

EVAPORAÇÃO – UMA ALTERNATIVA PARA O TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS

Letícia Moratelli⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis-SC, Brasil.

Armando Borges de Castilhos Junior

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Doutor em gestão e tratamento de resíduos sólidos urbanos e industriais pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França. Pós-doutor pela University of California de Davis, Estados Unidos e pela Université de Sherbrooke, Canadá. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, Florianópolis-SC, Brasil.

Débora Machado de Oliveira

Engenheira Sanitarista e Ambiental, Mestre e Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professora do Departamento de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis da Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus de Erechim-RS, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos (LARESO) - Bairro Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. CEP: 88040-970. Tel: +55 (48) 3721-7754. E-mail: le_moratelli@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão das tecnologias de tratamento de águas residuárias por evaporação, além das vantagens e preocupações associadas à aplicação desta tecnologia ao tratamento de lixiviado. Diversos trabalhos de pesquisa estão sendo realizados no Brasil, visando verificar a viabilidade técnica e ambiental desta tecnologia que, timidamente, vem despontando como uma alternativa ao tratamento de lixiviado. Uma análise das principais pesquisas realizadas até o presente momento é apresentada neste trabalho, bem como uma reflexão sobre as preocupações ambientais relacionadas ao uso desta tecnologia no tratamento de lixiviados de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de lixiviado, evaporação, viabilidade ambiental.

INTRODUÇÃO

O aterro sanitário ainda constitui-se na forma de destinação final de resíduos sólidos de origem urbana mais utilizada no mundo todo, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e sua capacidade de absorção diária de grande quantidade de resíduos, quando comparada às demais formas de tratamento e disposição de resíduos. Apesar das vantagens, a disposição de resíduos em aterros gera subprodutos como gases e líquidos, os quais necessitam ser adequadamente tratados. O líquido gerado pelo aterro sanitário, também chamado de lixiviado, constitui-se em um dos efluentes mais complexos e difíceis de serem tratados. O lixiviado é gerado em consequência da percolação da água da chuva através da massa de resíduos, de processos bioquímicos que ocorrem no interior da célula de resíduos e da própria umidade dos resíduos.

A composição e a concentração do lixiviado são dependentes de vários fatores, entre eles, a idade do aterro, o tipo de resíduo, a temperatura, a sazonalidade, a precipitação e a geologia local (RENOU et al., 2008, LEMA, MENDEZ e BLAZQUEZ, 1988). Muitos pesquisadores têm reportado em lixiviados altas concentrações de material orgânico e inorgânico, metais pesados, substâncias recalcitrantes e contaminantes microbiológicos com alto potencial nocivo (EL-FADEL, FINDIKAKIS e LECKIE, 1997; KJELDSEN et al., 2002; ÖMAN e JUNESTEDT, 2008). Em virtude do crescente rigor dos padrões de lançamento de efluentes, aliado ao envelhecimento dos aterros, os quais produzem cada vez mais lixiviados estabilizados, é urgente a necessidade de estudos focados em novas tecnologias de tratamento, bem como no aperfeiçoamento dos sistemas de tratamento utilizados tradicionalmente.

A tecnologia de evaporação tem sido indicada para o tratamento de águas residuárias de origem industrial, com o propósito de concentrar ou separar resíduos e poluentes, sendo considerada uma das principais formas de tratamento empregadas na remoção de material inorgânico (WANG et al., 2006; NEMEROW, 2006). No entanto, desde a década de 80 sua aplicação tem sido estudada para o tratamento de lixiviados de aterros

sanitários (BIRCHLER et al., 1994). A utilização da tecnologia de evaporação como um sistema de tratamento de lixiviado é uma aplicação recente no Brasil, que vem sendo impulsionada pela possibilidade de aproveitamento do próprio gás de aterro como fonte energética para o aquecimento do lixiviado ou do ar circunstante, bem como pelo atrativo de obter os Certificados de Redução de Emissão pela inclusão do projeto nos termos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, do protocolo de Quioto.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão das tecnologias de tratamento de águas residuárias por evaporação. A pesquisa efetuada traz as principais vantagens e limitações/preocupações associadas à aplicação desta tecnologia ao tratamento de lixiviado. Por fim, relatam-se os principais resultados obtidos através de estudos realizados em âmbito nacional.

EVAPORAÇÃO DE LIXIVIADO

Segundo Birchler et al. (1994) as primeiras experiências de evaporação de lixiviado foram realizadas por pesquisadores alemães e suíços no decorrer da década de 80. Steinmetzer (1987) e Tiefel (1989) apud Birchler et al. (1994) monitoraram uma planta de evaporação em escala real (capacidade 3,6 m³/h) composta por uma unidade de remoção de amônia e *air stripping* antes da evaporação por *flash* em dois estágios, e relataram eficiências médias de remoção em torno de 92 % para DQO e 94 % para amônia; já, para os compostos orgânicos fenólicos, a eficiência de remoção foi inferior, em torno de 50 % e apenas traços de COV (compostos orgânicos voláteis) foram reportados.

Em suas pesquisas, Marks, Luthy e Diwekar (1994) concluíram que a evaporação em um estágio, com ajuste de pH, pode ser adequada para tratar lixiviados com elevadas concentrações de amônia ou ácidos orgânicos voláteis, no entanto, se o lixiviado possuir concentrações elevadas, tanto de amônia como de ácidos orgânicos voláteis, então recomenda-se dois estágios com ajuste de pH ácido/base para que seja possível obter um nível de qualidade satisfatório para o evaporado. Por outro lado, se estiverem presentes altas concentrações de compostos orgânicos voláteis não iônicos nos lixiviados, então um pré ou pós-tratamento pode ser necessário para obter um evaporado de qualidade.

Eisner, Leonhard e Wilderer (1996), após várias pesquisas, concluíram que a tecnologia de evaporação aplicada ao tratamento de lixiviado é muito eficiente quando comparada a outros métodos de tratamento. Com relação às elevadas concentrações de amônia e ácidos orgânicos carregados para os vapores, os autores indicaram o ajuste de pH em duas fases (ácido/base) como mecanismo de controle eficiente. Entretanto, Yue et al. (2007) alertam para o fato de que os lixiviados de aterros possuem elevada capacidade tampão, devido às altas concentrações de bicarbonato, amônia e outros sais de ácidos e bases fracas, que resultam em um alto custo para ajuste de pH no caso da realização de evaporação ácida.

Estudos mais recentes (DI PALMA et al., 2002; REHMAN, 2003; LEE et al., 2003; HERCULE et al., 2005; XU et al., 2006; YUE et al., 2007; GIUST, VISITIN e PICCOLO, 2007) têm indicado que o tratamento por evaporação pode ser eficaz na remoção de compostos orgânicos, amônia e substâncias húmicas de lixiviados de aterros sanitários. Devido à complexidade das características dos lixiviados, Rehman (2003) afirma que não há, atualmente, uma tecnologia (convencional ou não) capaz de remover todos os poluentes de um lixiviado em apenas um estágio. Apesar disto, o autor recomenda a tecnologia de evaporação como uma alternativa que oferece a vantagem de tratar o lixiviado com o emprego de poucas unidades de operação.

No Brasil, a tecnologia de evaporação já vem sendo praticada, porém pouco conhecimento se tem acerca dos riscos e impactos ambientais resultantes do uso deste tipo de tratamento (SANTOS, 2011). Dentre os processos físico-químicos, a evaporação de lixiviados ainda é pouco estudada, e, portanto, neste trabalho busca-se apresentar as principais vantagens e preocupações relacionadas com o uso desta tecnologia no tratamento de lixiviado.

Evaporação natural

A evaporação natural depende, fundamentalmente, da energia disponível proveniente da radiação solar. A temperatura do ar está associada à radiação solar e, desta forma, correlaciona-se positivamente com a

evaporação. Um aumento da temperatura do ar influi favoravelmente na intensidade de evaporação, pois permite que uma maior quantidade de vapor de água esteja presente no mesmo volume de ar, quando é atingido o grau de saturação deste. Os ventos, por sua vez, são responsáveis pela renovação do ar acima da superfície evaporante, deslocando a massa de ar saturado de modo a permitir a continuidade do processo evaporativo (TUCCI, 1993).

Um dos métodos tradicionais de evaporação de águas residuárias consiste em lagoas de evaporação natural, as quais dependem da combinação do aquecimento solar e do vento para evaporar naturalmente a água. Esse método requer grande área física, é lento e está sujeito às condições climáticas, além de apresentar problemas de odores (FINK e HART, 2001). Em lagoas de evaporação o fenômeno ocorre na superfície da interface líquido-ar, portanto, a área de contato é um fator limitante na taxa de evaporação de um líquido, principalmente quando se considera a lâmina d'água de uma lagoa qualquer. Portanto, uma forma de acelerar o processo de evaporação é aumentar a superfície de contato entre a fase líquida e o ar. Para tanto, pode-se utilizar estruturas de contato, isto é, materiais com elevada área superficial. Estas superfícies podem ter estrutura alveolar, similar às colmeias de abelhas, apresentando uma elevada área específica em volumes relativamente baixos.

A eficiência do processo de evaporação natural com o uso de painéis evaporativos no tratamento de águas residuárias tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. No sul da França, Bondon et al. (1994) desenvolveram um sistema de evaporação natural com painéis evaporativos para tratar efluentes agroindustriais provenientes de vinícolas. Analogamente, em Portugal, Duarte e Neto (1996) apresentaram uma proposta de tratamento de dejetos suínos utilizando um sistema similar de evaporação com painéis. No Brasil, estudos conduzidos por Ranzi (2009) demonstraram a elevada eficiência da evaporação com uso de painéis evaporativos no tratamento de lixiviado.

É importante destacar que, na evaporação natural, embora o processo possa ser acelerado com o uso de painéis, o fenômeno de evaporação ainda está diretamente relacionado com os fatores climáticos, tendo como fatores determinantes a radiação solar, a velocidade dos ventos e a umidade relativa do ar. Portanto, em regiões geográficas aonde as condições climáticas não são favoráveis à evaporação natural, é possível fornecer as condições necessárias (ou o mais próximas do ideal) ao processo de evaporação em sistemas fechados, comumente denominados de evaporação acelerada ou forçada.

Evaporação acelerada ou forçada

A evaporação acelerada ou forçada caracteriza-se pelo uso de energia para elevar a temperatura do líquido até o seu ponto de ebulição. Há vários tipos de evaporadores que podem ser usados para realizar a evaporação de lixiviados. Algumas tecnologias disponíveis utilizam de maneira direta a energia gerada pela queima do biogás (YUE et al., 2007), entretanto, outras tecnologias utilizam o calor residual de geradores e/ou turbinas movidas a biogás (GIUST, VISITIN e PICCOLO, 2007), a fim de aproveitar esta energia térmica que, de outra forma, seria perdida. Assim, consegue-se não somente o aproveitamento do gás para energia elétrica, mas também o tratamento dos lixiviados, solucionando os dois principais problemas que se tem em aterros sanitários: emissões de gases e lixiviados (GIRALDO, 2001).

Segundo Giust, Visitin e Piccolo (2007) os evaporadores podem diferir em função da fonte de energia, tipo de circulação e tipo de tecnologia. Quanto à fonte de energia para o processo de evaporação pode ser usado: (a) energia elétrica; (b) vapor; e (c) água quente. Quanto ao tipo de circulação, pode ocorrer por: (a) circulação natural, na qual o líquido flui naturalmente para o interior de um trocador de calor em baixa velocidade, ou (b) circulação forçada, onde o líquido é conduzido para o interior de um trocador de calor por meio de bombeamento a uma determinada taxa que proporciona a vantagem de um fator de concentração mais elevado (GIUST, VISITIN e PICCOLO, 2007). Hewitt et al. (1993) apud Rehman (2003) classificou os evaporadores em quatro tipos: (a) Evaporadores tipo Filme; (b) Evaporadores de Ebulição; (c) Evaporadores Flash; (d) Evaporadores de Contato Direto.

Fink e Hart (2001) discutiram os principais problemas associados aos evaporadores e destacaram que a presença de cloretos e baixo pH nos lixiviados podem intensificar as taxas de corrosão dos materiais. Além disso, os metais pesados e os COV podem constituir-se em fontes de emissões atmosféricas, os sólidos suspensos e dissolvidos poderão aumentar a frequência da limpeza regular do lodo de fundo e, conseqüentemente, os custos do tratamento. Estas preocupações foram apontadas também por Rehman (2003) como relevantes na escolha do tipo de evaporador a ser selecionado para tratamento de lixiviado. Segundo o

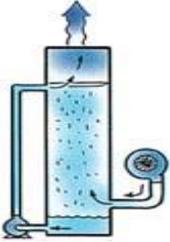
autor, em lixiviados contendo materiais dissolvidos, é provável que haja a formação de incrustações nas superfícies aquecidas. Portanto, o uso de evaporadores do tipo filme e ebulição, os quais envolvem tubos ou pratos de metais finos para transferência de calor, podem ser considerados inadequados, devido ao potencial de deposição de materiais (incrustações) na superfície do metal. Os sistemas de evaporação por contato direto e por flashing têm a vantagem de evitar a ebulição do lixiviado na superfície aquecida e problemas associados a incrustações e corrosão. Porém, uma séria limitação deste sistema é a poluição devido à mistura de dois fluxos, ar e lixiviado. Os COV no fluxo de lixiviado podem ser vaporizados, causando poluição atmosférica.

Quanto ao aspecto operacional, Ribeiro Jr. (2005) salienta que os evaporadores de contato direto apresentam uma série de vantagens em relação aos evaporadores tradicionais. Entre as vantagens destaca-se a eficiência na transferência de calor, da ordem de 95 %. Além disso, as unidades são mais compactas, de fácil construção e com custos fixos e de manutenção consideravelmente menores. Não se verifica a perda de eficiência devido à formação de incrustações, o que torna os evaporadores de contato direto os candidatos naturais para a concentração de substâncias corrosivas e/ou incrustantes.

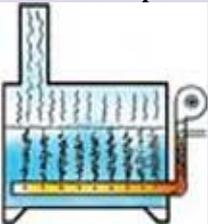
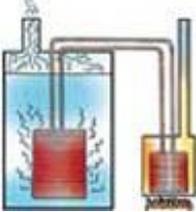
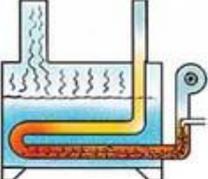
Rehman (2003) também destaca algumas vantagens da técnica de evaporação por contato direto, dentre elas: (a) alta transferência de calor e massa, associada com a boa mistura entre gases quentes e líquido, que ocorre devido à grande área superficial disponível no sistema de partículas dispersas; (b) construção simplificada e redução do custo de capital, devido à eliminação dos complexos sistemas de tubos e pratos de metal que impõem resistência térmica e estão sujeitos a incrustações e corrosão; e, por fim, (c) a coluna de spray serve para remover os poluentes orgânicos do lixiviado pelo fluxo de vapor de exaustão.

Um resumo das principais limitações e preocupações associadas aos diversos sistemas de evaporação no tratamento de águas residuárias foi sumarizado por Fink (2002), conforme observado no Quadro 1.

Quadro 1: Tipos de evaporadores e suas principais limitações/preocupações.

| Tipo de Evaporador | Princípio de Funcionamento | Limitações e Preocupações |
|--|---|--|
| <p>Lagoas de evaporação natural</p>  | <p>Depende da combinação da energia solar e do vento para evaporar naturalmente a água.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Muito lento; ▪ Ocupa grande espaço; ▪ Requer movimentação de grande área de terra e impermeabilização do fundo; ▪ Problemas de odor. |
| <p>Evaporador de ar forçado</p>  | <p>Utiliza sopradores para forçar a entrada de ar em contra corrente com o lixiviado pulverizado no topo da coluna. O modelo não foi projetado para remoção de sólidos secos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Não recomendado para efluentes com alto teor de sólidos suspensos e dissolvidos; ▪ Eficiência depende da umidade relativa dos gases e da temperatura da água; ▪ COV podem ser transferidos rapidamente para a atmosfera, gerando poluição. |
| <p>Evaporador com caldeira e soprador</p>  | <p>Pode evaporar um volume grande a um baixo custo. Os sólidos dissolvidos são vaporizados à temperatura de 100 °C e soprados para a atmosfera.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Não possui coletor para sólidos suspensos e arraste de gotas; ▪ COV podem ser vaporizados e gerar poluição do ar; ▪ Não é adequado para destilação ou reuso de água. |

Quadro 1: Tipos de evaporadores e suas principais limitações e preocupações.

| | | |
|--|--|--|
| <p>Evaporador básico de ebulição com tanque</p>  | <p>Basicamente eleva a temperatura da água até o ponto de ebulição (100 °C) e direciona o vapor de água via um tubo de exaustão. Este método não tem dispositivo para remoção dos sólidos secos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ COV são vaporizados para a atmosfera; ▪ Ácidos e sais atacam os materiais em aço; ▪ Alto custo de energia para aquecer o tanque em temperatura acima de 100 °C, devido aos sais presentes; ▪ Custo extra de energia para superar o isolamento causado pela deposição dos sólidos e sais; ▪ Risco de funcionamento a seco, resultando em fundição. |
| <p>Evaporador de ebulição com tubo de vapor</p>  | <p>É praticamente o mesmo conceito do evaporador de ebulição de água, entretanto os gases de exaustão aquecidos são borbulhados através da água residuária para melhorar a eficiência de transferência de calor. Sólidos suspensos e dissolvidos são periodicamente removidos por drenagem do lodo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Os COV são vaporizados, gerando poluição atmosférica; ▪ Sais e ácidos atacam os materiais em aço, diminuindo a vida útil do vaso de evaporação e dos tubos de vapor; ▪ Custo extra e energia para elevar a água contendo sais até o ponto de ebulição; ▪ Risco de funcionamento a seco, resultando em fundição. |
| <p>Evaporador de ebulição com trocador de calor</p>  | <p>Um óleo aquecido dentro de uma serpentina é bombeado para outra serpentina dentro de um tanque e atua como trocador de calor em contato com o líquido. A vantagem deste sistema é que o tanque pode ser construído com material não corrosivo (polipropileno), pois não entra em contato direto com a chama. Sólidos suspensos e dissolvidos são periodicamente removidos por drenagem do lodo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ COV serão emitidos para a atmosfera; ▪ Corrosão da serpentina em contato com o líquido; ▪ Custo extra e energia para elevar a água contendo sais até o ponto de ebulição. |
| <p>Evaporador de ebulição por tubo de vapor</p>  | <p>Utiliza tubos aquecidos como fonte de calor. A chama é direcionada para dentro do tubo de aço. Com o tempo o tubo enfraquecerá, entretanto, pode ser facilmente substituído, tendo um custo mais acessível que a substituição do tanque. Sólidos suspensos e dissolvidos são periodicamente removidos por drenagem do lodo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ COV serão emitidos para a atmosfera; ▪ Sais e ácidos atacam os materiais em aço; ▪ Baixa durabilidade do tubo; ▪ Custo extra e energia para elevar a água contendo sais até o ponto de ebulição; ▪ Custo extra de energia para superar o isolamento causado pela deposição dos sólidos e sais; ▪ Risco de funcionamento a seco, resultando em fundição. |

Fonte: Fink (2002).

Pequisas desenvolvidas em âmbito nacional

No Brasil, as pesquisas no âmbito da evaporação de lixiviados ainda são incipientes. A primeira pesquisa sobre o tema foi publicada por Segato (2001), que realizou uma investigação teórica da quantidade de energia necessária para evaporação do lixiviado gerado no aterro sanitário de Bauru, São Paulo. O estudo incluiu uma estimativa teórica de geração de biogás ao longo da vida útil do aterro, bem como o levantamento da geração média de lixiviado e os cálculos da energia necessária para sua vaporização. O estudo em questão analisou três cenários de energia disponíveis para evaporação do lixiviado, em função da possibilidade de captação do gás. Outro estudo relevante no âmbito do tratamento de lixiviado por evaporação foi desenvolvido por Vignoli (2007), o qual avaliou o processo de evaporação de lixiviado em bancada. O autor constatou que este sistema, isoladamente, não pode ser considerado como uma forma plena de tratamento, pois se não houver controle do processo, haverá transferência de poluição para o compartimento atmosférico.

A evaporação natural de lixiviado com uso de painéis evaporativos foi pesquisada por Ranzi (2009) em um evaporador em escala piloto na região sul do Brasil. O painel evaporativo foi composto por uma placa alveolar em polipropileno, com elevada área específica ($200 \text{ m}^2/\text{m}^3$). O painel foi instalado transversalmente ao sentido predominante do vento – no caso de Florianópolis, Nordeste (NE) – e, inclinada sobre sua base a um ângulo de 60° com a horizontal. Devido à inclinação, o painel desenvolve uma área de aproximadamente 200 m^2 de exposição ao ar e ocupa uma área projetada ao solo de cerca de 2 m^2 . A inclinação de 60° é o valor indicado nos estudos realizados por Bondon et al. (1994) e Duarte e Neto (1996) como ideal tanto para a percolação do líquido na placa quanto para que a componente vetorial do vento atinja toda a superfície do painel. A Figura 1 ilustra o sistema de evaporação descrito.

Figura 1: Sistema piloto de evaporação natural de lixiviado (com painel evaporativo).



Fonte: Ranzi (2009).

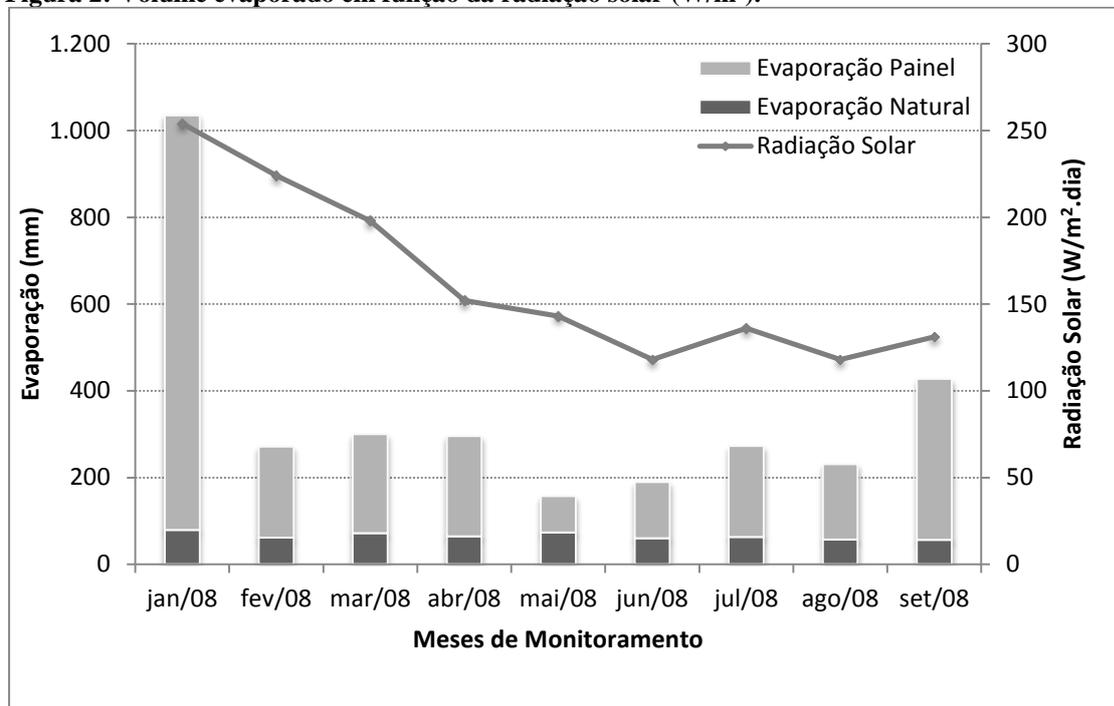
Após monitoramento do experimento piloto por nove meses, Ranzi (2009) constatou que a técnica de evaporação natural com painéis evaporativos se mostrou eficiente, mesmo tendo sido implementada em uma região com elevados índices pluviométricos e de umidade relativa do ar. A taxa média de eliminação de efluente foi de 111 L/dia. Considerando-se o volume acumulado de lixiviado evaporado no período, em média 82 % do volume evaporado foi atribuído ao painel de evaporação e apenas 18 % à evaporação natural (Tabela 1). No entanto, a contribuição da evaporação natural e do painel no sistema não foram constantes ao longo do período. Nos meses com temperatura máxima do ar e intensa radiação solar, o painel teve uma contribuição maior. Em contrapartida, nos meses onde a condição climática foi menos favorável, a evaporação do painel teve uma taxa de evaporação semelhante à evaporação natural (Figuras 2 a 5).

Tabela 1: Percentual de lixiviado eliminado no sistema piloto por evaporação natural com uso de painéis evaporativos.

| Meses / Ano | Operação | Precipitação | Evaporação | | | Contribuição | |
|------------------|------------|--------------|------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | | | Natural | Painel | Total | Evap. Natural | Evap. Painel |
| | (dias) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (%) | (%) |
| Janeiro - 2008 | 30 | 147,0 | 78,9 | 955,5 | 1.034,4 | 8 | 92 |
| Fevereiro - 2008 | 22 | 88,4 | 61,1 | 210,2 | 271,3 | 23 | 77 |
| Março - 2008 | 26 | 128,5 | 71,3 | 228,5 | 299,8 | 24 | 76 |
| Abril - 2008 | 30 | 67,7 | 64,1 | 231,3 | 295,4 | 22 | 78 |
| Maio - 2008 | 31 | 8,8 | 73,1 | 83,8 | 156,9 | 47 | 53 |
| Junho - 2008 | 30 | 88,8 | 59,9 | 129,8 | 189,7 | 32 | 68 |
| Julho - 2008 | 31 | 12,2 | 62,7 | 209,5 | 272,2 | 23 | 77 |
| Agosto - 2008 | 31 | 64,0 | 56,8 | 173,6 | 230,4 | 25 | 75 |
| Setembro - 2008 | 26 | 149,2 | 56,3 | 370,7 | 427 | 13 | 87 |
| Total | 257 | 755 | 584 | 2.593 | 3.177 | 18 | 82 |

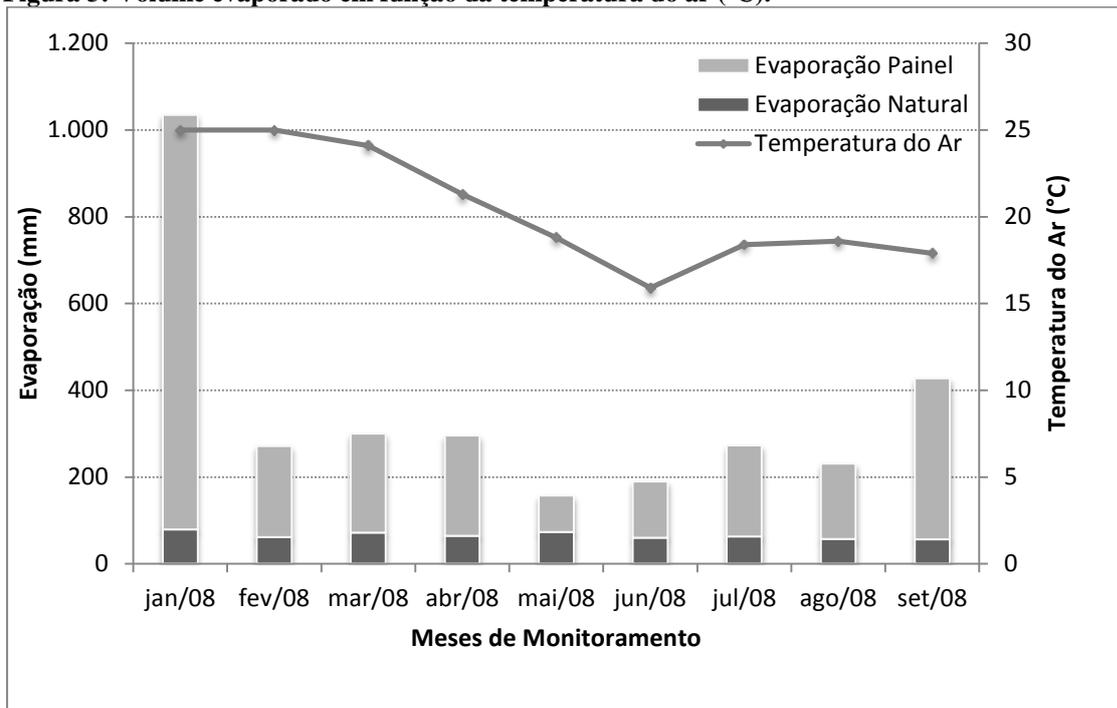
Fonte: Ranzi (2009).

Figura 2: Volume evaporado em função da radiação solar (W/m^2).



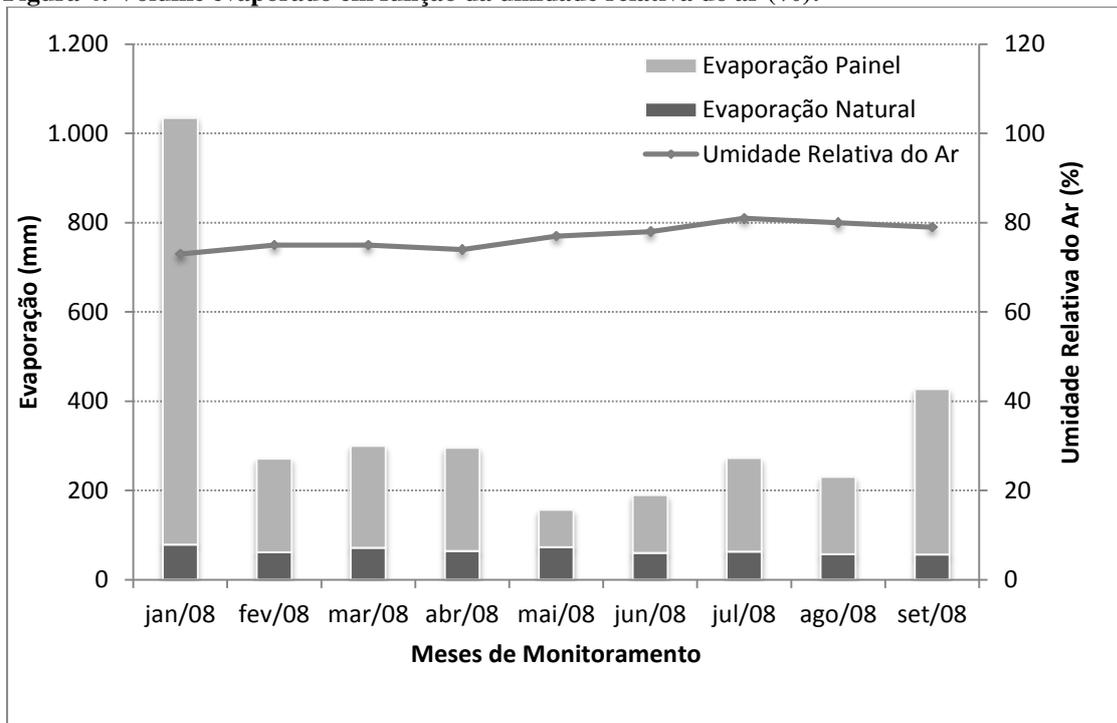
Fonte: Ranzi (2009).

Figura 3: Volume evaporado em função da temperatura do ar (°C).



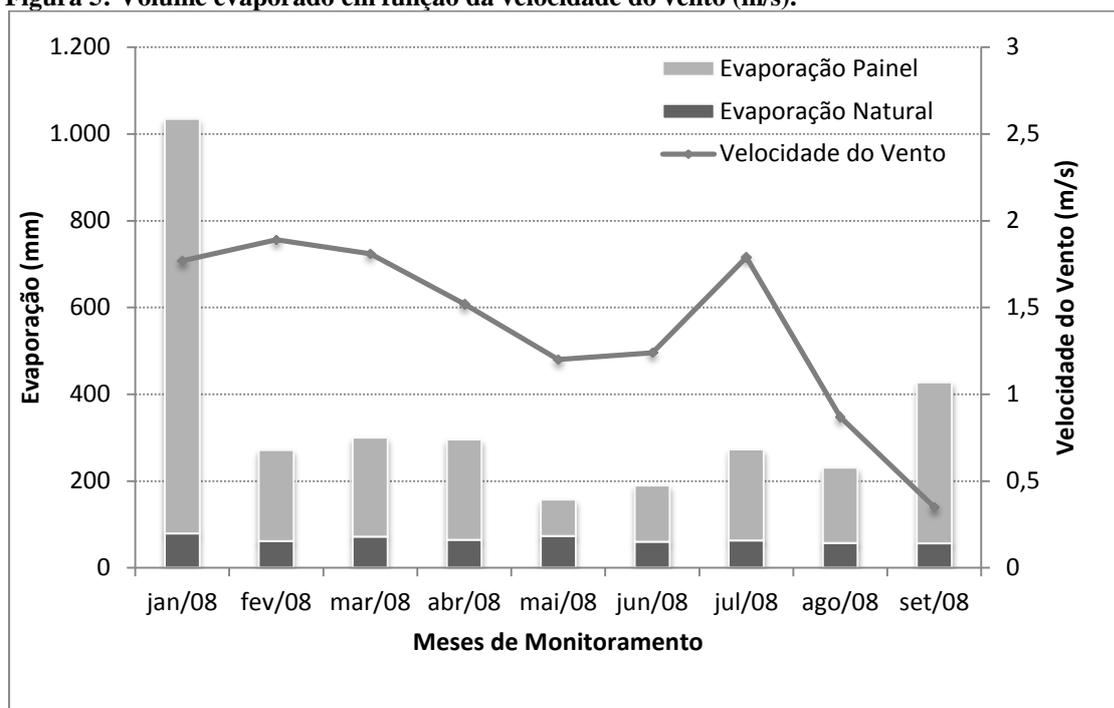
Fonte: Ranzi (2009).

Figura 4: Volume evaporado em função da umidade relativa do ar (%).



Fonte: Ranzi (2009).

Figura 5: Volume evaporado em função da velocidade do vento (m/s).

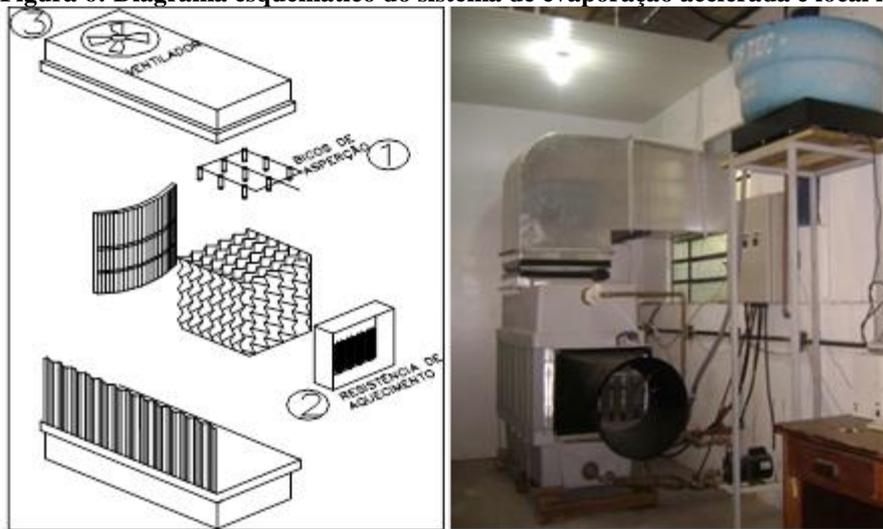


Fonte: Ranzi (2009).

Neste estudo, Ranzi (2009) constatou que a recirculação constante do efluente no sistema reduziu consideravelmente a carga orgânica e inorgânica presente no lixiviado bruto. Assim, a hipótese inicial de que o concentrado resultante do processo de evaporação seria mais poluente do que o lixiviado bruto não se confirmou. Da mesma forma, os testes toxicológicos realizados nos dois efluentes indicaram a elevada toxicidade do lixiviado bruto e a baixa toxicidade do concentrado. Tendo em vista que o sistema de tratamento proposto por Ranzi (2009) possuía um grupo de aspersores, análises microbiológicas foram realizadas com o objetivo de avaliar a possível contaminação do ar por microrganismos transportados pelos aerossóis formados. Os resultados dessas análises indicaram que a dispersão de microrganismos no ar foi significativa até um raio de 3 m ao redor do experimento, diminuindo consideravelmente conforme esta distância era aumentada. A uma distância de 15 m do perímetro do piloto experimental a presença de unidades formadoras de colônias (UFC) foi similar àquelas dos locais que não se encontram sob a influência do sistema.

Fenelon (2011) analisou a eficiência do processo de evaporação de lixiviado em um experimento piloto de evaporação forçada. A unidade experimental foi construída a partir de uma torre de resfriamento utilizada na indústria de trocadores de calor, a qual foi adaptada para trabalhar como um evaporador de contato direto. Um diagrama esquemático dos componentes do sistema de evaporação pode ser visualizado na Figura 6. O sistema foi composto, basicamente, por quatro componentes, sendo que na estrutura superior localizava-se o (1) ventilador de exaustão dos vapores, logo abaixo ficava o (2) sistema de distribuição de lixiviado (aspersores), na estrutura central encontrava-se (3) o painel de evaporação disposto transversalmente e, (4) na estrutura inferior, localizava-se o reservatório de recirculação. Para proporcionar uma superfície de contato entre ar e líquido foi instalado um painel evaporativo composto por duas placas alveolares em polipropileno, da marca HD®, com área específica de $27 \text{ m}^2/\text{m}^3$. A fim de aumentar a área de superfície de contato, foram entrelaçados, entre as placas, telas do mesmo material, até que o painel evaporativo atingisse uma área superficial de $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Na entrada de ar foi acoplado um duto lateral em alumínio flangeado, dotado de duas peças de resistência de aquecimento, de 3.000 W cada, de 220 V, as quais permitiram simular diferentes temperaturas no sistema de evaporação. Além da temperatura, o sistema também foi adaptado para ajustar a velocidade do ar de entrada experimental. Portanto, a eficiência de evaporação foi avaliada em função destes dois parâmetros operacionais.

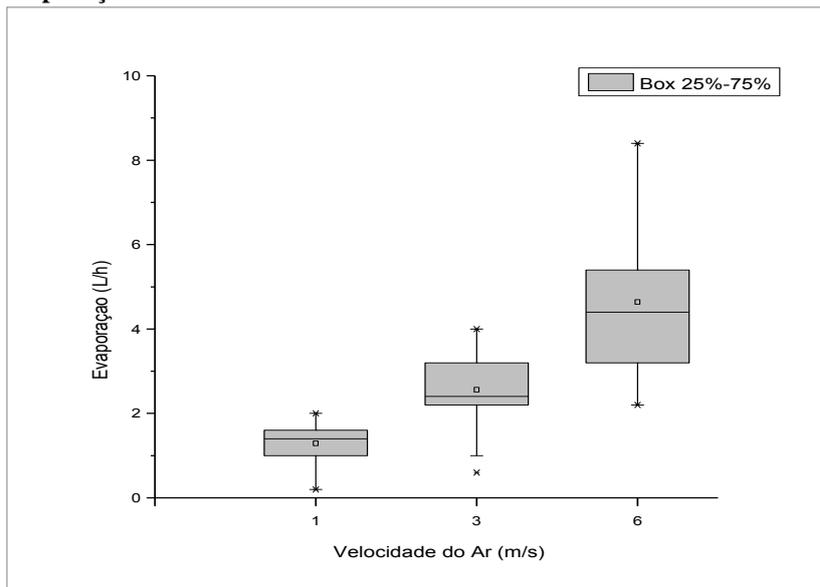
Figura 6: Diagrama esquemático do sistema de evaporação acelerada e local instalação.



Fonte: Fenelon (2011).

Fenelon (2011) testou a capacidade de evaporação do sistema piloto, utilizando a água como líquido a ser evaporado. Nesta etapa dos experimentos foram avaliadas três diferentes temperaturas no interior do sistema, sendo elas 30, 35 e 40 °C, além de três diferentes velocidades de ar: 1,0, 3,0 e 6,0 m/s. Os resultados desta etapa indicaram que a velocidade do ar de entrada (Figura 7) e a umidade relativa do ar foram as duas variáveis que mais influenciaram no rendimento global do sistema.

Figura 7: Evaporação da água (L/h) em função da velocidade do ar (m/s) aplicada ao sistema de evaporação acelerada.



Fonte: Fenelon (2011).

A análise estatística de correlação não paramétrica de Kendall-Tau foi realizada para verificar a intensidade da influência das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar no processo evaporativo (Tabela 2). A correlação indicou que a umidade relativa do ar foi a variável que mais interferiu no rendimento do sistema, tendo esta uma correlação negativa elevada (-0,91) indicando que quanto menor for umidade relativa do ar, maior o rendimento do sistema. As variáveis de temperatura não representaram nesta etapa uma influência

significativa no rendimento do sistema. Portanto, com base nos resultados preliminares obtidos com a evaporação da água, o autor definiu os parâmetros operacionais para realização dos ensaios com lixiviado.

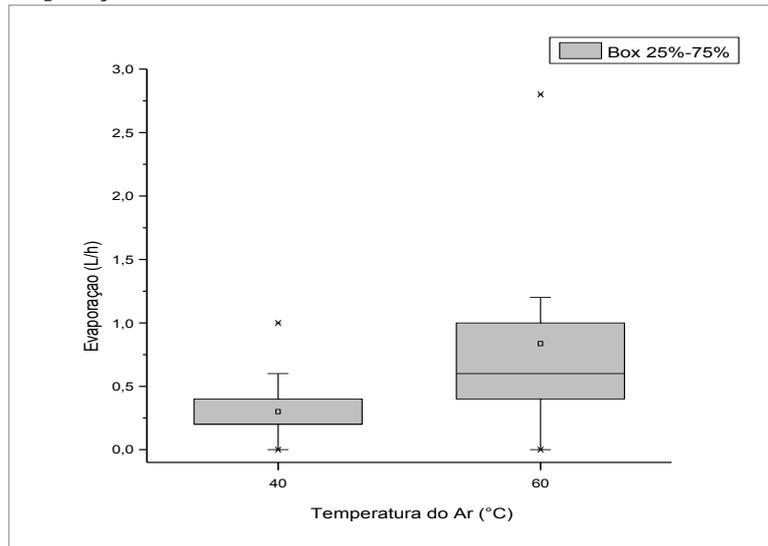
Tabela 2: Análise estatística não paramétrica (método Kendall Tau) para ensaios de evaporação realizados com água.

| Correlação Kendall Tau | Evaporação |
|--|------------------|
| Umidade Relativa do Ar (%) entrada sistema | <i>-0,916723</i> |
| Umidade Relativa do Ar (%) saída sistema | <i>-0,929309</i> |
| Temperatura (°C) na saída do sistema | -0,253491 |
| Temperatura (°C) nos aspersores | -0,455056 |
| Temperatura (°C) no painel evaporativo | -0,243127 |
| Temperatura (°C) após resistências | -0,126745 |
| Temperatura (°C) na entrada do sistema | -0,158109 |

Em itálico – correlação significativa. Fonte: Fenelon (2011).

Nos experimentos de evaporação realizados com lixiviado, foram definidas duas temperaturas de operação (40 e 60 °C) e três velocidades de entrada do ar (1,0, 3,0 e 6,0 m/s). Os resultados desta etapa indicaram que, na temperatura de 60 °C, os volumes evaporados foram superiores aos volumes evaporados na temperatura de 40 °C para a mesma velocidade do ar, de 1 m/s (Figura 8). Essa constatação reforça a influência da temperatura sobre o rendimento do sistema, o qual não ficou muito evidente nos testes preliminares realizados com água, onde a temperatura máxima aplicada foi de 40 °C.

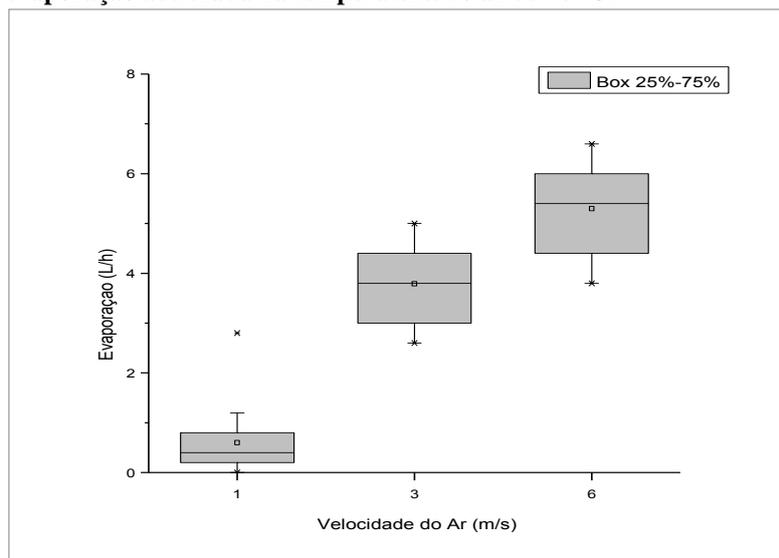
Figura 8: Evaporação de lixiviado (L/h) em função da temperatura do ar (°C) aplicada ao sistema de evaporação acelerada na velocidade do ar de 1 m/s.



Fonte: Fenelon (2011).

Quanto à variável velocidade do ar, constatou-se que quanto maior a velocidade do ar, maiores os volumes de lixiviado evaporado. Esta relação pode ser observada na Figura 9, onde na temperatura de 40 °C, obtiveram-se volumes superiores a 4,5 L/h para velocidades de 6 m/s contra valores inferiores a 1 L/h para velocidades de 1 m/s.

Figura 9: Evaporação de lixiviado (L/h) em função da velocidade do ar (m/s) aplicada ao sistema de evaporação acelerada na temperatura do ar de 40 °C.



Fonte: Fenelon (2011).

Utilizando a mesma unidade experimental empregada nos estudos de Fenelon (2011), Moratelli (2013) estudou a interferência das condições meteorológicas no processo evaporativo em sistema fechado, bem como a influência dos parâmetros operacionais em condições diversas daquelas simuladas no estudo precedente. Com o intuito de se promover uma melhor eficiência de evaporação na unidade experimental, foram instaladas mais seis peças de resistências aquecedoras, de 500 W cada, totalizando 9.000 W. Além disso, o sistema de aspersão do lixiviado foi alterado – utilizaram-se canos de PVC perfurados, a fim de evitar o entupimento dos mesmos pelos sólidos presentes no líquido percolado.

As condições operacionais avaliadas neste estudo foram as seguintes: 12 diferentes velocidades do vento (0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 e 6,0) m/s, temperaturas (T_1) variando de 26,8 a 70,3 °C (conforme velocidade do vento aplicada na unidade experimental e temperatura ambiente) e duas vazões ($Q_1 = 492$ e $Q_2 = 692$ L/h). A primeira batelada de testes foi feita com a vazão Q_1 e a segunda com a vazão Q_2 . Para cada batelada foram efetuados 12 testes de oito horas cada. A partir dos resultados dos 24 testes, foram efetuados mais 16 testes, nove com a vazão Q_1 e sete com a Q_2 , com o objetivo de repetir aqueles testes em que houve uma grande diferença no volume evaporado, utilizando diferentes vazões. Ao total, foram 40 testes de evaporação de lixiviado.

Para verificar se as condições do tempo influenciavam os parâmetros operacionais da unidade experimental foi realizada uma análise de correlação paramétrica (coeficiente “ ρ ” de Pearson), com nível de significância de 95 % ($p < 0,05$), utilizando dados das condições meteorológicas e os dados obtidos a partir do monitoramento da unidade piloto. Os valores obtidos estão expressos na Tabela 3.

Foi possível verificar, através da análise, quais condições climáticas influenciavam os parâmetros operacionais. As temperaturas mínima e máxima e a radiação solar apresentaram forte correlação ($\rho \geq 0,8$) com a T_{entrada} . Isto quer dizer que a temperatura ambiente (mínima e máxima) e a radiação solar influenciam fortemente a temperatura na entrada da unidade experimental e que, quanto maiores as temperaturas e a intensidade solar, maior a temperatura na unidade piloto. A radiação solar e as umidades relativas do ar na entrada e na saída da unidade experimental apresentaram uma correlação moderada ($0,5 \leq \rho < 0,8$), sendo que, quanto maior a intensidade da radiação do sol, menores as umidades relativas. Baixa correlação ($0,1 \leq \rho < 0,5$) foi verificada entre a velocidade do vento ambiente com a T_{entrada} e a velocidade do vento na unidade experimental. Não houve correlação significativa entre as condições climáticas e os parâmetros operacionais T_1 e vazão. No que diz respeito à vazão, pode-se afirmar que a mesma não tem relação com nenhum outro parâmetro operacional, isto é, é um parâmetro independente.

Tabela 3: Correlação entre parâmetros operacionais e condições meteorológicas.

| | Temperatura mínima | Temperatura máxima | Velocidade do vento | Precipitação | Radiação | Umidade relativa |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------|------------------|
| T_{entrada} | <i>0,839</i> | <i>0,841</i> | <i>0,343</i> | <i>-0,514</i> | <i>0,818</i> | <i>-0,532</i> |
| T₁ | -0,027 | -0,014 | 0,312 | -0,144 | 0,246 | -0,239 |
| T₂ | <i>0,404</i> | <i>0,421</i> | 0,012 | -0,263 | <i>0,454</i> | -0,291 |
| T_{saída} | <i>0,530</i> | <i>0,543</i> | 0,258 | <i>-0,391</i> | <i>0,601</i> | <i>-0,404</i> |
| UR_{entrada} | -0,193 | -0,219 | -0,222 | <i>0,427</i> | <i>-0,511</i> | <i>0,536</i> |
| UR_{saída} | -0,227 | -0,250 | -0,253 | <i>0,407</i> | <i>-0,557</i> | <i>0,575</i> |
| Vento | 0,007 | -0,012 | -0,392 | 0,035 | -0,222 | 0,193 |
| Vazão | -0,039 | -0,038 | 0,100 | 0,206 | -0,046 | -0,131 |

Valores destacados em itálico: correlação significativa. Valores não destacados: correlação não significativa. T_{entrada} e UR_{entrada} = duto de entrada de ar, T₁ = após as resistências elétricas, T₂ = no painel evaporativo, T_{saída} e UR_{saída} = duto de saída de ar.

Para verificar quais parâmetros operacionais influenciavam na eficiência de evaporação, também foi efetuada uma análise de correlação paramétrica, relacionando os mesmos com a evaporação obtida em cada teste. O nível de significância utilizado foi de 95 % ($p < 0,05$). Os resultados da análise estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Correlação entre parâmetros operacionais e a eficiência de evaporação.

| | T ₁ | T ₂ | T _{saída} | UR _{entrada} | UR _{saída} | Velocidade do vento | Vazão | Evaporação |
|-----------------------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------|---------------|
| T_{entrada} | <i>0,338</i> | <i>0,625</i> | <i>0,809</i> | <i>-0,487</i> | <i>-0,526</i> | -0,287 | 0,003 | -0,081 |
| T₁ | - | <i>0,641</i> | <i>0,749</i> | <i>-0,480</i> | <i>-0,562</i> | <i>-0,911</i> | 0,025 | -0,276 |
| T₂ | - | - | <i>0,901</i> | <i>-0,533</i> | <i>-0,651</i> | <i>-0,582</i> | -0,151 | <i>-0,364</i> |
| T_{saída} | - | - | - | <i>-0,593</i> | <i>-0,697</i> | <i>-0,681</i> | -0,126 | -0,288 |
| UR_{entrada} | - | - | - | - | <i>0,913</i> | <i>0,407</i> | 0,146 | <i>0,412</i> |
| UR_{saída} | - | - | - | - | - | <i>0,532</i> | 0,236 | <i>0,497</i> |
| Vento | - | - | - | - | - | - | 0,073 | <i>0,384</i> |
| Vazão | - | - | - | - | - | - | - | <i>0,405</i> |

Valores destacados em itálico: correlação significativa. Valores não destacados: correlação não significativa.

Todos os parâmetros referentes à “temperatura” e à “umidade relativa” tiveram influência um sobre o outro, em maior ou menor grau. Analisando-se a T₁ pode-se verificar que, quanto maior a temperatura proporcionada pelas resistências elétricas, maiores as temperaturas na unidade experimental, sendo mais afetada a temperatura de saída, com $\rho = 0,809$ (forte correlação). Por outro lado, quanto maior T₁, menores as umidades relativas de entrada e de saída na unidade piloto. A T₁ foi fortemente influenciada pela velocidade do vento aplicada no sistema ($\rho = 0,913$), fato este verificado no início dos testes evaporativos. A vazão e os demais parâmetros operacionais não demonstraram correlação significativa, a um nível de 95 %.

A eficiência de evaporação foi influenciada pela T₂, pela umidade relativa de entrada e de saída, pela vazão e pelo vento. A maior correlação foi dada pela umidade relativa de saída ($\rho = 0,497$), seguida da umidade relativa de entrada ($\rho = 0,412$) e da vazão ($\rho = 0,405$). Pela análise estatística, a T₁ não influenciava no processo evaporativo.

Deste modo, observou-se que, no geral, as condições do tempo têm influência sobre o processo evaporativo, em maior ou menor grau, dependendo das variáveis, pois pela análise estatística realizada entre os dados meteorológicos e os parâmetros operacionais obtiveram-se coeficientes significativos de correlação. Com relação às eficiências de evaporação obtidas, verificou-se que, pelos parâmetros passíveis de ajuste na unidade experimental, as mesmas são afetadas pela vazão e pela velocidade do vento.

CONCLUSÃO

Os estudos realizados até o momento indicam que a escolha do tipo de evaporador a ser empregado deve levar em consideração as características do lixiviado a ser evaporado. Lixiviados com elevadas concentrações de cloretos e baixo pH podem intensificar as taxas de corrosão dos materiais. O emprego de evaporadores do tipo

filme e ebulição, os quais possuem tubos ou pratos de metais finos, podem ser considerados inadequados para evaporar lixiviados com elevada concentração de sólidos, devido ao potencial de deposição de materiais (incrustações) na superfície do metal, resultando na perda da eficiência de transferência de calor. Por outro lado, os evaporadores de contato direto têm a vantagem de evitar a ebulição do lixiviado na superfície aquecida e, por consequência, estão menos sujeitos a problemas de corrosão e incrustações. Uma desvantagem, porém, desse sistema é a mistura dos poluentes presentes nos dois fluxos (ar e lixiviado), exigindo o tratamento de um grande fluxo de ar.

Com respeito à poluição atmosférica, os pesquisadores destacam a importância de monitorar as concentrações de amônia, compostos orgânicos voláteis e metais nos efluentes gasosos dos sistemas de evaporação de lixiviado. O ajuste de pH no lixiviado, antes de ser submetido ao processo de evaporação foi indicado por alguns pesquisadores como um mecanismo eficiente de controle de emissões atmosféricas para compostos orgânicos voláteis e amônia, porém dependendo das características do lixiviado este ajuste pode tornar-se impraticável devido ao elevado custo.

Os resultados das pesquisas realizadas por Ranzi (2009) e Fenelon (2011) demonstraram em caráter preliminar a possibilidade da aplicação e aperfeiçoamento desta tecnologia utilizando-se, sobretudo, de fontes de energias renováveis, tais como energia solar, dos ventos e o próprio biogás, no caso da evaporação forçada. Embora em termos técnicos, a viabilidade do processo de evaporação tenha se apresentado como uma alternativa viável, ainda há necessidade de avançar no entendimento dos aspectos ambientais relativos às emissões atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BIRCHLER, D. R.; MILKE, M. W.; MARKS, A. L.; LUTHY, R. G. Landfill leachate treatment by evaporation. *Journal of environmental engineering*, v. 120, n. 5, p. 1109-1131, 1994.
2. BONDON, D., CRABOS, J. L., PIETRASANTA, Y., SAMBUCCO, J. P. Traitment des rejets vinicoles par un procédé innovant: «l'Evaporation forcée». In: *Congrès international sur le traitement des effluents vinicoles: Actes du Colloque*, 1994. CEMAGREF.
3. DI PALMA, L.; FERRANTELLI, P.; MERLI, C.; PETRUCCI, E. Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis. *Waste Management*, v. 22, n. 8, p. 951-955, 2002.
4. DUARTE, E. A., NETO, I. Evaporation phenomenon as a waste management technology. *Water science technology*, v.33, n. 8, p. 53-61. Elsevier Science Ltd., 1996.
5. EISNER, P.; LEONHARD, K.; WILDERER, P. A. Landfill leachate treatment by evaporation. *Journal of environmental engineering*, v. 22, n. 2, p. 163-164, 1996.
6. EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of environmental management*, v. 50, n. 1, p. 1-25, 1997.
7. FENELON, F. R. Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural em sistema controlado: estudo em escala piloto. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 2011.
8. FINK, R. G.; HART, J. Wastewater evaporation 101. *Pollution engineering*, v. 33 n. 8, Sep. 2001, p.15-17. 2001.
9. FINK, R. G. Wastewater treatment by evaporation. *Environmental science & engineering*, May 2002, p.5, 2002.
10. GIRALDO, E. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de ingeniería, Universidad de Los Andes*, v. 14, p. 44-55, 2001.
11. GIUST, E.; VISINTIN, D.; DEL PICCOLO. A combination of cogeneration, evaporation and membrane technique for landfill leachate treatment. In: *Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2007.
12. HERCULE, S.; TARAMINI, V. SAMAT, P.; GIUST, E.; BIQUILLON, R. Cogeneration and evaporation: an example of leachate treatment. In: *Tenth international waste management and landfill symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2005.

13. KJELDSEN, P.; BARLAZ, M.A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of municipal solid leachate. *Critical reviews in environmental science and technology*, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.
14. LEE, H. C.; KANG, G.; LEE, Y. P.; HAN, H. S. and STEVENS, D. K. Development of an advanced evaporation system with fouling-free technology using a circulating fluidized bed heat exchanger. *Environmental engineering science*, v. 20, n. 4, p. 319-327, 2003.
15. LEMA, J. M.; MENDEZ, R.; BLAZQUEZ, R. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water air soil pollution*, v. 40, p. 223-250, 1988.
16. MARKS, A. L.; LUTHY, R. G.; DIWEKAR, U. M. Semi-continuous evaporation model for leachate treatment process evaluation. *Environmental progress*, v. 13, n. 4, p. 278-289, 1994.
17. MORATELLI, L. Estudo da evaporação como tecnologia aplicada ao pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. (Em andamento).
18. NEMEROW, N. L. *Industrial waste treatment: contemporary practice and vision for the future*. Ed. Elsevier Science & Technology Books. October, 2006.
19. ÖMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. Chemical characterization of landfill leachates - 400 parameters and compounds. *Waste management & research*, v. 28, n. 10, p. 1876-1891, 2008.
20. RANZI, B. D. Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural com painéis - estudo em escala piloto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
21. REHMAN, A. Landfill leachate treatment using evaporation technology. 235 f. Thesis of master in environmental engineering. Carleton University, Ottawa, Ontario, 2003.
22. RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, v. 150, n. 3, p. 468-493, 2008.
23. RIBEIRO JR., C. P. Desenvolvimento de um processo combinado de evaporação por contato direto e permeação de vapor para tratamento de sucos de fruta. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
24. SANTOS, H. A. P. dos. Recuperação da amônia removida por processo de air stripping aplicado ao tratamento de lixiviados de aterro sanitário: estudo em escala piloto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
25. SEGATO, L. M. Tratamento de líquidos percolados por processo de evaporação através do aproveitamento de gás de aterros sanitários. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de engenharia da UNESP, São Paulo, 2001.
26. TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade, Edusp, ABRH, 1993.
27. VIGNOLI, C. N. Avaliação da minimização das emissões de amônia no processo de tratamento de chorume por evaporação. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
28. WANG, L. K., SHAMMAS, N. K.; WILIFORD, C.; CHEN, W-Y.; SAKELLAROPOULOS, G. P. Evaporation Processes. In: *Handbook of environmental engineering, volume 4: Advanced Physicochemical Treatment Process*. Edited by: WANG, L. K.; HUNG, Y.-T. and SHAMMAS, N. K. Ed. The Humana Press Inc. Totowa, NJ, p. 549-579, 2006
29. XU, Y-D.; YUE, D-B.; ZHU, Y.; NIE, Y-F. Fractionation of dissolved organic matter in mature landfill leachate and its recycling by ultrafiltration and evaporation combined processes. *Chemosphere*, v. 64, n. 6, p. 903-911, 2006.
30. YUE, D.; XU, Y.; MAHAR, R. B.; LIU, F.; NIE, Y. Laboratory-scale experiments applied to the design of a two-stage submerged combustion evaporation system. *Waste management & research*, v. 27, n. 5, p. 704-710. 2007.