

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AUMENTO DA TAXA DE EVAPORAÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA GESTÃO DE EFLUENTES NA MINERAÇÃO: PROJETO PILOTO DE LAGOA DE EVAPORAÇÃO NA MINA CHAPADA

Camila Billerbeck¹; Anderson Gomes da Silva²; Aloysio Portugal Maia Saliba³; Julio Alves da Silva Neto⁴; Isabelle Fonseca⁵; & Lucas Salles⁶.

Abstract: Water management is one of the main challenges in the mining sector, as both water scarcity and excess can jeopardize operational sustainability and safety. While water shortage may constrain production and heighten competition for resources, the accumulation of effluents, if not correctly managed, poses environmental and regulatory risks. In this context, the present study proposes a simple and strategic solution to deal with excess effluents by enhancing evaporation as a volumetric control mechanism, contributing to the site's water balance. The concept is based on an evaporation pond lined with black geomembrane, aiming to raise water temperature through solar absorption and thereby increase evaporation rates. The proposal is theoretical and will be tested in the field at Chapada Mine, located in Alto Horizonte (GO), and operated by Lundin Mining. Theoretical estimates of evaporation enhancement were made using simplified heat balance calculations and the Penman method. Two scenarios were considered: one assuming water temperature equal to ambient air temperature, and another based on the elevated temperatures achieved by the solar-heated liner. Results indicate a theoretical average increase in evaporation of approximately 28%.

Keywords – *Evaporation pond; Evaporation; Water management.*

Resumo: A gestão de águas é um dos principais desafios da mineração, pois tanto a escassez quanto o excesso podem comprometer a sustentabilidade e continuidade do negócio. A carência hídrica pode limitar processos produtivos e aumentar conflitos pelo uso da água, enquanto o acúmulo de efluentes, se não adequadamente manejado, representa risco ambiental à conformidade regulatória e pode diminuir a oferta de minério. Nesse contexto, o presente estudo busca apresentar uma solução estratégica simples para lidar com o excesso de efluentes, ao propor mecanismos que potencializam a evaporação como forma de controle volumétrico, contribuindo para o equilíbrio do balanço hídrico da unidade mineradora. A proposta baseia-se em uma lagoa de evaporação revestida por geomembrana de PEAD preta, visando aumentar a temperatura da lâmina d'água por meio da absorção solar, elevando assim os níveis de evaporação. A proposta é teórica e será testada em campo, na Mina Chapada em Alto Horizonte (GO), operada pela Lundin Mining. A estimativa teórica de aumento da taxa de evaporação foi feita com base em balanço térmico simplificado associado à metodologia de Penman. Foram considerados dois cenários: um com temperatura da água igual à do ar e outro considerando a temperatura alcançada pelo revestimento. Os resultados indicam um potencial teórico de aumento médio de 28% na evaporação.

Palavras-Chave – *Bacia de evaporação; Evaporação; Gestão hídrica.*

1) MSc. em Recursos Hídricos (EP-USP) e Engenheira Civil da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos (camilabillerbeck@gmail.com),

2) MSc. em Recursos Hídricos (UFMG) e Engenheiro Civil da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos (agsilva@tec3engenharia.com.br);

3) Doutor em Recursos Hídricos (UFMG) e Sócio-diretor da TEC3 Geotecnica e Recursos Hídricos (asaliba@tec3engenharia.com.br);

4) Geólogo de Recursos Hídricos da Lundin Mining (julio.neto@lundinmining.com);

5) Engenharia de Sustentabilidade da Lundin Mining (isabelle.fonseca@lundinmining.com);

6) MSc em Hidrogeologia e Gerente de Recursos Hídricos da Lundin Mining (lucas.salles@lundinmining.com).

1. INTRODUÇÃO

A gestão de águas no setor da mineração é um desafio recorrente e complexo, marcado por condições operacionais variáveis, pressões regulatórias crescentes e a necessidade constante de mitigar impactos ambientais e operacionais. A atividade minerária depende da disponibilidade hídrica para diversos processos como lavra, beneficiamento, controle de poluentes e de poeira. Ao mesmo tempo, tem potencial de gerar volumes expressivos de efluentes que demandam manejo adequado. Conciliar o uso eficiente da água com a contenção de excedentes é fundamental para garantir a continuidade das operações e a sustentabilidade ambiental das unidades mineradoras (Giurco & Cooper, 2012). Nesse contexto, o desenvolvimento de alternativas que favoreçam o equilíbrio do balanço hídrico é essencial para a operacionalidade do setor da mineração.

Esse estudo apresenta uma proposta para o controle do excesso de água em um empreendimento da Lundin Mining, Brasil, localizado no município de Alto Horizonte (GO). O balanço do empreendimento busca a não emissão de efluentes para o meio ambiente, evitando que ocorram vertimentos. Uma das formas de minimizar o potencial de vertimentos é por meio de estratégias que busquem maximizar a evaporação nos reservatórios da unidade ou em estruturas concebidas para esse fim. Embora a operação conte com evaporadores, equipamentos que auxiliam o processo de evaporação, foi identificada a necessidade de avaliar soluções complementares que possam ampliar essa capacidade de forma eficiente e integrada ao sistema existente.

Com base em dados climáticos locais e em uma modelagem hidrotérmica simplificada, foi desenvolvido um projeto piloto de uma lagoa de evaporação, concebido para maximizar a taxa de evaporação, aproveitando as condições naturais do sítio, cem especial, a alta incidência de radiação solar. Esse projeto piloto foi desenvolvido utilizando apenas equipamentos e materiais já disponíveis na operação, priorizando soluções simples e de fácil implementação. Atualmente, encontra-se em fase de detalhamento executivo para futura implantação e avaliação de desempenho, com o objetivo de verificar sua viabilidade para aplicação em escala ampliada.

A solução conceitual resultou em uma lagoa de evaporação que foi desenhada para intensificar a perda de água por evaporação a partir de um escoamento contínuo de uma lâmina d'água rasa sobre superfície revestida com geomembrana preta, o que favorece o aumento da temperatura da água e, consequentemente, da taxa de evaporação. Uma vez implantado, o objetivo será avaliar o potencial dessa abordagem como alternativa complementar para a gestão hídrica, promovendo benefícios operacionais e ambientais por meio de técnicas de fácil simples.

2. METODOLOGIA

A evaporação é o principal processo natural de perda de água armazenada em reservatórios, sendo considerado um dos principais “usuários” de água doce (Assouline et al., 2011). Esse processo consiste na conversão da água em estado líquido para estado de vapor, para isso, é necessária uma quantidade de energia suficiente para alterar o estado da água. No meio natural, essa energia provém da radiação solar (Allen et al., 2007).

A partir do princípio da continuidade, é possível quantificar o balanço volumétrico em um lago impermeável a partir da relação expressa na Equação 1.

$$\frac{dv}{dt} = Vol_{i+1} - Vol_i = P_i + Qe_i - Qs_i - E_i \quad (1)$$

Em que Vol_{i+1} expressa o volume armazenado no intervalo de tempo $i+1$ (m^3); Vol_i expressa o volume armazenado no intervalo de tempo i (m^3); P_i representa a chuva direta sobre a superfície do

lago do reservatório (m^3); Qe_i é a vazão afluente ao reservatório (m^3); Qs_i é a vazão de saída do reservatório (m^3), e E_i expressa o volume evaporado da superfície do lago no intervalo de tempo i (m^3).

Conceitualmente, em um lago isolado e com armazenamento limitado, a diferença entre as vazões de entrada e de saída estão associadas à evaporação direta sobre a sua superfície. Portanto, esse projeto piloto tem como objetivo maximizar essa perda por meio de estratégias que atuem sobre essa variável. Os principais fatores que influenciam a taxa de evaporação são:

- *Temperatura*: quanto maior a temperatura, maior a taxa de evaporação. As moléculas de água se movem mais rapidamente em temperaturas mais altas, facilitando a transição para o estado gasoso;
- *Umidade Relativa*: relação inversamente proporcional, em ambientes com baixa umidade, a evaporação ocorre mais rapidamente porque o ar pode "reabastecer" com vapor de água, enquanto um ar saturado retarda o processo;
- *Velocidade do Vento*: relação diretamente proporcional, o não só transporta vapor de água longe da superfície, mas também ajuda a reduzir a camada de umidade próximo ao líquido;
- *Superfície de Contato*: relação diretamente proporcional. Quanto maior a superfície de contato entre o líquido e o ar, maior será a taxa de evaporação;
- *Radiação Solar*: relação diretamente proporcional. Quanto maior a radiação solar maior a taxa de evaporação.

Considerando as variáveis que podem ser influenciadas de forma prática para aumentar o potencial de evaporação em operações minerárias a céu aberto, a temperatura e a superfície de contato são mais suscetíveis a intervenções, em comparação com a umidade relativa, a velocidade do vento e a radiação solar. Assim, o projeto piloto foi concebido inicialmente com base na manipulação dessas variáveis mais acessíveis, buscando estratégias simples e eficazes para intensificar o processo de evaporação.

Penman introduziu em 1948 um modelo para estimativa da evaporação de uma superfície de água livre, combinando o balanço de energia (termo energético) e o transporte de massa de vapor (termo aerodinâmico) (Coelho Filho et al, 2011). Para a sua utilização são necessários dados de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e do saldo de radiação (Conceição, 2006).

O método de Penman é um método combinado que envolve considerações teóricas do método aerodinâmico e do método do balanço de energia. Sua formulação é dada pela Equação 2 (Tucci & Beltrame, 2004)

$$E_p = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) E_s + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \cdot E_a \quad (2)$$

Em que Δ o coeficiente angular da curva de pressão de saturação ($kPa \ ^\circ C^{-1}$); γ é o parâmetro psicrométrico ($kPa \ ^\circ C^{-1}$); E_a é o poder evaporante do ar ($mm \ dia^{-1}$); E_s é a componente de evaporação devido ao ciclo do aquecimento solar ($mm \ dia^{-1}$).

A fim de se obter a estimativa da variação da temperatura da superfície da lagoa de evaporação exposta à radiação solar, procedeu-se um balanço térmico simplificado por meio das equações de transferência de calor. O estudo da transferência de calor e a necessidade de avaliar, quantificar e controlar esse processo abrange a grande maioria dos sistemas e equipamentos (Garcia et. al, 2017).

O conceito proposto trata-se de uma lagoa de evaporação revestida por material com capacidade térmica mais baixa do que a da água, ou seja, que consegue ter um alto ganho de calor. Sobre esse material, pretende-se escoar um fluxo raso e com baixa velocidade a fim de que o ganho de temperatura por meio da superfície de contato possa elevar a taxa de evaporação.

Para a estimativa da taxa de evaporação na situação atual (sem o revestimento), e na situação de operação do projeto piloto (com o revestimento), foram simuladas duas condições de série de evaporação diária, utilizando-se a metodologia de Penman (1948), analisadas nos cenários a saber:

- Cenário 1: taxa evaporação estimada da superfície líquida considerando a temperatura da água igual à temperatura média do ar;
- Cenário 2: evaporação estimada da superfície líquida considerando a temperatura da água igual à temperatura alcançada pelo revestimento da lagoa de evaporação.

A metodologia de estimativa da taxa de evaporação seguiu as seguintes etapas:

- Cálculo da radiação solar incidente na região do projeto, por meio de variáveis de temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento, umidade relativa do ar que foram medidas em estações climatológicas.
- Para o cenário 2, a partir da radiação solar obteve-se a temperatura passível de ser alcançada pelo revestimento da lagoa de evaporação por meio de um balanço térmico simplificado.
- Aplicação da metodologia de Penman (1948) para obtenção da taxa direta de evaporação nos cenários 1 e 2. No cenário 1, admitiu-se a temperatura da superfície líquida igual a temperatura do ar. No cenário 2, admitiu-se como premissa que a temperatura máxima alcançada pela superfície líquida foi a do revestimento da lagoa de evaporação. Essa temperatura foi calculada mediante um balanço térmico simplificado, admitindo-se as propriedades de um material com alta absorção. Portanto, a partir dos dados de radiação solar incidente, foi possível obter a temperatura alcançada pelo material, e com ela, a nova taxa de evaporação de uma superfície líquida.

Para essa aplicação, as condições climáticas tiveram como base os dados diários da estação climatológica ITAPACI operada pelo INMET (Tabela 1), que possui dados de 2010 a 2025.

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados

Posto INMET	
Nome:	ITAPACI
Código da Estação:	A015
Latitude:	-14.979
Longitude:	-49.539
Altitude:	551
Período de dados:	2010 – 2025
Evaporação média no período:	4,92 mm

Para o projeto piloto, foi proposto um revestimento do tipo geomembrana em PEAD, na cor preta. A partir da aplicação da metodologia descrita, com dados da estação climatológica de registros diários entre janeiro de 2010 e março de 2025, foi possível estimar a evaporação diária (mm) para os Cenários 1 e 2.

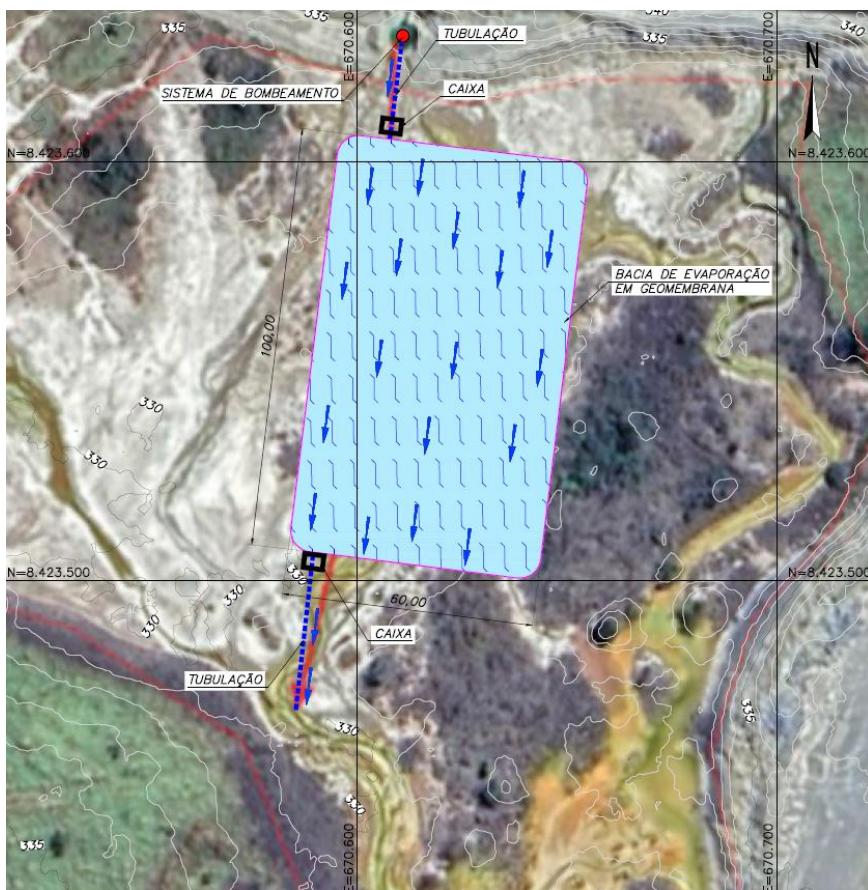
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conceito proposto trata-se de uma lagoa de evaporação revestida por geomembrana em PEAD, na cor preta, com um sistema de desvio e captação de uma parcela da drenagem superficial para a entrada da lagoa, e um sistema de coleta de água na saída, com direcionamento para a drenagem superficial existente.

O local selecionado para a implantação do projeto piloto foi discutido em conjunto com a Lundin Mining. A área em questão, trata-se de uma região a oeste da Cava Sul, próxima ao acesso. Nessa área existe uma travessia de drenagem superficial por meio de um bueiro, que é direcionada para o para uma das estruturas de contenção de sedimentos (*Sump 12*).

Para o projeto piloto da lagoa de evaporação, propõe-se desviar uma parcela da drenagem superficial da região do bueiro. A diagramação conceitual da lagoa de evaporação é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Diagramação do projeto piloto da lagoa de evaporação



A captação do escoamento superficial será feita por meio de um duto de desvio do direcionamento natural, conduzindo o fluxo para uma caixa ou dispositivo de armazenamento, no qual deve ser captado e direcionado para a lagoa de evaporação.

A lagoa de evaporação foi concebida com características hidráulicas análogas a um canal de drenagem com baixa declividade, e com uma lâmina de água rasa. A altura da lâmina de água sobre esse canal deve ser a menor possível para garantir que o fluxo tenha a sua temperatura elevada por meio da superfície de contato com o material impermeável, para maximizar o processo de evaporação. Sendo assim, a vazão de projeto foi determinada em função da profundidade desejável de escoamento

requerida para maximizar a transferência de calor da superfície para a água. Recomenda-se inicialmente que as profundidades sejam baixas, e para fins de pré-dimensionamento admitiu-se variação de profundidade entre 2 e 5 cm.

Na saída da lagoa de evaporação, o escoamento será coletado e reconduzido para o fluxo de drenagem superficial. O pré-dimensionamento hidráulico desse dispositivo foi realizado sob a hipótese de regime uniforme de escoamento, pela equação de Manning, conforme Equação 3.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

Na qual, Q é a vazão (m^3/s); n é o coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional); A é a área molhada (m^2); Rh é o raio hidráulico (m); I é a declividade longitudinal (m/m). Para o coeficiente de rugosidade foi adotado o valor igual a 0,011 referente a um revestimento liso equivalente a PEAD (PORTO, 2004). Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

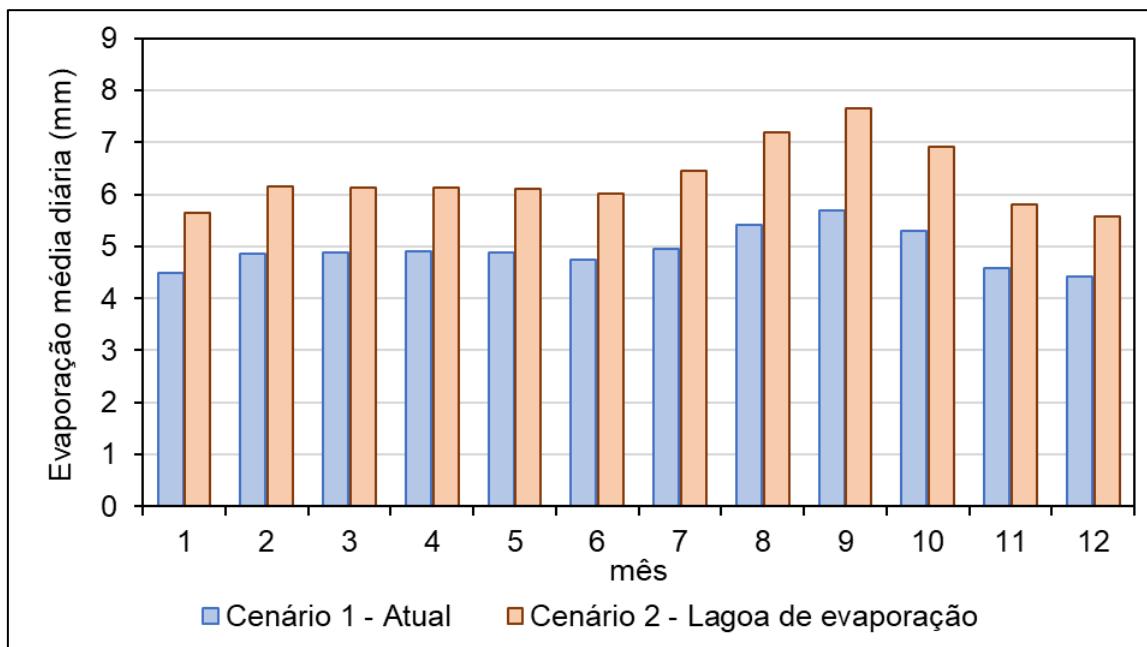
Tabela 2 – Características hidráulicas da lagoa de evaporação

Base (m)	Altura (m)	Declividade (m/m)	Profundidade (cm)	Vazão Q (L/s)	Velocidade (m/s)
21	0,1	0,0025	2	140,5	0,33
21	0,1	0,0025	5	645,7	0,61

Por se tratar de um projeto piloto, admite-se que algumas variáveis de interesse serão calibradas e avaliadas com auxílio de instrumentação. Para isso serão propostos instrumentos para leitura de vazão e volume de entrada e saída da lagoa de evaporação, e para leitura de temperatura da água.

A Figura 2 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, em termos da evaporação média diária por mês, estimada com a metodologia de Penman para os cenários.

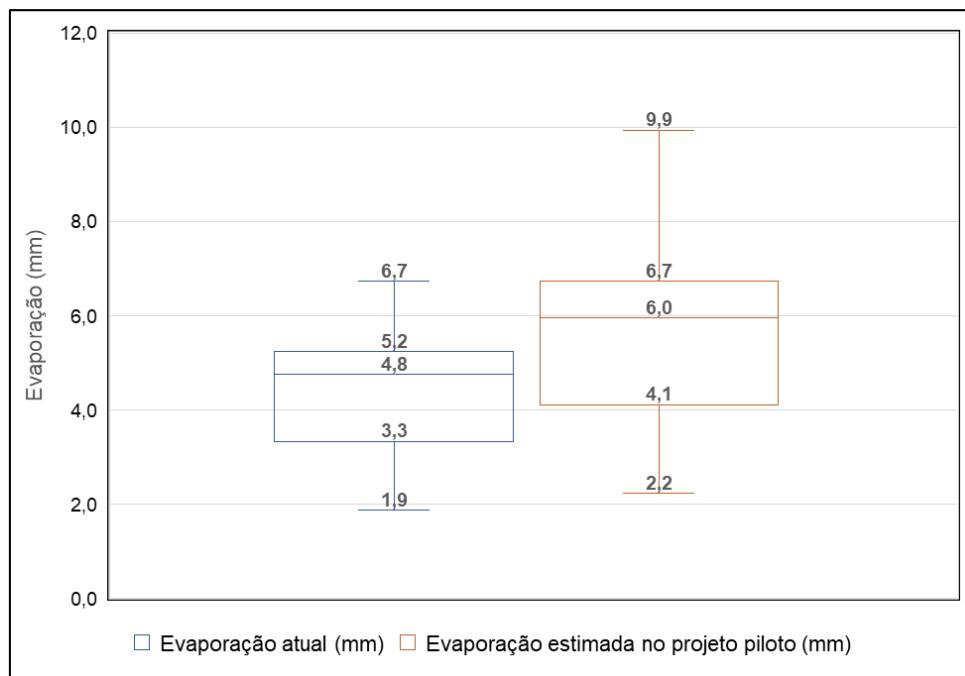
Figura 2 – Evaporação média diária por mês, com dados calculados no Cenário 1, Cenário 2



Observa-se que de acordo com as estimativas, a lagoa de evaporação revestida com um material que permite o aquecimento da água, apresenta um potencial teórico de aumento de cerca de 28% na taxa

de evaporação média em comparação com a superfície líquida na temperatura média do ar. A Figura 3 apresenta graficamente as estatísticas da série de evaporação obtida para os cenários.

Figura 3 – Estimativa de taxa de evaporação atual x do Projeto piloto da lagoa de evaporação



Importa destacar que essa estimativa realizada foi teórica, sendo que um dos objetivos do projeto piloto é investigar o impacto real na taxa de evaporação desse sistema. Além disso, em fases posteriores de projeto pode-se associar elementos adicionais às estratégias já adotadas a fim de maximizar o potencial de evaporação, como por exemplo, os evaporadores disponíveis na operação. Estes instrumentos atuam sobre a velocidade do vento, que também impacta diretamente na taxa de evaporação. Pode-se também avaliar a inclusão de fontes secundárias de aquecimento da água, de modo a garantir o ganho de temperatura do fluxo.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse estudo apresentou o conceito de uma lagoa de evaporação como estratégia para aumentar de evaporação da Mina Chapada. O conceito proposto trata-se de uma lagoa de evaporação com baixa declividade e revestida por geomembrana, com um sistema de desvio e captação de uma parcela da drenagem superficial para a entrada da lagoa, e um sistema de coleta de água na saída, com direcionamento para a drenagem superficial existente.

Para o projeto piloto, foi proposto um revestimento do tipo geomembrana em PEAD, na cor preta. As estimativas de evaporação associadas a esse material mostraram um potencial teórico de aumento de cerca de 28% na taxa de evaporação em comparação com a superfície líquida na temperatura média do ar. Importa destacar que essa estimativa teórica, será avaliada com a implantação do projeto, a fim de se investigar o impacto real na taxa de evaporação desse sistema. Além disso, em fases posteriores de projeto pode-se associar elementos adicionais às estratégias já adotadas a fim de maximizar o potencial de evaporação, como por exemplo, os evaporadores disponíveis na operação.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W (2007). *Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 395-406 p.

ASSOULINE, S. et al. (2011) “*Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers*”. Water Resources Research, 47(7).

COELHO FILHO, M. A.; PEREIRA, F. A. C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, G. X. S. (2011). “*O processo de evapotranspiração*”. In: SOUSA, V. F.; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (org.). “*Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*”. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.

CONCEIÇÃO, M. A. F. (2006). “*Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO*”. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 8 p. (Circular Técnica, 65).

GARCIA, R.L.; ZABADAL, J.; AMARAL, R.A.; DELLA GIUSTINA NETO, J.A.; SCHMITZ, A. (2017). “*Transferência de calor e massa: Fusão de uma placa de gelo*”. Revista Brasileira de Ensino de Física 39(3), e3502. Disponível em <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0280>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GIURCO, D., COOPER, C. (2012). “*Mining and sustainability: asking the right questions*”. Minerals Engineering. 29. 3-12.

PENMAN, H.L. (1948). “*Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass*”. Proceedings of the Royal Society of London 193, pp. 120–145. Disponível em <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>. Acesso em: 5 jun. 2025.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Lundin Mining pela parceria e confiança, que foram essenciais para a concepção do projeto piloto, bem como pelo fornecimento dos dados. Os autores agradecem também à TEC3 Engenharia e Recursos Hídricos pelo apoio durante a realização deste trabalho.