caixas, tipicamente da ordem de 5%, para possibilitar aumento na troca de calor mediada pela maior circulação de ar entre a atmosfera da câmara.
- b) quanto maior a embalagem maior a distância média que as moléculas precisam percorrer e isto causa uma redução para perda de água em função do aumento das dimensões da embalagem. Um dos problemas associados a esta forma de reduzir transpiração é que seria necessário o uso de embalagens enormes. Na prática isto é limitado pela fragilidade de algumas frutas e hortaliças e por restrições de ergonomia.
- c) almofadas, divisórias, toalhas de papel e substratos de baixa densidade entre frutos e hortaliças têm sido utilizados para proteger produtos frágeis contra o colapso ou a ocorrência de injúrias de compressão e de rolamento (vibração). Estes acessórios de embalagem, adicionalmente, estabilizam a temperatura, reduzem

a ventilação e mantêm elevada a umidade, fatores que reduzem a transpiração.

Na figura 2 ilustra-se que o produto hortícola e a própria embalagem contém água. Inicialmente, a embalagem é robusta e contém apenas pequena quantidade de água; durante o armazenamento das frutas e hortaliças o teor de água no material das embalagens aumenta ao permanecer em um ambiente no qual a umidade relativa se mantém constantemente acima de 90%. Assim, sob umidade relativa elevada, após ter absorvido quantidade suficiente de água em suas paredes hidrofílicas, as embalagens tornam-se perigosamente frágeis ou biologicamente susceptíveis ao desenvolvimento de fungos (HENZ, 2005).

O transporte da água em fase líquida, nas interfaces produto/embalagem e embalagem/ambiente, não foi ilustrado na figura 2, no entanto, este tipo de transporte é relevante nos seguintes casos:

- a) em raízes transportadas em caixas de madeira e de papelão. Este transporte de água, no entanto, é substancialmente reduzido mediante a adequada secagem do produto, após a lavação;
- b) exposição a chuva;
- c) em produtos embalados com gelo no interior da caixa e produtos hidro-resfriados pela passagem de gelo líquido (mistura de água e gelo). Estas tecnologias de resfriamento e transporte utilizadas para produtos como o brócolos e a couve, usualmente é feita com embalagens plásticas e mais frequentemente com embalagens de papelão impregnadas com parafina. Como contraponto para esta tecnologia, deve-se lembrar que a caixa de papelão impregnada com parafina é de reciclagem difícil, fator que além de oneroso, também é causa freqüente de contaminação ambiental com este tipo de material de difícil degradação microbiológica.
- d) em câmaras com flutuações térmicas expressivas, ocorre condensação de água, principalmente nas paredes internas das embalagens armazenadas em câmara fria e nas paredes externas quando as embalagens são retiradas da câmara fria e deixadas em ambiente aberto. Nestas condições, é normal o transporte de água em fase líquida para o interior das paredes da embalagem, ou inversamente da superfície da embalagem para o produto acondicionado.

Estes problemas de condensação de água devem ser resolvidos com sistemas de refrigeração de boa estabilidade térmica e tomando-se o cuidado de não expor as embalagens ao ar ambiente (quente), durante as operações de carga e descarga.

Tipos de embalagens

As embalagens reutilizáveis de materiais como madeira e plástico podem ser robustas ainda que construídas com amplas aberturas de arejamento. Atualmente, a maioria das embalagens retornáveis é de plástico e a cada dia esta característica de ser facilmente higienizável é mais valorizada. As embalagens não retornáveis, em papelão ou de madeira laminada, por outro lado, são mais frágeis, e precisam ser fabricadas com menores aberturas de ventilação nas laterais, sendo que aberturas entre 2 a 5% são comuns.

Uma modalidade de embalagem descartável importante são as bandejas de isopor revestidas com filme de PVC. Esta embalagem pequena, componente ou secundária, tem sido utilizada para produtos muito sensíveis à desidratação e ao acúmulo de água condensada. Produtos mecanicamente muito frágeis como o figo, o tomate salada e caqui, diferentemente têm sido acomodados em outras pequenas embalagens componentes, mais resistentes, que protegem os frutos contra a compressão que ocorreria caso fossem acomodados diretamente em uma embalagem maior, primária. Estes tipos básicos de pequenas embalagens secundárias, de fato, dificultam o resfriamento, porém aumentam a estabilidade da temperatura e facilitam a manutenção de umidade relativa elevada, e diminuem a propensão para a ocorrência de condensação de água.

Na interação embalagem e condensação de água também merece atenção o uso de filmes anti-condensação, que são particularmente importantes para manter a boa aparência de embalagens que contenham produtos intactos ou segmentados em balcões refrigerados onde a temperatura varia muito no decorrer do dia. Os filmes "anti-fog" facilitam o espalhamento das moléculas de água sobre a sua superfície, e deste modo facilitam a evaporação da água que retorna à atmosfera interna da embalagem e também aumenta a superfície de contato com o produto, que assim pode reabsorver parte da água perdida na transpiração. É impor-

tante perceber que os filmes “anti-fog” ou anti-condensação, de fato, não evitam a condensação, o que eles fazem mesmo é facilitar o espalhamento e o transporte das moléculas de água.

Variáveis e instrumentos para estudar a perda de água nas embalagens

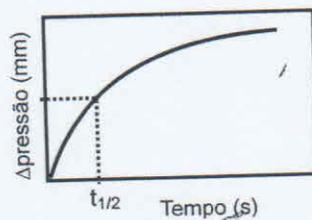
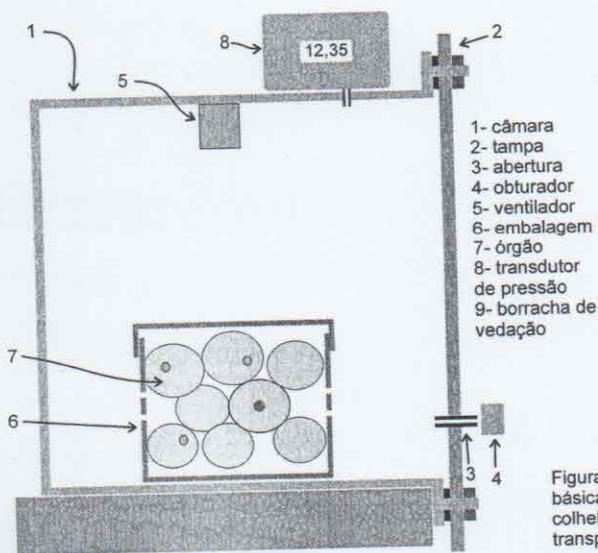
A temperatura controla a pressão de vapor da água (tabela 1), que é uma variável fundamental para determinar as taxas de evaporação e de condensação da água. Para medir a temperatura há uma variedade de instrumentos práticos e confiáveis, que cada vez mais vem sendo utilizados para monitorar os produtos embalados. Com esta necessidade de monitoramento para a segurança alimentar, o uso de medidas de temperatura deverá aumentar muito, principalmente agora que as tecnologias radio frequência (RFID) a baixo custo tem tornado a coleta e a certificação dos dados muito mais fácil e confiável.

Como visto, excluindo-se a temperatura, as outras variáveis que controlam as taxas de evaporação e de condensação da água são a velocidade do vento, o déficit de pressão de vapor e a pressão barométrica. A pressão barométrica em geral não varia rapidamente com a altitude e é dado facilmente obtido, razão pela qual é uma variável que não será detalhada neste momento. Para medir as outras duas variáveis, instrumentos como psicrômetro aspirado de bulbo úmido, para medir a umidade relativa/déficit de pressão de vapor do ar, e anemômetro de dissipação de calor para medir a ventilação, têm sido ferramentas úteis no interior de câmaras frias. Para estudos no interior de embalagens, no entanto, até os dias de hoje, ainda não há instrumentos que possibilitem estimativas rápidas e confiáveis. Esta dificuldade é desconcertante, tendo-se em vista que conceitualmente o espaço gasoso no interior das embalagens é um nicho com grandes diferenças locais de umidade e de ventilação.

A medição da velocidade do vento, em tese, possibilita estimar a camada de ar estagnada (δ) sobre o produto, enquanto que com a temperatura média e a umidade relativa média, e a temperatura do produto pode-se estimar o déficit de pressão de vapor entre o produto e a atmosfera. Infelizmente, como explicado, medições de temperatura e principalmente de umidade relativa tem sido práticas apenas nas câmaras frias, de modo que

não possibilitam a quantificação da transpiração do produto, ainda que se tenha a condutividade a vapor de água dos produtos medida com métodos de fisiologia vegetal.

Outra variável prática que poderia ser utilizada para estimar a transpiração de produtos embalados seria o poder evaporativo ou evaporatividade. As medidas de evaporatividade por enquanto têm sido relevantes apenas em estudos de ecofisiologia e para aplicações de manejo de irrigação. As medidas de evaporatividade podem ser feitas com instrumentos como o atmômetro de pós-colheita; um evaporômetro pode ser colocado junto ao produto no interior da embalagem. Um atmômetro de pós-colheita simples feito com uma vela de filtro porosa cheia de água com diâmetro de 58 mm e comprimento de 90 mm é cheio de água pesado e colocado no ambiente de armazenamento (Figura 4). Uma malha de tecido que não conduz água, evita que haja a troca de água entre o produto e o atmômetro em fase líquida. Periodicamente o atmômetro é pesado e a perda de água por unidade de tempo é uma medida da evaporatividade da atmosfera na embalagem. A evaporatividade, ou poder evaporativo do ar, por outro lado é proporcional à perda de água do produto armazenado.



$$C_D = 0,693 V / (R T t_{1/2})$$

Onde C_D é a condutância ao vapor de água, V é o volume de ar na câmara, R é a constante dos gases, T é a temperatura em graus Kelvin e $t_{1/2}$ é o tempo para atingir metade da diferença de pressão de saturação no ensaio.

Figura 4- Esquema dos componentes e operações básicas para uso de um de um porômetro de pós-colheita para medir condutância ao vapor de água/transpiração de órgãos embalados.

Desenho: Adonai C. Calbo

Adaptação do porômetro de pós-colheita para estudar a perda de peso de produtos embalados

As condições que possibilitam ao porômetro de pós-colheita estimar os parâmetros determinantes da perda de peso de produtos embalados são:

- a) As dimensões do porômetro de pós-colheita são ajustáveis para acomodar produtos hortícolas individuais ou embalagens inteiras.
- b) Um porômetro de pós-colheita pequeno, operado sem o funcionamento do ventilador simula, a condutividade do vapor de água do produto no interior de embalagem não submetida à ventilação forçada.
- c) De acordo com as duas primeiras premissas o déficit de pressão de vapor médio no interior da embalagem é dado por:

$$dpv_{\text{produto}} = dpv_{\text{embalagem}} g_{dvp_produto} / g_{dvp_embalagem} \quad \text{eq. 3}$$

onde dpv_{produto} é o déficit de pressão de vapor médio estimado no interior da embalagem quando o déficit de pressão de vapor entre o interior da embalagem é: $dpv_{\text{embalagem}}$. O parâmetro $g_{dvp_produto}$ é a condutividade ao vapor de água (por quilo) medida para o produto hortícola individualmente no porômetro de pós-colheita pequeno e $g_{dvp_embalagem}$ é condutividade ao vapor de água (por quilo) medida com embalagem inteira.

Este método possibilita que o déficit de pressão de vapor médio no interior de embalagens (dpv_{produto}) seja estimado, quando não se faz uso de fluxo forçado de ar através da embalagem. Conseqüentemente, a umidade relativa no interior das embalagens ($UR_{\text{embalagem}}$) também pode ser estimada neste sistema, com a eq. 4:.

$$UR_{\text{embalagem}} = 100 (P_{vs} - dpv_{\text{produto}}) / P_{vs} \quad \text{eq. 4}$$

onde P_{vs} é a pressão de vapor de saturação da água na temperatura da medição. A estimativa feita com a equação 4 é valiosa porque não é possível medir umidade relativa tão próxima à saturação (100% de UR) com higrômetros comuns.

Detalhamento do uso do porômetro de pós-colheita

A taxa de transpiração de um órgão, individualmente, ou de vários órgãos acondicionados em uma embalagem pode ser representada por:

$$Tr = dpv C_{dpv} \quad \text{eq. 5}$$

onde C_{dpv} é a condutância do órgão/embalagem, Tr é a taxa de transpiração e dpv é o déficit de pressão de vapor do órgão na embalagem com relação à pressão de vapor da câmara de armazenamento. Do ponto de vista instrumental, a variação do déficit de pressão de vapor (dpv) em ambiente isotérmico de uma câmara que é hermeticamente fechada no tempo zero pode ser feita como medida de variação da pressão, com auxílio de um manômetro diferencial ou de um transdutor de pressão eletrônico. Da curva que se observa entre dpv e o tempo a condutância C_{dpv} é calculada (Figura 2).

Para comparações com dados de literatura os resultados de condutância podem ser apresentados como condutividade do vapor de água por quilo de produto (g_{mdpv}) ou por unidade de área (g_{adpv}) usando-se as expressões:

$$g_{mdpv} = C_{dpv} / M \quad \text{eq. 6}$$

$$g_{adpv} = C_{dpv} / A \quad \text{eq. 7}$$

Os resultados assim proporcionalizados pela massa (eq. 6) ou pela área da superfície do produto (eq. 7), possibilitam resultados análogos como àqueles sumariados por BURTON (1982), que apresenta a perda de água por unidade de massa e de déficit de pressão de vapor para diferentes frutas e hortaliças.

A condutividade ao vapor de água também pode ser expressa por unidade de déficit de concentração de vapor de água com relação à atmosfera (dcv) (eq.8):

$$Tr = dcv C_{dcv} \quad \text{eq. 8}$$

onde as condutividades C_{dpv} e C_{dcv} podem ser interconvertidas com a expressão:

$$C_{dcv} = C_{dvp} R T \quad \text{eq. 9}$$

na qual R é a constante dos gases e T a temperatura em graus Kelvin.

Uma terceira forma de apresentação é a condutividade ao vapor de água por unidade de déficit de fração molar de vapor entre o produto e a atmosfera (dX_v), com a expressão:

$$Tr = dX_v C_{dXv} \quad \text{eq. 10}$$

neste caso a conversão entre C_{dvp} e C_{dXv} é feita também de maneira simples pela expressão:

$$C_{dXv} = C_{dvp} P_b \quad \text{eq. 11}$$

onde P_b é a pressão barométrica local. Condutividade em função do déficit de fração molar de vapor de água caracteriza-se por ser independente da pressão barométrica local e por ser uma variável ligeiramente menos influenciada pela temperatura do ambiente (NOBEL, 1991).

As condutividades ao vapor de água, equações 10 e 11, também podem ser convertidas para condutividade ao vapor de água por quilo, considerando-se déficit de concentração de vapor (g_{mdcv}) e considerando-se o déficit de fração molar de vapor (g_{mdXv}).

Nas equações anteriores, a condutividade ao vapor de água foi apresentada por quilo ao invés de por unidade de área (m^2), o que seria fisicamente mais consistente. A aproximação, no entanto, foi utilizada considerando-se que para produtos hortícolas classificados há uma proporcionalidade entre o peso e a área total da superfície de evaporação.

A condutividade por unidade de concentração de vapor e por unidade de área do produto (g_{adcv}) (eq. 7) são ainda populares entre os ecofisiologistas e facilitam o cálculo da espessura da camada de ar estagnada (d) (CALBO, 2005) conforme a equação 12.

$$\delta = D / g_{adcv} \quad \text{eq. 12}$$

Onde D é o coeficiente de difusão do vapor de água em ar ($2,5 \cdot 10^{-5} m^2 s$, a $20^\circ C$) e δ é a espessura da camada laminar expressa em metros e g_{adcv} é a condutividade ao vapor de água por unidade de área (m^2) e por unidade de déficit de fração molar de vapor de água, que é adimensional.

Em resumo, o porômetro de pós-colheita possibilita que métodos utilizados para ecofisiologia vegetal de folhas também sejam utilizados em outros órgãos importantes em pós-colheita. Os métodos de apresentação de resultados de transpiração aqui descritos são valiosos porque possibilitam comparações de resultados, não somente dentro, mas também entre experimentos, por exemplo, que envolvam estudos de aplicações de ceras ou comparações de genótipos.

Limitações do porômetro de pós-colheita para estudo de embalagens

No uso comum do porômetro de pós-colheita descrito por CALBO (2001), como para outros tipos de porômetro (CALBO, 2005), presume-se que a pressão de vapor na temperatura do produto seja a própria pressão de vapor de saturação da água na mesma temperatura (Tabela 1). Ao se utilizar o porômetro de pós-colheita para estudar uma embalagem, um problema é que a pressão de vapor da câmara não é a pressão de vapor na atmosfera da embalagem (Fig. 2).

Para simplificação da ilustração da figura 2C, imagina-se que a parede da embalagem é uma barreira ou resistência única e de espessura desprezível. Nesta aproximação, portanto, restam duas barreiras, sendo uma do produto que define a condutividade ao vapor de água do produto, a resistência da casca, e uma segunda resistência que é a resistência da embalagem. Desta simplificação, restam três pressões de vapor: Pv_1 que é a pressão de vapor na atmosfera interna do produto hortícola; Pv_2 que é a pressão de vapor de água na atmosfera da embalagem e Pv_3 que é a pressão de vapor na atmosfera da câmara.

Destas considerações segue-se que

$$Tr = C_{dvp_produto} (Pv_1 - Pv_2) = C_{dvp_embalagem} (Pv_2 - Pv_3) \quad \text{eq. 13}$$

e por consequência tem-se que

$$\frac{C_{dvp_embalagem}}{C_{dvp_produto}} = \frac{(Pv_1 - Pv_2)}{(Pv_2 - Pv_3)} = \frac{(100 - UR_{embalagem})}{(UR_{embalagem} - UR_{câmara})} \quad \text{eq. 14}$$

Raiz com aparência de recém colhida

O consumidor aprecia raízes com aparência de recém colhida. Em tese, para se conseguir isto bastaria manter os tecidos dermais saudios e bem hidratados. Na prática, no entanto, este frescor raramente é observado, porque a evaporatividade nos ambientes de armazenamento é, em geral, elevada, o que faz com as camadas superficiais de órgãos, sem cutícula cerosa, aparentem relativa desidratação. Esta falta aparente de "frescor", porém, não é um problema de qualidade grave, visto que as qualidades organolépticas e nutritivas estarão presentes nas raízes, desde que estas continuem firmes e bem conservadas.

Caso a manutenção da aparência de recém colhido seja considerada indispensável, então, neste caso, isto pode ser obtido simulando-se na pós-colheita o ambiente das raízes no solo. Na exportação de raízes tuberosas de batata-doce, por exemplo, o volume vazio entre raízes pode ser preenchido com vermiculita ou outro substrato de baixa densidade que estabelece uma elevada umidade relativa, similar à que se tem no solo, o que propicia uma armazenagem que mantém nas raízes o referido frescor. Efeito similar é obtido embrulhando-se as raízes em toalhas de papel. O problema desta tecnologia é ser trabalhosa, causar um passivo ambiental, e apresentar rejeitos de papel. No caso do uso de substrato de baixa densidade, o passivo ambiental é o substrato rejeitado. Como contraponto, pensa-se que outras embalagens como sacos plásticos e bandejas, por exemplo, também causam enormes quantidades de rejeitos como passivo.

A outra forma é manter a umidade elevada sem causar acúmulo de água livre sobre a superfície do produto seria, por exemplo, armazenar em umidade relativa entre 99 e 99,3% sob controle rigoroso de temperatura. Este controle de temperatura, no entanto, é impraticável mesmo nas melhores câmaras de armazenamento tradicionais, visto que para se conseguir uma umidade relativa estável ao redor de 99%, sem condensação de água, a temperatura precisaria ser controlada com intervalo de $\pm 0,2$ °C, ou melhor. Atualmente, esta estabilidade térmica de armazenamento é possível mediante a tecnologia denominada hidroconservação (LASSO et al., 2003). Neste sistema, o produto em geral, é armazenado em embalagens plásticas, as quais são continuamente aspergidas com solução aquosa de temperatura rigorosamente controlada.

A tentativa de dar aparência de recém colhido à batata-baroa (mandioquinha-salsa) com tecnologia inadequada, tem causado grandes perdas por deterioração em alguns mercados brasileiros. Segundo Henz (2005), a inadequação decorre do fato destas raízes serem acondicionadas molhadas no interior de caixas de madeira novas, também molhadas para se tornarem mais flexíveis. Este ambiente de armazenamento associado às elevadas temperaturas prevalentes no transporte são, evidentemente, um cenário no qual a deterioração desta raiz ocorre com rapidez. Ainda segundo este autor (comunicação pessoal), seria preferível secar bem a superfície das raízes e transporta-las em caixas também secas, mesmo que esta secagem do produto cause certo escurecimento superficial e perda visual de frescor. Alternativamente, outras tecnologias anteriormente descritas, como a embalagem a vácuo, juntamente com refrigeração vem sendo utilizadas para mandioquinha-salsa com melhores resultados econômicos e reduzidas perdas.

Transpiração proporcionalizada

As seguintes condições presumidas são necessárias para se obter medidas úteis de transpiração proporcionalizada (TP), de acordo com a evaporatividade da atmosfera:

- a) a evaporatividade da atmosfera é uma variável que integra temperatura, pressão barométrica, pressão de vapor e de velocidade do vento no microclima de pós-colheita;
- b) a evaporatividade pode ser utilizada com variável comparativa de ambientes de armazenamento, de embalagens ou de produtos, como diferentes cultivares;
- c) a evaporatividade de uma atmosfera pode ser estimada como a perda de água através do atmômetro, *e.g.* atmômetro de pós-colheita, em gramas por dia, ou gramas por dia e por centímetro quadrado da superfície evaporante do atmômetro;
- d) nas aplicações em órgãos como frutas e hortaliças cuja área superficial é de estimativa difícil, a transpiração pode ser proporcionalizada por unidade de massa (TP_M) ao invés da tradicional proporcionalização por unidade de área superficial do produto (TP_A).

A apresentação da transpiração proporcionalizada por unidade de área evaporante (TP_A) é similar àquela de Crundwell (1986), cuja elegância decorre de ser adimensional visto que é obtida dividindo-se a taxa de transpiração por unidade de área superficial do produto pela taxa de evaporação de água por unidade de área evaporativa da superfície do atmômetro. Para frutas e hortaliças com elevada resistência dermal à difusão, os valores de TP_A são menores que 1,0, enquanto que para hortaliças e frutas mais susceptíveis à perda de água os valores de TP_A são próximos e até mesmo maiores do que 1,0.

Para calcular TP_A , a transpiração é medida em $g\ cm^{-2}\ dia^{-1}$ por pesagem e a evaporatividade, na mesma unidade, é medida com atmômetro. Caso a evaporatividade do atmômetro tenha sido lida em $g\ dia^{-1}$ então esta deve ser convertida para $g\ cm^{-2}\ dia^{-1}$, o que é feito dividindo-se esta leitura pela área evaporante do atmômetro de pós-colheita para a seguir calcular TP_A .

TP_A é uma variável elegante, no entanto, sua computação é em geral complicada pela dificuldade em se estimar a área superficial das frutas e hortaliças, cujos volumes têm superfícies irregulares. Assim, a transpiração proporcionalizada por unidade de massa (TP_M) é uma forma mais simples, ainda que menos elegante. Para se obter TP_M em kg^{-1} divide-se a taxa de transpiração do produto ($g\ kg^{-1}\ dia^{-1}$) pela leitura do atmômetro de pós-colheita em $g\ dia^{-1}$.

Para conversões aproximadas de valores de TP_M em valores de TP_A pode-se utilizar a seguinte relação:

$$TP_A = TP_M A_M/A_A \quad \text{eq. 14}$$

Onde A_M é a área superficial por quilograma do órgão e A_A a área da superfície evaporante do atmômetro.

Limitações da transpiração proporcionalizada (TP_A e TP_M)

- 1) Ainda não há tabelas de TP_M ou de TP_A para aplicações na estimativa da perda de água de produtos em pós-colheita de acordo com leituras do índice de evaporatividade lida com atmômetro de pós-colheita (E_i).
- 2) A transpiração proporcionalizada de acordo com o poder evaporativo do ar, ou evaporatividade, é um método prático e desprovido

do formalismo técnico que possui as medidas de condutividade ao vapor de água. Porém, a proporcionalização vem sendo utilizada em ecofisiologia e em manejo de irrigação porque é uma forma efetiva e simples de integrar as variáveis físicas que governam a transpiração e a evapotranspiração. Assim, também para estudos de armazenamento e de embalagens, este método é uma ferramenta experimental valiosa.

Normalização entre atmômetros de pós-colheita

Em manejo de irrigação, a estimativa da evapotranspiração a partir de medidas de consumo de água em evaporômetros tem sido feita com dois coeficientes, um para o sensor (*e.g.* K_p) e outro de cultura (K_c). A necessidade de um coeficiente especial para a cultura (K_c) no manejo de irrigação decorre de fato das dimensões, da arquitetura e da sensibilidade das plantas ao déficit hídrico variarem durante o ciclo da cultura, razão pela qual, valores de K_c diferenciados para cada espécie e estágio de desenvolvimento serem utilizados (DOORENBOS e PRUIT, 1977; MAROUELLI et al., 1996).

Este mesmo formalismo bem sucedido em manejo de irrigação pode ser empregado em pós-colheita (CALBO et al., 2007). Assim, no formalismo adaptado para pós-colheita TP_M é o coeficiente do produto e α_s é um coeficiente do atmômetro (sensor). Consequentemente, a estimativa da transpiração (Tr) do produto no armazenamento estimado de acordo com o consumo de água no atmômetro de pós-colheita é dada pela eq. 18.

$$Tr = TP_M \alpha_s M e_A \quad \text{eq. 18}$$

Onde Tr é a transpiração do produto armazenado em gramas por dia, M é a massa do produto armazenado em kg, TP_M é o coeficiente de transpiração do produto (kg^{-1}), α_s é o coeficiente do atmômetro (adimensional) e e_A é a taxa de evaporação de água medida no atmômetro (g dia^{-1}), obtido como a diferença entre a massa inicial e final do atmômetro, dividida pelo tempo de evaporação.

O coeficiente do atmômetro (α_s), por outro lado, é definido arbitrariamente como 1,0 para um atmômetro de pós-colheita (Fig. 4) com elemento

poroso de diâmetro de 55 mm e altura de 90 mm, do qual a água evapora sem restrições. No atmômetro de pós-colheita, a água evaporada é substituída por ar que entra e borbulha no interior da cápsula porosa, o que assegura que a tensão da água seja sempre igual ou menor que 25 kPa, que é a pressão de borbulhamento deste elemento poroso. Deste modo, assumir que o atmômetro de pós-colheita possui uma superfície externa de 213 cm² onde a água evapora livremente é uma aproximação quase perfeita, enquanto houver água livre no interior da cavidade da cápsula porosa fechada.

Para ser colocado dentro de embalagens, o atmômetro de pós-colheita recebe uma espiral de fio de nylon de 0,2 mm de passo igual a 2 mm. Alternativamente o atmômetro é envolto por uma tela plástica de malha grossa, como descrito inicialmente. Isto impede que produtos como raízes de cenoura, por exemplo, possam absorver água diretamente do elemento poroso. No caso dos outros atmômetros com dimensões diferentes da especificada deve-se ter o cuidado de obter o coeficiente do sensor (α_c) experimentalmente, fazendo-se a relação contra a evaporação de um atmômetro de pós-colheita de referência. Cápsulas porosas para estes atmômetros podem ser feitas empregando-se velas de filtro comuns do tipo Stéfani ou São João, que possuem as dimensões aqui especificadas.

Ainda sem perder de vista a analogia com o manejo de irrigação, o coeficiente do produto (α_c) pode assumir valores diferentes de acordo com a condição fisiológica da fruta ou hortaliça. Assim, os valores de TP_M para raízes e bulbos, seriam maiores imediatamente após a colheita, mínimo para produtos curados e mantidos em atmosfera recomendada de armazenamento e novamente maiores quando houvesse brotação, no caso de bulbos de cebola e tubérculos de batata, por exemplo. Frutos como o tomate a maçã e o caqui, por outro lado, teriam valores de coeficiente de transpiração TP_M muito estáveis durante todo o armazenamento.

Tabela 1
Pressão de vapor de saturação da água em milímetros
de coluna de água em função da temperatura

Temperatura	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0	62,56	63,02	63,48	63,94	64,40	64,87	65,34	65,81	66,29	66,77
1	67,25	67,74	68,22	68,72	69,21	69,71	70,21	70,71	71,22	71,73
2	72,25	72,76	73,28	73,81	74,34	74,87	75,40	75,94	76,48	77,02
3	77,57	78,12	78,67	79,23	79,79	80,36	80,93	81,50	82,07	82,65
4	83,24	83,82	84,41	85,01	85,60	86,20	86,81	87,42	88,03	88,64
5	89,27	89,89	90,52	91,15	91,78	92,42	93,07	93,71	94,36	95,02
6	95,68	96,34	97,01	97,68	98,35	99,03	99,72	100,41	101,10	101,79
7	102,49	103,20	103,91	104,62	105,34	106,06	106,79	107,52	108,25	108,99
8	109,74	110,48	111,24	111,99	112,76	113,52	114,29	115,07	115,85	116,64
9	117,43	118,22	119,02	119,82	120,63	121,45	122,26	123,09	123,91	124,75
10	125,59	126,43	127,28	128,13	128,99	129,85	130,72	131,59	132,47	133,35
11	134,24	135,14	136,04	136,94	137,85	138,76	139,69	140,61	141,54	142,49
12	143,42	144,37	145,32	146,28	147,24	148,21	149,19	150,17	151,16	152,15
13	153,15	154,15	155,16	156,18	157,20	158,22	159,26	160,30	161,34	162,39
14	163,45	164,51	165,58	166,65	167,74	168,83	169,92	171,02	172,12	173,24
15	174,35	175,49	176,61	177,75	178,79	180,04	181,20	182,36	183,53	184,71
16	185,89	187,08	188,28	189,48	190,69	191,91	193,13	194,37	195,60	196,85
17	198,10	199,36	200,62	201,89	203,17	204,46	205,75	207,06	208,36	209,68
18	211,00	212,33	213,67	215,01	216,36	217,72	219,09	220,47	221,84	223,24
19	224,63	226,04	227,45	228,87	230,30	231,74	233,18	234,63	236,09	237,56
20	239,03	240,52	242,01	243,51	245,01	246,53	248,06	249,59	251,12	252,68
21	254,23	255,80	257,37	258,96	260,55	262,15	263,76	265,37	267,00	268,63
22	270,27	271,93	273,59	275,26	276,93	278,62	280,32	282,02	283,74	285,46
23	287,19	288,93	290,69	292,44	294,21	295,99	297,78	299,58	301,39	303,20
24	305,03	306,86	308,71	310,56	312,43	314,30	316,19	318,08	320,00	321,90
25	323,83	325,76	327,70	329,66	331,62	333,60	335,58	337,58	339,58	341,60
26	343,62	345,66	347,71	349,77	351,83	353,91	356,00	358,10	360,22	362,64
27	364,47	366,62	368,77	370,94	373,11	375,30	377,50	379,71	381,93	384,17
28	386,41	388,67	390,94	393,21	395,50	397,81	400,12	402,45	404,78	407,13
29	409,49	411,87	414,25	416,65	419,06	421,48	423,91	426,36	428,81	431,28
30	433,78	436,26	438,77	441,21	443,82	446,37	448,92	451,49	454,08	456,67
31	459,28	461,90	464,54	463,70	469,85	472,52	475,21	477,91	480,62	483,35
32	486,09	488,84	491,61	494,39	497,19	500,00	502,82	505,66	508,50	511,37
33	514,25	517,14	520,05	522,97	525,90	528,85	531,81	534,79	537,78	540,79
34	543,81	546,85	549,90	552,96	556,04	559,14	562,25	565,37	568,51	571,67
35	574,84	578,02	581,22	584,44	587,67	590,92	594,18	597,46	600,75	604,06
36	607,39	610,73	614,09	617,46	620,85	624,25	627,67	631,11	634,57	638,04
37	641,52	645,02	648,55	652,08	655,63	659,20	662,79	666,39	670,01	673,65
38	677,31	680,98	684,67	688,37	692,09	695,83	699,59	703,37	707,16	710,97
39	714,80	718,65	722,51	726,39	730,29	734,21	738,15	742,10	746,08	750,07
40	754,08	758,11	762,15	766,22	770,30	774,41	778,53	782,67	786,83	791,01

* Tabela calculada conforme Calbo (2001)

** Multiplicar por 9,8066 para converter para Pascal e por 0,000097 para converter para atmosfera.

Referências

- BEN-YEHOSHUA, S. Individual seal-packing of fruit and vegetables in plastic film – A new postharvest technique. *HortScience*, v. 20, n.1, p. 32-33, 1985.
- BURTON, W. G. **Post-harvest physiology of food crops**. New York, Longman, 1982. 339 p.
- CALBO, A. G. **Sistema de armazenamento de produtos alimentícios**. PI BR 8702880, 1987.
- CALBO, A. G. **Porômetro de pós-colheita para observar transpiração e calcular resistência difusiva**. PI BR 0104475-3, 2001.
- CALBO, A. G. **Atmômetro de Pós-Colheita**. MU BR8003125-0, 2001.
- CALBO, A. G. **Postharvest porometer to study transpiration and to measure vapor pressure deficit**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005. 20 p. (Embrapa Hortaliças, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8)
- CALBO, A. G.; MORETTI, C. L.; HENZ, G. P. **Uso do porômetro em estudos de pós-colheita de frutas e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2007. 5 p. (Embrapa Hortaliças, Comunicado Técnico, 52)
- CRUNDWELL, M. E. A review of hydrophyte evapotranspiration. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, Paris, v. 19, n. 3, p. 215-232, 1986.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 1440 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).
- HENZ, G. P.; CARDOSO, F. B. Absorção de água e proliferação de fungos em madeira de *Pinus* usada como embalagem para hortaliças. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 23, n. 1, p. 138-142, 2005.
- HENZ, G. P.; REIFSCHNEIDER, F. J. B. Modernização das embalagens da mandioquinha-salsa e sua comercialização no atacado paulista. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 22, p. 815-820, 2004.
- KAYS, S. J. **Postharvest physiology of perishable plant products**. New York: Van noshard Reinhold, 1991.
- LEUSCHNER, C. Are high elevations in tropical mountains arid environments for plants? *Ecology*, Tempe, AZ, v. 81, n. 5, p. 1425-1436, 2000.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R. da; SILVA, W. L. C. Manejo da Irrigação em Hortaliças. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1996. 72 p.

NOBEL, P. S. Boundary layers on air adjacent to cylinders: estimation of effective thickness and measurement on plant material. **Plant Physiology**, Bethesda, MD, v. 54, p.177-181, 1974.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic Press, 1991. 635 p.

LASSO, P. R. O.; PESSOA, J. D. C.; CALBO, A. G.; CRUVINEL, P. E. Sistema de Controle de temperatura para câmara de armazenamento de alimentos frescos em meio líquido. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2003. 12 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária, Boletim de Pesquisa de Desenvolvimento, 4).

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

ROBINSON, J. E.; BROWNE, K. M.; BURTON, W. G. Storage characteristics of some vegetables and soft fruits. **Annals of Applied Biology**, Cambridge, v. 81, p. 399-408, 1975.

SANTELLI, P. **Fisiologia pós-colheita de frutos das palmeiras *Syagrus oleracea* (Mart) Becc. e *Mauritia vinifera* Mart.** 86 f. Tese (Mestrado) Departamento de Botânica, Universidade de Brasília, Brasília. 2005.