

## Redução da Evaporação de Açudes - O Estado da Arte

Alain Marie Bernard Passerat de Silans

DTCC/Centro de Tecnologia Universidade Federal da Paraíba  
58039-900 João Pessoa, PB - Tel. (83) 216-7684 - [alain@lrh.ct.ufpb.br](mailto:alain@lrh.ct.ufpb.br)

Recebido: 17/01 - revisão: 08/02 - aceito: 04/03

### RESUMO

Neste trabalho, procura-se descrever o estado da arte sobre alternativas para reduzir a evaporação de açudes na região semi-árida do Nordeste Brasileiro. Em introdução, mostra-se o quão importante seria a diminuição da evaporação de pequenos açudes. Diversas alternativas são analisadas: coberturas por filmes monomoleculares de álcoois gordurosos; quebra-ventos; corpos artificiais flutuantes e plantas aquáticas. Varias recomendações estão extraídas na conclusão, a mais importante sendo a necessidade de formar um grupo multidisciplinar para avaliar a oportunidade de se investir em pesquisas integradas na região sobre este tema.

**Palavras-chave:** redução da evaporação; filmes monomoleculares; plantas aquáticas; açudes.

### INTRODUÇÃO

Na região semi-árida do Nordeste Brasileiro, as precipitações concentram-se em poucos meses no ano. Tipicamente, o quadrimestre mais chuvoso concentra de 60 a 70% das precipitações anuais. A cada ano, longos períodos de estiagem ocorrem que duram vários meses consecutivos. A variabilidade dos totais precipitados quer sejam eles anuais, quadrimestrais ou mensais é também muito elevada. Souza (1999) em um estudo sobre desertificação considera essa grande variabilidade como um índice forte de vulnerabilidade dos ecossistemas da região. São conhecidos de todo mundo os efeitos perversos e as conseqüências dramáticas dos longos períodos de seca que castigam essa região. A construção de barragens e açudes para armazenar as águas precipitadas no período chuvoso e torná-las disponíveis na estiagem constitui o modo mais comum de luta contra os efeitos perversos das secas. Molle (1994) cita Ireneu Joffily para mostrar que a construção de açudes na região coincidiu com a colonização das terras do sertão e do interior do Nordeste:

*“Os açudes sempre foram meios empregados pelos sertanejos para neutralizar os efeitos das secas, desde os primeiros tempos da colonização. Com o seu bom senso prático, compreenderam que era esse o único meio de suprir a falta de rios perenes e de lagos ou lagoas permanentes e, aguilhoados pela imperiosa lei da necessidade, iniciaram as represas, trabalho que afinal tornou-se o primeiro e mais necessário em qualquer situação nascente”.*

Na tentativa de se efetuar um inventário dos açudes no Nordeste, Molle (op. Citado), baseando-se nos mapas da

Sudene na escala 1/100.000, obtidos de fotografias aéreas efetuadas entre 1962 e 1969, contabilizou 16.443 açudes no ano médio de 1965. Os estudos do PLIRHINE (1979), estimaram que os açudes de espelho de água inferior a 8.000 m<sup>2</sup> não aparecem nos mapas da SUDENE. O PLIRHINE (op. Citado) avaliou em 10.000 o número de aguadas dessa categoria e considerou que o número de açudes devia ter tido uma taxa de crescimento da ordem de 50% entre 1965 e 1979. Entre 1978 e 1983, os projetos SERTANEJO e PROHIDRO relatam respectivamente a construção de 3643 e 8261 açudes na região. Acredita-se que no início da década de 90, existe algo em torno de 70.000 açudes no Nordeste entre pequenos, médios e grandes.

Na bacia hidrográfica do rio do Peixe, na Paraíba, estudos da SCIENTEC (1996) para a SEPLAN-PB apontam que o volume armazenado nos pequenos e muito pequenos açudes é aproximadamente igual ao volume armazenado nos açudes Lagoa do arroz e Pilões, os dois maiores açudes da bacia com respectivamente 80,2 e 13 milhões de m<sup>3</sup> de capacidade. O espelho de água que representa o conjunto desses pequenos e muito pequenos açudes nessa bacia soma 1.396.492.308 m<sup>2</sup>, valor este 81 vezes maior do que a soma da área dos espelhos de água dos dois açudes Lagoa do Arroz e Pilões.

Nessa região, a taxa de evaporação é muito elevada, levando esses açudes, principalmente os pequenos a secar muito rapidamente. Estima-se que, dependendo das condições climáticas locais, da natureza da área circunvizinha ao açude e do tamanho da represa, a lâmina evaporada por ano situa-se no Nordeste Brasileiro entre 2.100 e 2.700 mm. Um açude pequeno, com 100.000 m<sup>3</sup> de água armazenados ao final da estação chuvosa, perde no primeiro mês subsequente a esta, em torno de

15.000 m<sup>3</sup>, e, a metade do volume armazenado é perdida em apenas 115 dias, se nenhuma utilização do açude é efetuada (Silans, 1996). O lago de Sobradinho perde por evaporação em torno de 250 m<sup>3</sup>/s (Dias e Kelman, 1987), o que corresponde a mais de três vezes a vazão prevista no projeto da transposição do rio São Francisco ou ao volume necessário para o abastecimento anual de uma população de 144 milhões de habitantes. Os pequenos açudes, proporcionalmente às suas capacidades de armazenamento, perdem muito mais água por evaporação do que os grandes açudes, devido à relação desfavorável entre volume armazenado e espelho de água. Além do mais, sofrem quando secam do chamado “efeito Oásis”. Moura e Silans (1993) estudaram o aumento da taxa de evaporação dos pequenos açudes à medida que secam, mostrando que esta pode aumentar em torno de 30%.

Tentar reduzir a evaporação destes açudes, pequenos médios e grandes, é então bastante atrativo. Diversos estudos neste sentido têm sido conduzidos no mundo inteiro, principalmente nas décadas de 1960 e 1970. No Brasil, alguns poucos estudos foram feitos principalmente nas décadas de 1970 e 1980. O objetivo deste artigo, devido à importância que o assunto pode revestir na região semi-árida do Nordeste do Brasil, é de apresentar um estado da arte das técnicas de redução de evaporação que foram estudadas.

No entanto, é importante salientar que atualmente, pelo menos ao conhecimento do autor, nenhuma tentativa de reduzir a evaporação de açudes esta sendo estudada ou implementada. Segundo Ben-Zvi (1998), em uma discussão com o autor deste artigo durante o congresso internacional “Hydrology in a Changing Environment” ocorrido em Exeter, U.K. em 1998, um estudo de redução da evaporação de um lago de porte médio em Israel, com aplicação de um filme monomolecular de hexadecanol, foi abandonado em 1995 por ser muito complexo e economicamente inviável. Porém Silans e Eid (1988), estudando a possibilidade de redução da evaporação de pequenos açudes com certas plantas aquáticas, apontaram o efeito de sinergia que reduções de evaporação mesmo com pequena taxa poderiam apresentar. Estes autores simularam o balanço hídrico do açude Jatobá, na bacia hidrográfica representativa de Sumé-PB, para avaliar a máxima área que um agricultor poderia irrigar, considerando dois cultivos sucessivos por ano, sendo um de feijão e outro de tomates, sem que no período de simulação haja diminuição do rendimento da cultura por falta de água no solo. Encontraram uma área máxima de 1,9 ha. Refazendo estas mesmas simulações, considerando hipotéticas reduções graduais de evaporação (entre 5% e 30%), obtiveram um aumento da área irrigável bastante considerável. No caso das reduções da evaporação de 5% e 30%, respectivamente, a área irrigável passou para os valores de 2,7 e 6,9 ha.

## MARCOS HISTÓRICOS

Na literatura especializada, diversas técnicas são citadas para diminuir a evaporação, tais como: quebra-ventos; corpos artificiais flutuantes à superfície; filmes monomoleculares de álcoois gordurosos; coberturas por plantas aquáticas e armazenamento subterrâneo. Os mecanismos de redução da evaporação diferem de uma técnica à outra. Certas provocam um aumento da tensão superficial na interface entre a água e a atmosfera, diminuindo os coeficientes de transferência do vapor de água entre a superfície e a atmosfera; outras reduzem a velocidade do vento ou ainda diminuem a energia disponível para a evaporação, refletindo parte da energia solar incidente.

Historicamente, tanto cronologicamente quanto em termo do volume dos estudos, as técnicas baseadas sobre o aumento da tensão superficial pela aplicação de um filme muito fino (geralmente de espessura monomolecular) à superfície têm prevalecido.

Roberts (sem data) indica ter sido Benjamin Franklin, em 1765, o primeiro a espalhar sobre superfície de um reservatório, uma camada de óleo de 100 moléculas de espessura. Na França, em 1914, Abbe, citado por Frenkiel (1965) relata o trabalho de Onofrio, com aplicações de óleo sobre alguns rios e reservatórios com a finalidade de diminuir a evaporação para diminuir os nevoeiros. Depois disto, Langmuir, citado por Roberts (op. Citado), obteve resultados conclusivos acerca de várias cadeias parafinicas de ácidos e álcoois, que, ao serem espalhados sobre a superfície da água, formaram um filme de espessura monomolecular cujo efeito poderia ser de diminuir a evaporação. Porém, os primeiros resultados neste sentido não foram encorajadores. Rideal (1925) observou pela primeira vez redução de evaporação devida à aplicação à superfície de um filme monomolecular, tendo usado para isto ácidos gordurosos. Langmuir (1917) mostrou que o álcool cetílico era mais eficiente no controle da evaporação do que os ácidos oleosos, palmíticos e estearílicos. Mais tarde, esses resultados foram confirmados por vários pesquisadores, que mostraram terem o hexadecanol (álcool cetílico, C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>OH), o octadecanol (álcool estearílico, C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>OH) ou ainda a mistura de ambos, apresentado maior eficiência em se diminuir a evaporação do que os demais produtos formando filmes monomoleculares à superfície da água.

Após um período onde nenhum trabalho notável foi publicado, por ocasião da seca de 1951, agências governamentais de alguns países deram continuidade aos trabalhos de Langmuir. Destaca-se a Austrália através do CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) e os Estados Unidos, principalmente através do Bureau of Reclamation, o Geological Survey e o Southwest Research Institute of Texas.

No período entre 1954 e 1967, todos os estudos foram voltados para analisar a eficiência e a resistência mecânica

nica de filmes monomoleculares de hexadecanol (principalmente), octadecanol ou uma mistura de ambos, em função da dosagem, do método de diluição ou pulverização, do método de aplicação e do tamanho da superfície do lago a ser coberta.

Na Austrália, o primeiro trabalho de campo de que se tem notícia (Mansfield, 1956) se deu em 1952, onde hexadecanol foi aplicado sob a forma de pequenas pelotas dispersas através de cestas que flutuavam à superfície de um pequeno lago. Uma redução da ordem de 25% foi observada. Mansfield (1955, 1956, 1963), relata reduções da ordem de 15% a 70% em pequenos reservatórios dependendo das condições climáticas e dosagem. Vines (1962) desenvolveu um método de aplicação do hexadecanol através da pulverização do produto a bordo de um barco percorrendo o lago perpendicularmente ao vento. Com isto conseguiu reduções da evaporação estimadas entre 20 e 52% no lago Umberumberka (741 ha) e maiores ainda no lago Corella.

Nos Estados Unidos, Timblin et al. (1957) relatam o primeiro experimento conduzido pelo Bureau of Reclamation no reservatório de Rattlesnake no Colorado, com 247 ha de superfície onde flocos de hexadecanol foram colocadas em balsas espalhadas no lago. No entanto não tiveram sucesso em cobrir de modo contínuo a superfície do lago. Outros testes foram efetuados nos lagos Hefner, Suhuaro e Cachuma. No lago Hefner, durante um experimento que durou 55 dias, apenas 16% da área do lago foi coberta, obtendo-se segundo relato de Roberts (op. Citado), uma redução de evaporação de 9%. O lago Suhuaro no Arizona com um espelho de água de 3110 ha, foi tratado com hexadecanol pulverizado lançado a partir de 8 balsas. O sistema funcionava quando a velocidade do vento situava-se numa faixa entre 6 e 24 km/h. Nestas condições, o lago era totalmente recoberto em aproximadamente duas horas. A redução de evaporação foi estimada a partir de um método baseado sobre balanço de energia e coeficiente de transferência de massa, em 14% em um período de outubro a novembro de 1960. Provavelmente a redução de evaporação teria sido maior no verão onde a evaporação é bem maior. No lago Cachuma (8300 ha), na Califórnia, usou-se método idêntico àquele usado no lago Suhuaro para pulverizar o hexadecanol obtendo-se um valor máximo de 22% de redução de evaporação..

Outros experimentos foram também conduzidos na mesma época na África, em Israel, no Japão, na Índia e na Rússia.

No Brasil, experimentos com filmes monomoleculares foram conduzidos apenas em pequenos tanques (Ferreira Filho, 1974; Silans e Eid, 1979 e Silans, 1981).

Em 1975, Cooley escreve que os filmes monomoleculares de álcoois gordurosos não têm, na prática, conduzidos aos resultados esperados. Este autor sugere que coberturas artificiais com alto poder de refletividade poderiam conduzir à redução substancial da evaporação a custos aces-

síveis. Na realidade, decepcionados com os resultados apresentados pelos filmes monomoleculares, vários trabalhos têm sido publicados entre 1970 e 1983, considerando o uso de corpos artificiais flutuantes à superfície com alto poder de refletividade da radiação solar incidente (Cluff, 1967; Cooley, 1970; Myers e Frasier, 1970; Cooley e Cluff, 1972; Cooley e Myers, 1973; Silans, 1981; Porto et al., 1986).

Diversos trabalhos têm sido apresentados sobre a evapotranspiração das plantas aquáticas. Muitos deles com a Baronesa (*Eichornea crassipes*), onde os valores, embora muito diferentes de um autor para o outro apontam para um significativo aumento da evapotranspiração quando comparado à evaporação da mesma superfície de água (Van der Weert e Kamerling, 1974; Guardiania e Saldaña, 1976; Benton et al., 1978). Estes resultados induziram a idéia falsa de que plantas aquáticas têm um efeito incremental sobre a evaporação de açudes. No entanto é interessante recordar que a primeira sugestão sobre redução da evaporação de açudes por plantas aquáticas à qual tivemos acesso na literatura é Brasileira e data de 1932. Naquela época, em uma comunicação à Academia Brasileira de Ciências, Rodolpho von Iherino sugeriu que se estudasse in loco o papel de certas plantas aquáticas para verificar se algumas delas, mais especificamente as *Nimphaeas*, poderiam ser utilizadas para reduzir a evaporação de açudes do Nordeste. Cooley e Idso (1980) apresentam pela primeira vez resultados experimentais com *Nymphaea* sp., obtendo redução da evaporação de 84% na área coberta pelas plantas. Silans (1981) testando diversos métodos para reduzir a evaporação conclui que certas plantas aquáticas facilmente encontradas no Nordeste como a *Jussieua* (*Ludwigia* Natans sp.), a *Salvinea*, a *azolla* e a *lemna* devem reduzir a evaporação de pequenos reservatórios, enquanto a *pistea* e a *baronesa* devem aumentá-la. Idso (1981) analisando diversos estudos experimentais publicados por outros autores mostra que o albedo maior de uma superfície vegetada em muitos casos deve levar a uma redução da evapotranspiração da mesma ordem do que o aumento do albedo. Silans e Eid (1988) mostram que a morfologia da planta, através do seu índice de rugosidade e de seu índice de cobertura foliar é também fator condicionante do resultado. Silans et al. (1989) apresentam reduções da evaporação entre 11 e 18% com a *Jussieua* e a *Salvinea*. Ao mesmo tempo, modelizando as transferências de água e calor, mostram o papel do albedo, da resistência estomatal e da resistência aerodinâmica sobre a evapotranspiração de uma superfície de água coberta por estas plantas aquáticas.

Os quebra-ventos são freqüentemente apontados como outro método para reduzir a evaporação de açudes. Embora, encontramos apenas uma referência, não disponível, sobre estudos com quebra-ventos (Crow e Manges, 1967).

As barragens subterrâneas constituem outra forma de armazenar a água com uma taxa de evaporação reduzida quando comparada à evaporação da superfície de um açu-

de. No entanto, não serão analisadas neste texto, pois constituem um método indireto de redução da evaporação.

## MECANISMOS DE REDUÇÃO DA EVAPORAÇÃO E PRINCIPAIS RESULTADOS

### Filmes monomoleculares de álcoois gordurosos

A molécula de álcool cetílico (hexadecanol) ou estearílico (octadecanol) apresenta um radical hidrófilo numa ponta e outro hidrófobo na outra ponta. Assim, fica orientada verticalmente à superfície da água, diminuindo a partir de uma certa tensão superficial a difusão das moléculas de água através do sistema poroso formado. O filme assim formado não impede a passagem de outros gases tais como o gás carbônico ou o oxigênio. A resistência à evaporação devido ao filme depende da tensão superficial, da temperatura e da natureza química do filme. Rosano e La Mer (1956) indicam valores entre 100 e 300 s m<sup>-1</sup>. A tensão superficial do filme depende inicialmente da dosagem. Ferreira Filho (1974), encontrou um valor de tensão superficial de 37,4 dinas/cm para uma dosagem diária de 34,8 mg/m<sup>2</sup>. A resistência do filme diminui com a temperatura da superfície da água. Mansfield (1956) indica uma queda muito acentuada da resistência para temperaturas entre 30 e 40°C. O vento pode quebrar o filme e empurrá-lo em direção à borda do açude. Loft, secretário técnico da “Division of Applied Organic Chemistry of CSIRO” escreveu nos, referindo-se aos trabalhos de Mansfield:

*“Em experiências realizadas em Brocken Hill nos reservatórios de Stephen Creek e Umberumberka, de 1955 a 1964, a redução de evaporação total foi estimada entre 10% e 12%... O maior problema é o efeito do vento e a ação das ondas, porque ambos aumentam a evaporação e destroem o filme de álcool cetílico. Paradoxalmente este efeito é de importância menor nos grandes reservatórios... A conservação do filme de álcool cetílico, uma vez que já esteja estabelecido, depende da velocidade do vento. Ventos superiores a 5 m.p.h. (8 km/h) rompem o filme, tendo-se estabelecido este valor a partir de numerosas experimentações.... Para que o filme de hexadecanol permaneça à superfície com ventos da ordem de 7 a 8 m.p.h. (11,2 a 12,8 km/h) é necessário aplicar-se duas vezes a quantidade de hexadecanol prevista teoricamente, e mais de quatro vezes quando o vento atinge 15 m.p.h. (24 Km/h) ...”*

O filme de hexadecanol, uma vez instalado à superfície evapora e pode ser degradado por bactérias do tipo *Pseudomonas* e *Flavobacterium* (Frenkiel, 1965).

Testes de qualidade da água foram realizados em numerosos reservatórios, dentre os quais alguns com propósito de abastecimento de água. Estes testes foram acompanhados por um comitê de colaboradores, coordenados

**Tabela 1. Resultados.**

Lago	Área (ha)	Filme	Eficiência (%)
Umberumberka (AUS.)	102	Hexadecanol	20
Corella (AUS.)	244	Hexadecanol	40
Malya (África)	53	Hexadecanol	11,5
Hefner – USA	1017	Hexadecanol	9
Sahuaro – USA	407	Hexa+Octadecanol	14
Rehovot pond – Israel	0,06	Hexadecanol	29 a 75
Cachuma (USA)	1371	Hexadecanol	8

pelo USBR, com participação de representantes do serviço de saúde pública dos EUA, tendo-se julgado unanimemente que o hexadecanol não produz efeitos nocivos à qualidade da água. Testes no Robert A. Taft Sanitary Engeneering Center do serviço de saúde pública dos Estados Unidos concluíram pela não toxidez aos peixes. O maior impacto ambiental dos filmes monomoleculares diz respeito ao aumento da temperatura do corpo de água. De fato, a quantidade de radiação solar recebida pelo corpo de água assim como as condições atmosféricas não são afetadas pelo filme de hexadecanol. No entanto, este, ao reduzir a evaporação, diminui o fluxo de calor latente, se traduzindo pelo aumento da temperatura do corpo de água. Na região do Cariri, experimentos efetuados em tanques classe A, levaram durante o dia a aumento de temperatura de 7°C (Silans et al., 1989). Obviamente estes aumentos que podem ser bastante inferiores no caso de grandes açudes, diminuem a eficiência do filme monomolecular em reduzir a evaporação.

Na Tabela 1 apresentam-se alguns resultados de redução de evaporação em lagos com filmes monomoleculares.

A eficiência do filme monomolecular em reduzir a evaporação depende de inúmeros fatores, principalmente ambientais. Silans (1981) e Barnes (1993) mostraram que, entre outros, a umidade do ar e a temperatura da superfície da água do lago afetam diretamente a eficiência. A eficiência do filme decresce com o aumento da pressão de vapor no ar atmosférico e com o aumento da temperatura da superfície do lago.

### Quebra-ventos

Como o nome indica, os quebra-ventos podem diminuir a evaporação através da redução da velocidade do vento. Há muito poucas referências a respeito de estudos dessa natureza, no entanto é freqüente observar nas introduções de artigos, algumas indagações a respeito, sem ser respaldadas por referências bibliográficas.

A redução da velocidade do vento pode ser feita através dos seguintes mecanismos:

- Instalação de barreiras artificiais a montante do açude na direção do vento;
- Instalação de barreiras naturais a montante do açude na direção do vento;
- Instalação ou mantimento de faixas marginais de vegetação em torno do açude.

A Figura 1 extraída de Oke (1990), mostra como uma barreira modifica o fluxo aerodinâmico do vento.

Observa-se dessa figura, que a velocidade do vento é reduzida em uma pequena faixa a montante da barreira, de comprimento equivalente a 6 a 7 vezes a altura do obstáculo, assim como numa faixa a jusante de até 25 a 30 vezes a altura da barreira. Ao reduzir a velocidade do vento, tanto o calor sensível como o calor latente de evaporação são reduzidos. Dependendo da morfologia do açude, e principalmente da altura da lâmina de água e da declividade das bermas imediatamente a jusante da barreira, a temperatura da superfície do lago nesta faixa pode aumentar significativamente, o mesmo ocorrendo com a intensidade turbulenta na cavidade (Figura 1b). Estes efeitos podem contribuir para uma diminuição dos efeitos da redução do vento sobre a evaporação. Além do mais, se a barreira for natural (cerca vegetativa), a própria transpiração das plantas devem minimizar se não anular a redução de evaporação proporcionada pelo método.

No caso de uma faixa de vegetação tal como preconizada pelo código florestal, o comportamento aerodinâmico do vento acima da superfície de água é bem diferente, pois se estabelece uma camada limite interna na interface entre os dois ambientes. Além disto, o vento incidente sobre o lago, carrega-se de vapor de água ao passar acima da vegetação e diminuir a sua temperatura, criando um microclima local mais ameno. A incidência da radiação solar direta sobre a superfície do lago é também parcialmente diminuída devido ao efeito de sombra que a faixa vegetativa em torno do lago vai proporcionar. No entanto, não é certo existir de fato conservação da água no lago, pois a redução da evaporação proporcionada pelo método pode ser contrabalanceada pela evapotranspiração da faixa vegetativa. Esta solução merece caso a caso maiores investigações. No caso da barreira artificial, o autor entende que se trata de uma solução que pode ser viável, apenas para proteger alguns pequenos reservatórios ou tanques de armazenamento de água, em locais praticamente sem vegetação com altura suficiente.

### Corpos artificiais flutuantes à superfície

Corpos artificiais flutuantes à superfície da água, dependendo do seu poder refletor em função da cor da sua superfície, reduzem significativamente a energia radiante incidente, tendo como primeira consequência uma diminuição da temperatura da água e consequentemente da evapo-

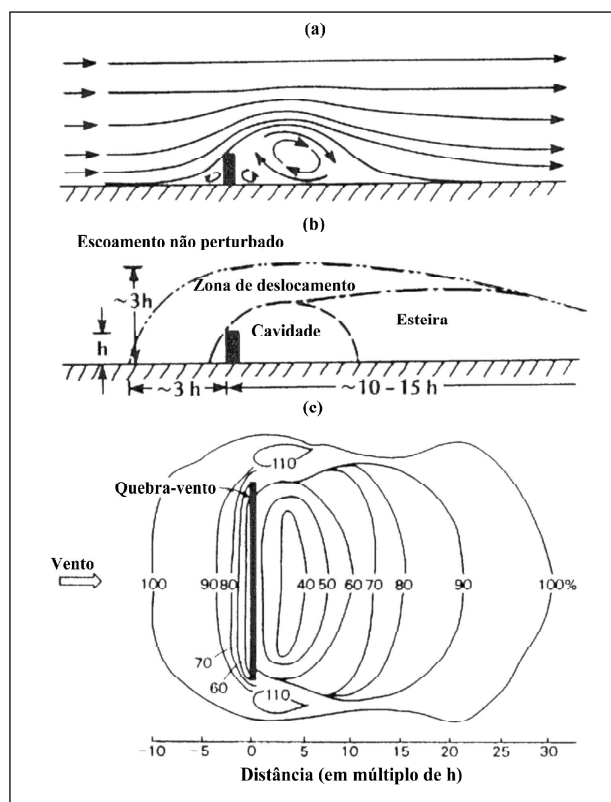


Figura 1. Modificação da velocidade do vento ao transpor uma barreira segundo Oke (1990).

ração. Na década de 70, vários trabalhos foram apresentados neste sentido, alguns dos quais já citados na introdução deste artigo. Vale salientar aqui que todos os experimentos foram realizados em tanques de pequenas dimensões (alguns  $m^2$ ) ou em açudes muito pequenos ou barreiros (Cluff, 1967; Silans e Eid, 1988). Materiais dos mais diversos tipos foram utilizados, alguns dos quais estão listados a seguir:

- Perlites de barro vitrificado e pintado ou de isopor;
- Placas flutuantes de isopor, concreto asfaltado e pintado de branco, folhas de plástico,...;
- Blocos flutuantes de concreto asfaltado e pintado de branco, de barro vitrificado, de cera de parafina,...;
- Corpos diversos de plástico branco (caixinhas, garrafas,...).

A eficiência em se diminuir a evaporação é proporcional à área coberta e se situa entre 25% e 100% da área coberta. A eficiência é diminuída seriamente quando a superfície artificial, diminui o seu poder refletivo (se sujando por exemplo). Ela também é diminuída sensivelmente se, devido a descontinuidades na cobertura ou a movimentos de rotação do corpo flutuante (movimento de *splín*), a turbulência do ar acima das partes descobertas, for bastante aumentada.

Curiosamente, na literatura dedicada a esta alternativa como potencial redutor de evaporação, nenhuma consideração é feita no tocante aos possíveis impactos ambientais.

Cooley e Myers (1973), assim como Porto et al. (1986) fizeram uma estimativa dos custos das soluções adotadas por volume de água economizado, os quais são reproduzidos nas Tabelas 2 e 3. Vale salientar que estes custos se referem a resultados experimentais obtidos em pequenos tanques, e que não são incluídos as despesas operacionais, até porque, segundo a maioria dos autores, grandes dificuldades operacionais devem ser encontradas para aplicar estes métodos em lagos e açudes devido à manutenção, e à necessidade de minimizar os espaços abertos entre os corpos flutuantes por causa do aumento da intensidade turbulenta.

### Plantas aquáticas

Na Figura 2 está esquematizado o funcionamento de uma superfície de água parcialmente coberta por plantas aquáticas (Silans, 1981).  $\dot{m}_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , representa os fluxos máximos de água.  $i = 1$  corresponde à superfície não coberta pelas plantas aquáticas;  $i = 2$  corresponde à superfície das plantas aquáticas e  $i = 3$  corresponde à superfície de água entre as plantas aquáticas. As condições ambientais atmosféricas sendo as mesmas sobre toda a superfície do lago,  $\dot{m}_1$  depende da temperatura da superfície do lago e da resistência aerodinâmica acima da superfície descoberta;  $\dot{m}_2$  depende da temperatura das folhas, da resistência estomatal e da resistência aerodinâmica acima das folhas;  $\dot{m}_3$  depende da temperatura da superfície da água parcialmente protegida pelas plantas aquáticas e da resistência aerodinâmica acima desta superfície.

Para este estudo, pode-se classificar as plantas aquáticas em:

- Plantas flutuantes à superfície: Eichornea; Pistia; Lemna; Salvinia, Jussieua; Azolla;...
- Plantas submersas: Utricularia; Anacharis; Vallisneria; Cabomba e Patamogeton
- Plantas enraizadas no fundo, cujas folhas são flutuantes ou emergem: Nymphaea e Typha.

As plantas aquáticas de cor esverdeadas apresentam um albedo superior ao albedo da água livre. Silans et al. (1989) tem medido albedos de 0,28 e 0,25 para a Jussieua (*Ludwigia Natans sp.*) e a Salvinia respectivamente. A parte da energia solar refletida pelas plantas é maior do que a mesma parte correspondente para a água descoberta. A transpiração das plantas aquáticas se processa através das cavidades estomatais. O processo é difusivo e oferece certa resistência, a resistência estomática. A área ofertada à transpiração pelas cavidades estomatais pode ser menor ou maior do que a área projetada horizontalmente, dependendo do número de folhas de cada planta individual e do ângulo das folhas com a horizontal. A resistência aerodinâmica depende da intensidade turbulenta do ar acima da superfície. Entende-

**Tabela 2. Custo dos corpos flutuantes para economizar 1000 litros de água, segundo Cooley e Myers (1973).**

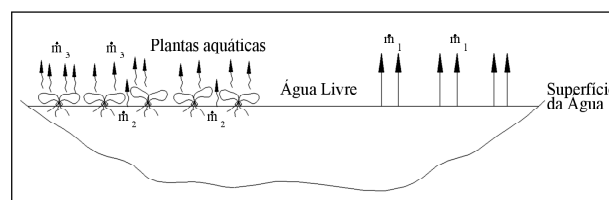
Material	US \$ (1973)*
Blocos de concreto asfaltados e pintados de branco	0,45
Folha de borracha branca (butyl)	0,46
Blocos de cera	0,14
Folhas de polistirene	0,43

\* Os preços desta tabela foram calculados considerando um fator de amortecimento do capital de 6% ao ano.

**Tabela 3. Custo dos corpos flutuantes para economizar 1000 litros de água segundo Porto et al. (1986).**

Material	ORTN (1984)*
Esferas de barro vitrificado	0,62
Esferas de barro não vitrificado	0,59
Discos de isopor parafinado	0,26

\* Obrigações do tesouro Nacional



**Figura 2. Representação esquemática da evapotranspiração em açude parcialmente coberto por plantas aquáticas.**

se que as plantas cujas folhas flutuam horizontalmente à superfície, pouco devem afetar a resistência aerodinâmica quando comparada com uma superfície de água livre. Ao contrário, as plantas erguidas sobre a superfície de água devem diminuir bastante a resistência aerodinâmica acima da superfície coberta, assim como acima da área descoberta a jusante na direção do vento. Da mesma forma, ocorre com a superfície de água descoberta entre as plantas aquáticas. Neste caso também o fluxo vertical de vapor de água dependerá da temperatura desta superfície. O processo é complexo, pois todas essas resistências interferem entre si, afetando a temperatura local da superfície, como resultante do balanço de energia. No entanto, os trabalhos de Idso (1981), Anderson e Idso (1987), Silans e Eid (1988) e Silans et al. (1989), mostraram os efeitos positivos destes mecanismos sobre as plantas aquáticas de folhas miúdas que flutuam à superfície da água. Cooley e Idso (1980) deduziram resultados positivos no sentido da diminuição da evaporação com Nymphaea, assim como tinha sido sugerido por Iherino (1932). No entanto, este autor tem medido temperaturas bem superiores à temperatura da superfície de água no pequeno colchão de água que permanece sobre as folhas quando a mesma é eventualmente molhada pela ação das ondas. Es-

tas diferenças chegaram a 2 graus em *Nymphaea* cobrindo parcialmente um pequeno lago do jardim zoológico de João Pessoa - PB. Este efeito não foi analisado por Cooley e Idso (1980). Resumindo os resultados apresentados na literatura e considerando a discussão acima quanto aos processos, pode-se concluir quanto à eficiência em se diminuir a evaporação:

- A *Eichornia crassipes* aumenta a evaporação;
- As *Nymphaea* diminuem a evaporação em pequenos reservatórios, mas possivelmente pode aumentá-la em reservatórios maiores com ondas na superfície
- A *Jussieua* (*Ludwigia natans* sp.) tem diminuído a evaporação entre 11% e 18% (Silans e Eid, 1988) e em 6% (Silans et al., 1989), cobrindo aproximadamente 80% da área de um tanque classe A em ambos os casos;
- A *Salvinia* tem diminuído a evaporação em 15% (Silans et al., 1989), cobrindo aproximadamente 80% da área de um tanque classe A;
- A *Pistia* tem ligeiramente aumentado ou diminuído a evaporação nos experimentos efetuados;
- Outras plantas como *azolla*, *lemna*, devem também reduzir a evaporação.

Esses resultados positivos no entanto devem ser observados com cuidado, já que apenas Linacre et al. (1970) reportam resultados em grandeza natural (um alagado). Embora, segundo Anderson e Idso (1987) e Silans et al. (1989), diminuição similar da evaporação com as plantas estudadas deve também ser observada em açudes. Também, a presença destas plantas invasoras num ambiente aquático pode trazer certos impactos ambientais negativos e positivos, dependendo na realidade do controle que o usuário do açude poderá efetuar sobre as mesmas.

A presença de plantas aquáticas em lagos e represas apresenta dois aspectos principais que devem ser considerados. O primeiro diz respeito ao importante papel que essas plantas desempenham no metabolismo de todo o ecossistema, por suas elevadas taxas de produtividade primária e conseqüentemente por seu papel fundamental na ciclagem de matéria e fluxo de energia (Tundisi et al., 1983). Além disso, as plantas aquáticas são importantes na formação de detritos orgânicos, constituindo a maior fonte de energia para os animais detritívoros. Podem ser ainda responsáveis por cerca de 60% da fixação de carbono do lago, e as maiores contribuidoras desse elemento para a camada superficial do sedimento. A liberação de nutrientes orgânicos para o meio aumenta a produtividade das comunidades epifíticas e pode influenciar significativamente na taxa de produção secundária na zona pelágica.

O segundo aspecto a considerar, são os inconvenientes dessas plantas para o próprio ecossistema aquático, bem como para a quantidade da água destinada ao consumo humano. A grande quantidade de biomassa produzida pelas plantas aquáticas que termina por depositar-se no fundo do

lago, entra em processo de decomposição, promove demanda de oxigênio, originando sub-produtos que causam sabor, odor e cor na água de abastecimento. Por outro lado, liberam nutrientes inorgânicos para a coluna d'água, podendo acelerar o processo de eutrofização de ecossistemas lacustres.

Gadelha et al. (1990), acompanharam em laboratório durante 93 dias, a decomposição aeróbia e anaeróbia da *Jussieua* (*Ludwigia natans*) e da *Salvinia*. Mostraram que a liberação de ortofosfatos, nitratos, nitritos, amônia e sulfatos para a coluna de água foi intensa. Estes autores assinalam também que o processo de decomposição da *Jussieua* (*Ludwigia natans*) é várias vezes maior do que o processo de decomposição da *Salvinia*.

Existem também outros fatores positivos. A temperatura da água é mais baixa em área coberta pelas plantas e o sombreamento provocado pelas plantas pode ser o inibidor da formação de algas indesejáveis. Certas plantas como *Salvinia* produzem oxigênio por dentro da água pela fotossíntese. Enfim, o controle sobre a sedimentação destas plantas pode trazer benefícios importantes, pois as mesmas podem ser compactadas para adubo ou produção de gás.

## CONCLUSÕES

Diversas técnicas de redução da evaporação foram apresentadas. Observa-se no parágrafo "Marcos Históricos" uma certa cronologia na pesquisa e no desenvolvimento destas alternativas, o que leva a pensar que as primeiras alternativas pesquisadas não foram bem sucedidas. No entanto, uma análise pormenorizada dos mecanismos de redução da evaporação e dos resultados apresentados permite inferir certas recomendações:

Em grandes lagos, a única solução que parece viável é a da cobertura por um filme monomolecular de hexadecanol. No entanto não há como manter este filme à superfície se a velocidade média do vento for superior a 8 Km/h e se existir lufadas superiores a 20 Km/h. O filme será tanto mais eficiente quanto menor a umidade relativa do ar. Embora não existam resultados concretos na literatura, tudo indica que se o lago for cercado por uma faixa marginal de vegetação, relativamente larga esta terá efeitos positivos sobre a evaporação quando adulta (requer menor quantidade de água para seu desenvolvimento).

No caso de pequenos açudes, as plantas aquáticas parecem ser a solução viável. No entanto mecanismo de controle da sua decomposição e proliferação bem como controle biológico do seu desenvolvimento associando o seu ciclo de vida aos períodos de maior necessidade de redução da evaporação devem ser ainda bem estudados. Os aspectos positivos quanto ao aproveitamento econômico das plantas devem ser realçados.

No caso de pequenos barreiros e tanques, a solução de quebra-ventos deve apresentar os melhores resultados.

Ressalta-se que o objetivo deste trabalho foi o de apresentar um estado da arte, mais completo possível sobre o assunto. Espera-se, assim, despertar o interesse de pesquisadores com formação bastante diferentes: meteorologista; químicos; limnólogos; biólogos; mecânicos e hidrólogos para que se promova na região semi-árida do Brasil amplo debate sobre o tema, analisando-se a conveniência em se investir em pesquisa e projetos aplicados para a redução da evaporação em açudes.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. G. e IDSO, S. B., (1987). Surface geometry and stomatal conductance effects on evaporation from aquatic macrophytes. *Water Res. Res.*, vol. 23(6), p. 1037-1042.
- BARNES, G. T. (1993). Optimum condition for evaporation control by monolayers. *Journal of Hydrology*, vol. 145, p. 165-173.
- BENTON JR, A. R.; JAMES, W. P. & ROUSE JR, J. W. (1978). Evapotranspiration from water hyacinth (*Eichornia crassipes* (Mart.) Solms) in Texas Reservoirs. *Water Res. Bulletin*, vol. 14(4), p. 919-930.
- BEN-ZVI, A. (1998). Comunicação oral.
- CLUFF, C. B. (1967). *Rafts: new way to control evaporation*. Crops and soil magazine, p. 7-9.
- COOLEY, K. R. (1970). Energy relationships in the design of floating covers for evaporation reduction. *Water Res. Res.*, 6(3), p. 717-727.
- COOLEY, K. R. (1975). *Evaporation suppression for conserving water supplies*. Proc. Of Water Harvesting Symposium, p. 192-200.
- COOLEY, K. R. & CLUFF, C. B. (1972). Reducing pond evaporation with perlite ore. *Journal of the irrigation and drainage division*, ASCE, vol. 98(2), p. 255-266.
- COOLEY, K. R. & IDSO, S. B. (1980). Effects of Lily Pads on evaporation. *Water Res. Res.*, vol. 16(3), p. 605-606.
- COOLEY, K. R. & MYERS, L. E. (1973). Evaporation reduction with reflectives covers. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 99(3), p. 353-363.
- CROW, F. R. & MANGES, H. L. (1967). *Comparison of chemical and non-chemical techniques for suppressing evaporation from small reservoirs*. Transactions, ASAE, vol. 10(2), p. 172-174.
- DIAS, N. L. C. & KELMAN, J. (1987). Comparação entre modelos climatológicos e o uso de tanques classe A para estimativa da evaporação no reservatório de sobradinho. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. *Anais ABRH*, vol. 2, p. 162-169. São Paulo.
- FERREIRA FILHO, W. M. (1974). *Redução da evaporação através da aplicação de filmes monomoleculares de hexadecanol*. Tese de mestrado, escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- FRENKIEL, J. (1965). *Evaporation reduction. Physical and chemical principles and review of experiments*. Arid Zone Research. UNESCO.
- GADELHA, C. L. M.; WATANABE, T. e SILANS, A. M. B. PASSERAT de (1990). *Liberação de nutrientes inorgânicos durante o processo de decomposição de Ludwigia Natans (Ell.) (Dicotyledoneae: Onagraceae) e de Salvinia Auriculata (abul.) (Pteridophyta: Salviniaceae)*. Acta Limnol. Brasil, vol. 3, p. 633-652.
- GUADIANA, A. J. & SALDAÑA, H. C. (1976). *El lirio acuático en México, problemas y soluciones*. Recursos Hidráulicos, vol. 5(4), p. 590-603. Mexico.
- IDSO, S. B. (1981). Relative rates of evaporative losses from open and vegetation covered water bodies. *Water Res. Bulletin*, vol. 17(1), p. 46-48.
- IHERINO, R. VON (1932). *O papel das plantas aquáticas na evaporação*. Ann. Da Acad. Brasileira de Ciências, t. IV(4), p. 169-172.
- LANGMUIR, D. B. (1917). *The shape of group molecules forming the surfaces of liquids*. Proc. Nat. Acad. Sci., 3(4), p. 251-257.
- LINACRE, E. T.; HICKS, B. B.; SAINTY, G. R. & GRANZE, G. (1970). *The evaporation from a swamp*. Agric. Meteorol., vol. 7, p. 375-386.
- MANSFIELD, W. W. (1955). *Influence of monolayers on the natural rate of evaporation of water*. Nature, vol. 175, p. 247.
- MANSFIELD, W. W. (1956). *The use of hexadecanol for reservoir evaporation control*. Proc. Of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Evaporation Control, Southwest Research Institute, San Antonio Texas, p. 13-42.
- MANSFIELD, W. W. (1963). *Control of Evaporation*. National Symposium on Water Resources, Use and Management. Canberra, 9-13 September.
- MOLLE, F. (1994). *Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento*. Série Hidrologia n. 30. SUDENE Recife, PE. 194 p.
- MOURA, G. e SILANS, A. M. B. PASSERAT de (1993). Contribuição do modelo numérico de evaporação de açudes baseado no conceito de advecção localizada. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul*. Gramado, RS. 7-12 de Novembro.
- MYERS, L. E. & FRASIER, G. W. (1970). Evaporation reduction with floating granular materials. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 96(4), p. 7741-7750.
- OKE, T. R. (1990). *Boundary layer climates*. routledge. Now York, 2º ed.
- PLIRHINE (1979). SEPLAN, PB - *Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio do Peixe*, PB. Convênio SCIENTEC/SEPLAN - PB, vol. 1.
- PORTO, E. R.; AMORIM NETO, M. S. e SILVA, D. D. (1986). *Utilização de material flutuante no controle da evaporação no trópico semi-árido*. Pesq. Agropec. Bras., 21(1), p. 1-7.
- RIDEAL, E. K. (1925). On the influence of thin surface films on the evaporation of water. *Jour. Phys. Chem.* 29(12), p. 1585-1588.
- ROBERTS, W. J. *Evaporation Retardation by Monolayers*. Illinois State Water Survey. Urbana, Illinois.
- ROSANO, H. L. & LA MER, V. K. (1956). The rate of evaporation through monolayers of esters, acids and alcohols. *J. Phys. Chem.*, vol. 60, p. 348-353.
- SCIENTEC (1996). *Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba PDRH-PB*. Tomo 1, vol. 1.

- SILANS, A. M. B. PASSERAT de (1981). *Contribuição ao estudo do controle de evaporação em regiões semi-áridas*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 166 p.
- SILANS, A. M. B. PASSERAT de (1996). *Redução da evaporação em açudes e reservatórios*. Conferência pública proferida para o concurso para Professor Titular do DTCC/CT. Universidade Federal da Paraíba. Agosto.
- SILANS, A. M. B. PASSERAT de e EID, N. J. (1979). *Algumas considerações sobre controle da evaporação na Paraíba*. X Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Manaus, 21 a 26 de Janeiro.
- SILANS, A. M. B. PASSERAT de e EID, N. J. (1988). *Diminuição da evaporação em açudes do nordeste através de plantas aquáticas. Em Limnologia e Manejo de Represas*. Série: Monografias em Limnologia, Ed. J. G. Tundisi, vol. 1(1), p. 349-366.
- SILANS, A. M. B. PASSERAT de; SILVA, T. C.; ANDRADE FILHO, L. S.; ALENCAR, R. I. S.; GADELHA, C. L. M. e SILVA, E. C. (1989). *Efeito do albedo e da resistência estomatal sobre a evaporação de plantas aquáticas*. Congresso Luso Brasileiro de Recursos Hídricos.
- SOUZA, B. I. (1999). *Contribuição ao estudo da desertificação na bacia do rio Taperoá - PB*. Dissertação de Mestrado. PRODEMA Universidade Federal da Paraíba João Pessoa, 192 p.
- TIMBLIN JR, L. O.; MORAN, W. T. & GARSTKA, W. V (1957). Use of monomolecular layers for reservoir evaporation reduction. *Jour. A.W.W.A.*, vol. 49(7), p. 841-848.
- TUNDISI, T. M.; HINO, K. e ROCHA, O. (1983). *Características limnológicas da lagoa de Taquaral (Campinas, SP), um ambiente hipereutrófico*. Ci. E Cultura., 38(3): 420-425.
- VINES, R. G. (1962). *Evaporation control: a method of treating large surface*. In: Retardation of evaporation by monolayers: Transport processes Academic Press New York, V. K. La Mer Editor.
- WEERT, V. & KAMERLING, G. E. (1974). Evapotranspiration of water hyacinth (*eichornia crassipes*). *Journal of Hydrology*, vol. 22, p. 201-212.

## ***Evaporation Reduction in Lakes: The State of the Art***

### ***ABSTRACT***

*In this paper the state of the art on mechanisms to control evaporation from lakes in the Brazilian Northeast semi-arid region are described. In the introduction, the importance of diminishing evaporation from small reservoirs in the region is shown. Several alternatives are considered: Monomolecular films of fatty alcohols; wind-breaks; artificial floating bodies and macrophytes. The conclusion presents several recommendations, especially the need to establish a multidisciplinary group to study the usefulness of implementing a research project on this subject in the region.*

*Key words: reduced evapotranspiration; monomolecular films; aquatic plants; small reservoirs.*