

## QUANTIFICAÇÃO DA EVAPORAÇÃO DE CAVAS DE MINERAÇÃO UTILIZANDO LISÍMETROS

*Manoel Camilo Moleiro Cabrera<sup>1\*</sup> & Cristian Youlton<sup>2</sup> & Edson Wendland<sup>3</sup>*

**Resumo** – Dois lisímetros e um tanque de evaporação com nível constante foram construídos para determinar a perda de água devido a mudança de cobertura do solo, ocasionada por cavas de mineração. Um lisímetro foi preenchido com solo arenoso e o outro com solo argiloso. Para estudar as condições de evaporação no local dos lisímetros, foram coletados dados evaporimétricos com auxílio de um tanque Classe A e um tanque Padrão. Os dados meteorológicos necessários para estimar a evaporação, usando os métodos de Penman, Linacre, Snyder e Penman-Villa Nova, também foram coletados. Esse estudo foi conduzido durante um ano (Nov/2010 – Out/2011).

Os resultados obtidos indicaram que a perda de água aumentou em 1104 mm quando o solo arenoso foi convertido para uma superfície livre de água. O impacto aumentou em 1218 mm quando o solo argiloso é convertido para uma superfície livre de água. Isso indica que a instalação de cavas de mineração com formação de lagoas contribui para aumentar a perda de água por evaporação e diminuir os estoques de água subterrânea.

O método de Linacre e do tanque Classe A com  $K_p = 0,76$  providenciaram os melhores resultados, quando comparado com o tanque Padrão e o tanque com nível constante.

**Palavras-Chave** – Balanço Hídrico, Linacre, Tanque Padrão (20 m<sup>2</sup>).

## QUANTIFICATION OF WATER EVAPORATION BY OPEN PIT MINING LAKE USING LYSIMETERS

**Abstract** – Two field lysimeters and a buried evaporation tank with simple control and regulation system were designed to investigate the water loss due to soil cover change by open mining pit. A lysimeter was filled with sandy soil and another with clayey soil. In order to study the evaporation conditions on the lysimeter site, one class A pan and one 20 m<sup>2</sup> tanks were installed. The necessary meteorological data for evaporation estimates, using the Penman, Linacre, Snyder and Penman-Villa Nova equations, were also collected. This study was conducted during one year (Nov/2010 – Oct/2011).

The obtained results indicate that water losses through the surface increase in 1104 mm when sandy soil is converted to an open water surface. The impact increases in 1218 mm when clayey soil is converted to an open water surface. This indicates that the installation of mining pits with consequent formation of lagoons contributes to increasing evaporative water loss and decreasing underground water reserves.

The method of Linacre and Class A pan with  $K_p=0.76$  provide good results when compared to the 20 m<sup>2</sup> tank and the constant water table tank.

**Keywords** – Water Balance, Linacre, Standard Tank (20 m<sup>2</sup>).

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, camilo@sc.usp.br.

<sup>2</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, cristian.youlton@usp.br.

<sup>3</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, ew@sc.usp.br.

## INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos subterrâneos tem ganhado atenção especial nos últimos anos devido aos problemas ambientais relacionados com a superfície do solo. A Mineração é uma importante atividade para a sociedade, mas é grande consumidora de recursos naturais não renováveis e causa significativas mudanças na ocupação do solo consumindo grandes quantidades de água. Somente a mineração de cobre utilizou mais de 1,3 bilhão de m<sup>3</sup> de água em 2006 (Gunson *et al.*, 2010). Entretanto em uma escala global as atividades mineradoras usam apenas uma pequena porção de água. Em países com regiões secas como Austrália, Chile e África do Sul, a mineração sozinha tem uma demanda de 2 a 4,5% de água (Brow, 2003; Bangerter *et al.*, 2010).

A drenagem ácida de minas é um dos principais problemas ambientais, afetando de forma adversa os recursos hídricos superficiais e subterrâneos e causa também desequilíbrios ecológicos. Em geral isto ocorre quando a água bombeada é de baixa qualidade. Outro efeito negativo das atividades mineradoras é o rebaixamento do nível de água subterrânea, em regiões com poços de abastecimento e irrigação, devido a drenagem das minas (Cabrera *et al.*, 1984; Gray, 1998; Younger e Wolkersdorfer, 2004). Há vários estudos qualitativos sobre recursos hídricos superficiais, incluindo aqueles sobre a concentração de constituintes devido à evaporação das águas de mina (Yoko *et al.*, 1997; Eary, 1998; Han *et al.*, 2009).

Entretanto, impactos no ciclo de água ou nos recursos hídricos subterrâneos antes e depois da instalação das cavas de mineração não são mencionados nos relatórios ambientais, não contabilizando as mudanças de fluxos e a perda de água para atmosfera. Há uma forte evidência que as superfícies livres de água tem impacto direto no balanço hídrico afetando a evapotranspiração e a recarga de aquíferos. Isso é particularmente devido ao aumento da evaporação quando comparado com a evapotranspiração. A evaporação de superfícies livres, como por exemplo, lagos e banhados frequentemente representam grandes perdas no ciclo hidrológico local (Assouline *et al.*, 2008; Mengistu e Savage, 2010).

O Brasil apresenta 23.037 espelhos d'água com área a partir de 20 hectares, sendo 6.929 artificiais e 16.108 naturais. O maior número de reservatórios naturais está na região Norte (8.303) em decorrência, provavelmente, das zonas alagadiças que formam consideráveis lagoas próximas aos grandes rios. Já nas regiões Nordeste (2898) e Sul (2548) predominam os reservatórios artificiais, com área acima de 20 hectares, evidenciando, assim a política de construção de barragens (Menescal *et al.*, 2009).

A mineração ao longo do rio Paraíba do Sul é responsável pelo fornecimento de areia para construção civil na Região Metropolitana de São Paulo. Essa atividade vem transformando a superfície vegetada em inúmeros espelhos d'água através das cavas de mineração. No trecho entre Jacareí e Pindamonhangaba, nas várzeas do rio Paraíba do Sul, havia 113 cavas de mineração de areia em 1993, com área superficial de 591 hectares. Já em 2008 essa área aumentou para 276 cavas com 2252 hectares, significando um aumento de 1661 hectares na área minerada (Reis *et al.*, 2006).

Não há estudos científicos que estimem diretamente a mudança no balanço hídrico, especialmente a quantidade de água perdida para atmosfera devido a mudança de cobertura do solo (grama para superfície livre de água) ocasionada por mineração. O objetivo principal deste estudo é quantificar experimentalmente a perda de água em cavas de mineração através do monitoramento experimental das seguintes variáveis do balanço hídrico: i) evaporação; ii) precipitação; iii) drenagem iv) reposição hídrica para manter o nível de água constante nos lisímetros e tanque de evaporação, durante um ano sob condições climáticas tropicais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Lobo (coordenadas extremas 22°10' S lat. 22°20' S lat.; 47°45' O long. 47°55' O long.) em Itirapina, São Paulo (Figura 1).

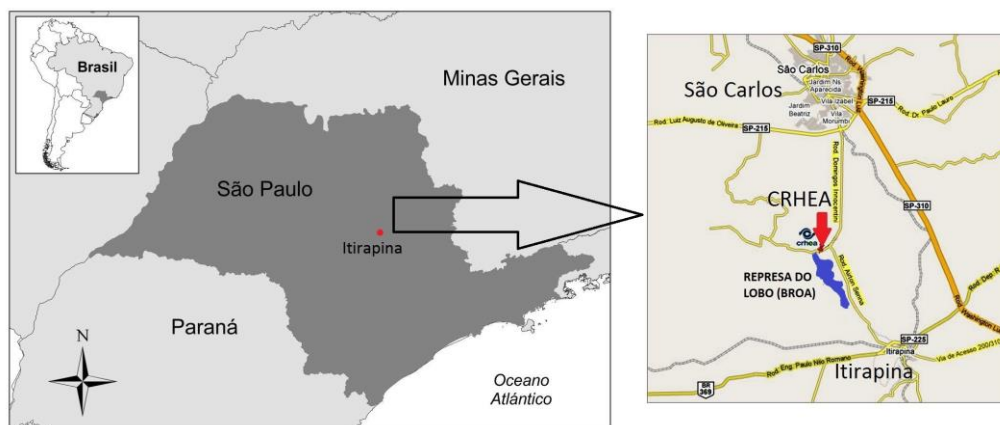


Figura 1 - Localização da área experimental

O experimento foi conduzido na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Universidade de São Paulo. A Estação está a 733 m acima do nível do mar e apresenta precipitação média anual, temperatura média e umidade relativa média de 1.493 mm, 21,5°C e 71% respectivamente (Machado e Mattos, 2001). O clima da região de acordo com a classificação de Wilhem Köppen é CWA, clima temperado devido à altitude, com inverno seco, apresentando pouca deficiência de água. A classificação de Thornthwaite e Matter (1955) descreve o clima como sendo do tipo B2 r B'3 a', clima úmido, com pequena deficiência hídrica (nos meses de junho, julho e agosto) e mesotérmico (Mattos *et al.*, 1998).

Um tanque de evaporação e dois lisímetros (Figura 2) foram utilizados nesse estudo, um preenchido com solo arenoso (lis-aren) e outro com solo argiloso (lis-arg), ambos com nível constante de água (1,0 m abaixo do nível do terreno). As caixas principais dos lisímetros e do tanque de evaporação foram feitas de fibra de vidro e têm 1,88 m de diâmetro superior, 1,52 m de diâmetro inferior, 1,32 m de profundidade e 2,78 m<sup>2</sup> de área. O nível de água no tanque de evaporação foi mantido no mesmo nível do terreno. No fundo da caixa principal de cada lisímetro foi instalado um sistema de drenagem na forma de espinha de peixe para drenar a água percolada após as precipitações.

O volume drenado nos lisímetros e no tanque de evaporação foi medido em caixas de polietileno com 310 litros de capacidade (Figura 2). O nível de água nos reservatórios abastecedores foram monitorados todos os dias as 07:00 horas. A Estação Climatológica e a superfície evaporante dos lisímetros foram vegetadas com grama batatais (*Paspalum notatum*, F). A vegetação foi mantida com uma altura variando entre 6 e 12 cm.

Para estudar as condições de evaporação no local foram coletados dados evaporimétricos em um tanque Classe A e um tanque Padrão 20 m<sup>2</sup> (Figura 2). Dados meteorológicos também foram coletados. A temperatura e umidade relativa do ar foram obtidas usando um sensor Rotronic, instalado a 1,8 m sobre o terreno e dentro de um abrigo meteorológico de 10 pratos com ventilação natural. A irradiância solar global foi obtida através de um piranômetro de fotodiodo de silício (Licor). Um anemômetro do tipo conchas (Fuess) a 2,0 m de altura foi utilizado para obtenção da velocidade média do vento. A precipitação foi medida com um pluviômetro Ville de Paris.

Os dados meteorológicos foram usados para estimar a evaporação de uma superfície livre conforme os métodos de Penman (1948), Snyder (1992), Linacre (1993) e Penman-Villa Nova *et al.*, (2006).

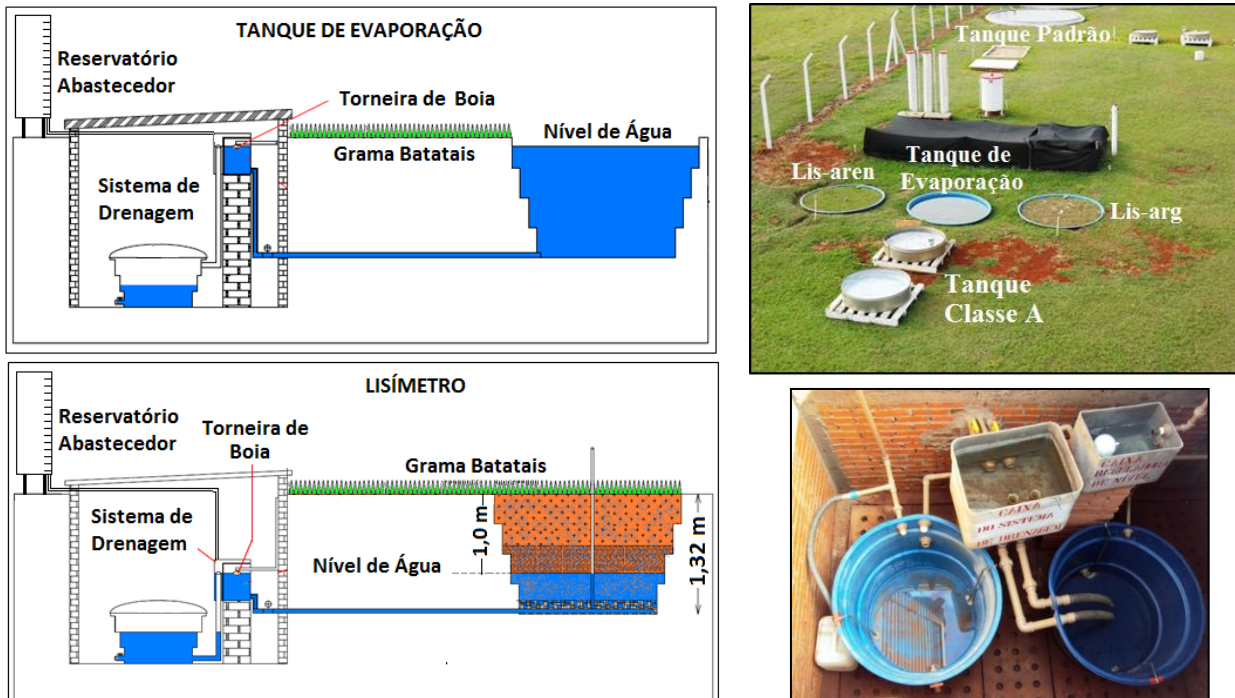


Figura 2 – Lisímetros, tanque Classe A, Padrão (20 m<sup>2</sup>) e tanque de evaporação com nível constante e sistema de drenagem (sem escala)

O solo arenoso foi coletado na Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça, (22° 10' 33,9" S lat.; 47° 57' 14,0" O long.) localizada no município de Brotas, São Paulo. O material desagregado foi retirado em camadas com 30 cm de espessura, e depositado no lisímetro obedecendo a sequência que se encontrava no campo. Este solo é representativo de área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (Wendland *et al.*, 2007).

O solo argiloso foi coletado, de forma desagregada, em uma área de mineração. Este local situa-se dentro da Bacia Hidrográfica do Uberabinha (19° 20' 41,1" S lat.; 47° 54' 46,3" O long.) no município de Uberaba, Minas Gerais. O solo é utilizado como matéria prima para fabricação de tijolos refratários. A composição granulométrica dos solos é indicada na Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria dos solos

Diâmetro da Partícula (mm) ABNT	Granulometria (%)	
	Lis-Arg	Lis-Aren
Pedregulho > 2,0	0,7	0,3
2,0 > Areia Grossa > 0,6	2,6	8,8
0,6 > Areia Média > 0,2	8,8	63,6
0,2 > Areia Fina > 0,06	2,4	16,4
0,06 > Silte > 0,002	20,1	10,9
0,002 > Argila	65,4	

O solo do lis-arg possui predominância de partículas finas (65,4% de argila e 20,1% de silte) em sua composição, apresentando característica marcante de plasticidade de argilas siltosas. Quando suficientemente úmido, molda-se facilmente; quando seco, apresenta coesão suficiente para construir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos. A fração grosseira do solo 14,5% das partículas é constituída de areia, grãos de gipsita e grumos (argila não destorroada).



O solo do lis-aren é caracterizado como areia fina a média, pois possui a predominância de areias (80%) em sua composição. Apresenta característica não coesiva e não plástica, sendo formado por minerais ou partículas de rochas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores observados de reposição hídrica para manter o nível constante dentro dos lisímetros são mostrados na Figura 3. No período chuvoso (Novembro/2010 até Abril/2011) o lis-aren consumiu uma quantidade maior de água em relação ao lis-arg, devido a retenção de água do solo argiloso. Durante o período seco (Maio/2011 até Outubro/2011), a reposição aumentou fortemente para fornecer água à superfície evaporante devido à evapotranspiração ocorrida. Nesse período não houve um aumento da reposição hídrica para os lisímetros durante 15 a 20 dias do mês de junho e setembro, pois houve três precipitações acima de 20 mm (21,8; 26,2; 45,5). Entretanto deve ser salientado que a cobertura da grama no lis-arg não apresentou boa adaptação ao solo argiloso, quando comparado com a grama do lis-aren, resultando em uma menor quantidade de reposição hídrica para o lis-arg.

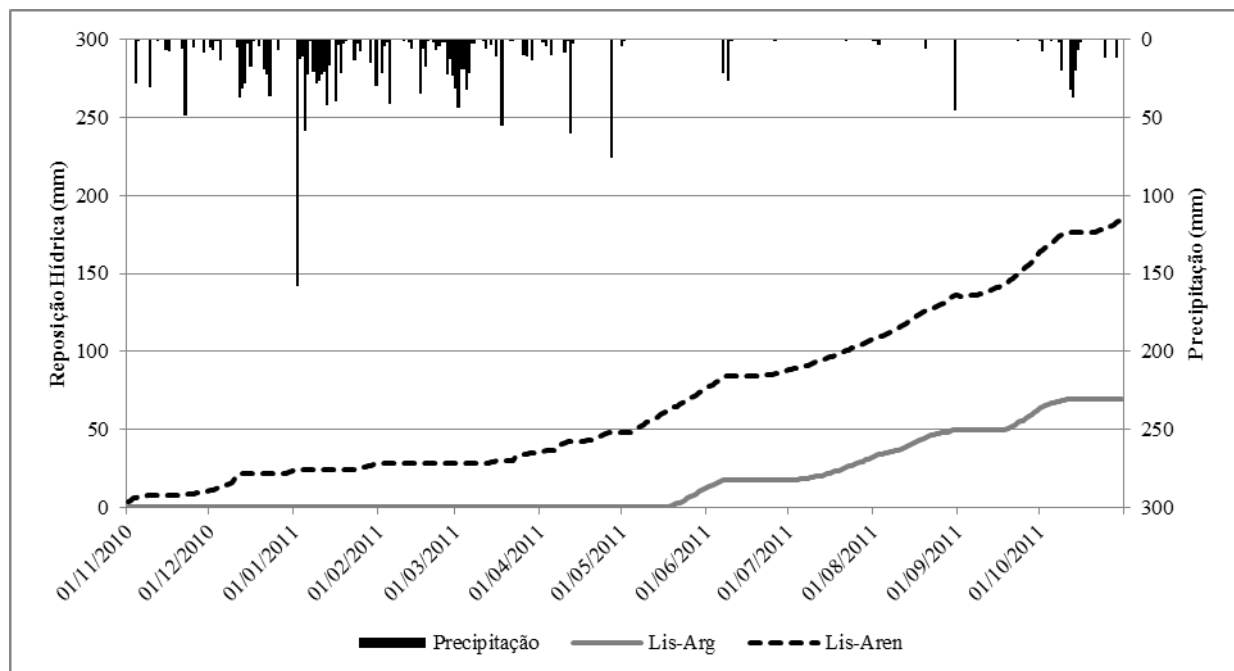


Figura 3 - Comparação da reposição acumulada para os lisímetros. A precipitação no período é mostrada através das barras

A Figura 4 mostra a precipitação e a drenagem acumulada dos lisímetros e do tanque de evaporação. A drenagem no lis-arg e lis-aren apresentaram valores semelhantes, não havendo diferença. A drenagem do tanque de evaporação acompanhou a precipitação ocorrida no período. Os meses de Novembro/2010 a Abril/2011 foram responsáveis por 86% da precipitação durante o período analisado.

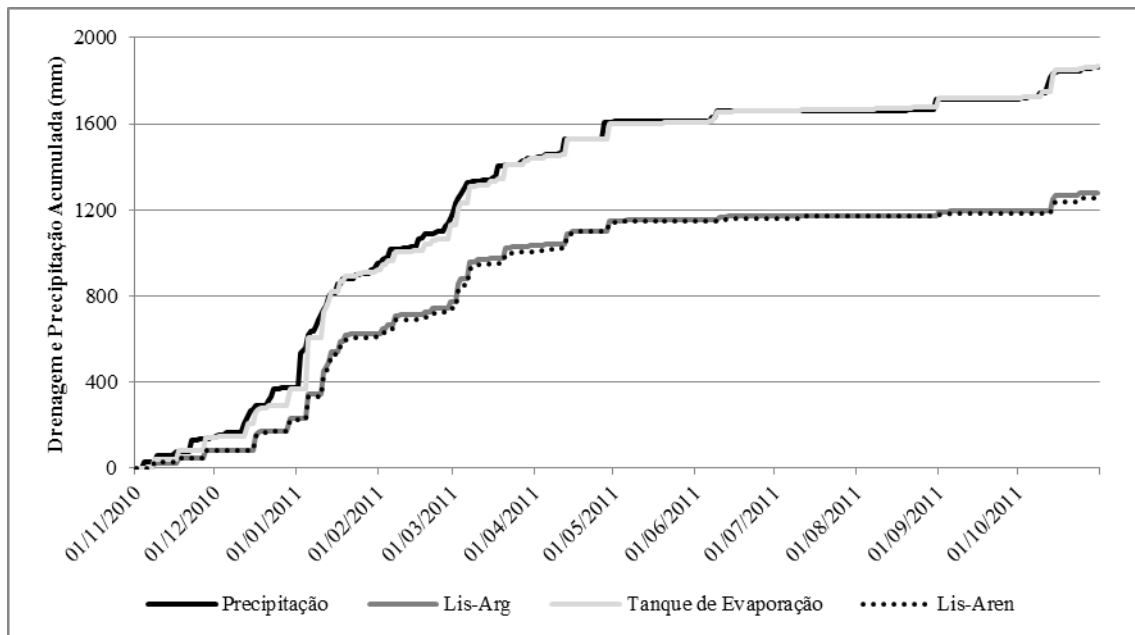


Figura 4 - Precipitação e drenagem acumuladas nos lisímetros e tanque de evaporação

Nesse experimento os métodos de Linacre (1993) e do tanque Classe A com  $K_p$  igual a 0,76 (Reis *et al.*, 2006) apresentaram as melhores estimativas de evaporação acumulada quando comparados com os valores observados no tanque Padrão (20 m<sup>2</sup>) e no tanque de evaporação. Os métodos de Snyder (1992), Penman-Villa Nova (2006) e Penman (1948) superestimaram a evaporação acumulada (Figura 5).

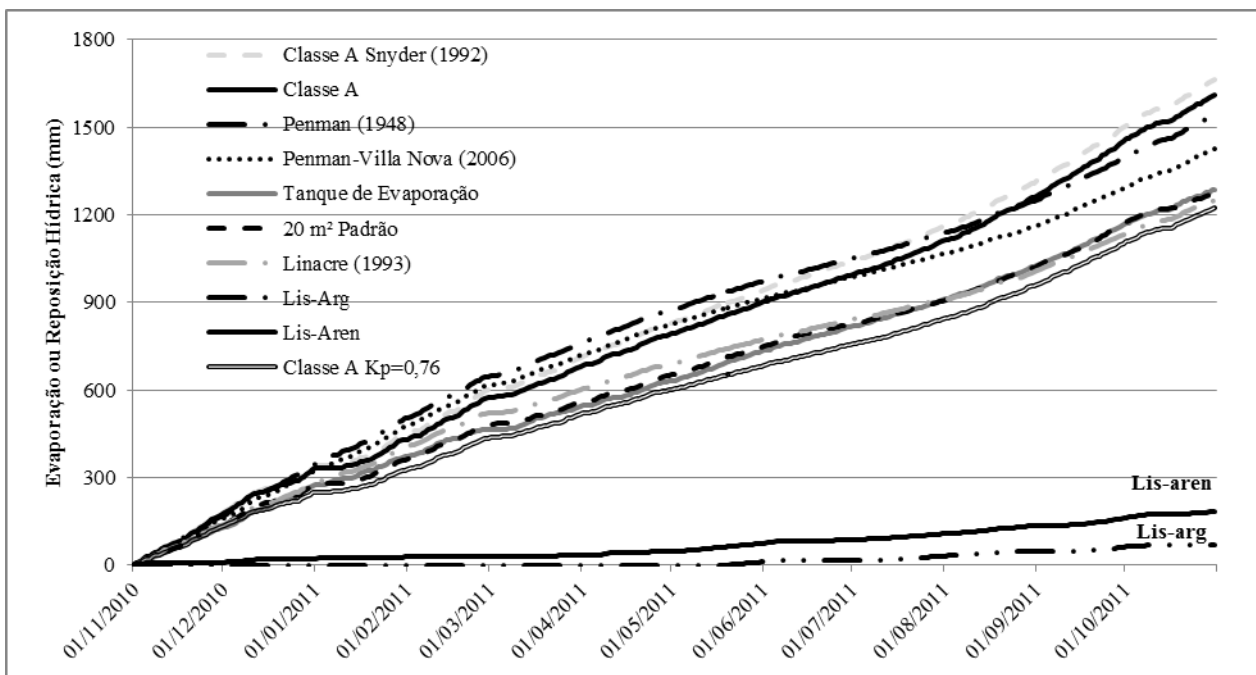


Figura 5 - Comparação da evaporação acumulada medida por evaporímetros e estimada por métodos baseados em dados meteorológicos. Na parte inferior do gráfico é mostrada a reposição hídrica acumulada nos lisímetros

## CONCLUSÕES

A mudança de cobertura do solo (substituição de uma cobertura com grama para superfície livre) devido às cavas de mineração aumenta a perda de água para atmosfera. De acordo com a Figura 5, os resultados obtidos, durante o período de estudo, indicam que a perda de água aumenta em 1104 mm quando um solo arenoso (coberto com grama, bem suprida de água) é convertido em superfície livre de água. O impacto aumenta em 1218 mm quando solo argiloso (coberto com grama, bem suprida de água, porém, com estresse ambiental) é convertido em superfície livre de água. Considerando as condições meteorológicas do local e a comparação com os tanques evapométricos (Padrão 20 m<sup>2</sup> e nível constante) o método do tanque Classe A com K<sub>p</sub> igual a 0,76 e o método de Linacre (1993) apresentaram bons resultados para estimar a evaporação acumulada de superfície livre nos períodos secos e chuvosos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPESP.

## REFERÊNCIAS

- ASSOULINE, S; TYLER, S.W; TANNY, J; COHEN, S; BOU-ZEID, E; PARLANGE, M.B; KATUL, G.G. (2008). Evaporation from three water bodies of different sizes and climates: Measurements and scaling analysis. *Advances in Water Resources*, v. 31, n. 1, p. 160–172.
- BANGERTER, P; RICHARD, E; VILLEGAS, M. (2010). Improving overall usage of water in mining - A sustainable development approach. In *Anais 2º International congress on water management in the mining industry*, p. 403.
- CABRERA, F; TOCA, C.G; DIAZ, E; ARAMBARRI, P. (1984). Acid mine-water and agricultural pollution in a river skirting the Doñana National Park (Guadiamar river, South West Spain). *Water Research*, v. 18, n. 12, p. 1469–1482.
- BROW, E. (2003). Water for a sustainable minerals industry - Water In *Anais Mining Conference*, Brisbane, October, pp. 3-14.
- EARY, L. E. (1998). Predicting the effects of evapoconcentration on water quality in mine pit lakes *Journal of Geochemical Exploration*, v. 64, n. 1–3, p. 223–236.
- GRAY, N. F. (1998). Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems. *Water Research*, v. 32, n. 7, p. 2122–2134.
- GUNSON, A.J; KLEIN, B; VEIGA, M; KEEVIL, N.B; (2010). Estimating global water withdrawals due to copper mining. J. Wiertz (Ed.), In *Anais II International Congress on Water Management in the Mining Industry*, GECAMIN, Santiago.
- HAN, X; HE, M; ZANG, B. (2009). Sensitivity analysis for parameters of a monitoring system for steep slopes of open-pit mines. *Mining Science and Technology (China)*, v. 19, n. 4, p. 441–445.
- LINACRE, E. T. (1993). Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 64, n. 3–4, p. 237–256.
- MACHADO, R. E; MATTOS, A. (2001). Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria-RS, v. 9, n. 1, p. 147–151.
- MATTOS, A; RIBEIRO, J.B.M; MATTOS, K.M.C; VILLA, E.A. (1998). Caracterização climática da represa do Lobo (Itirapina-SP). In *Anais. Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Brasília-DF.

MENESCAL, R. A; MARTINS, E.S.P.R; PERINI, D.S; WARREN, M.S; CARVALHO, M.S.B.S; SOARES, A.M.L; CHAVES, L.C.G; OLIVEIRA, F.A.J (2009). Identificação de reservatórios naturais e artificiais no Brasil. In *Anais XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande - MS, p.100.

MENGISTU, M. G.; SAVAGE, M. J. (2010). Open water evaporation estimation for a small shallow reservoir in winter using surface renewal. *Journal of Hydrology*, v. 380, n. 1–2, p. 27–35.

PENMAN, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, v. 193, n. 1032, p. 120–145, 22.

REIS, B. J; BATISTA, G.T; TARGA, M.S; CATELANI, C.S. (2006). Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 4, p. 391–396.

SNYDER, R. (1992). Equation for Evaporation Pan to Evapotranspiration Conversions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 118, n. 6, p. 977–980.

VILLA NOVA, N. A; MIRANDA, J.H; PEREIRA, A.B; SILVA, K.O. (2006). Estimation of the potential evapotranspiration by a simplified penman method. *Engenharia Agrícola*, v. 26, n. 3, p. 713–721.

YOKO, S; AXLER, R; McDONALD, M; WILCOX, D. (1997). Recovery of a mine pit lake from aquacultural phosphorus enrichment: model predictions and mechanisms. *Ecological Engineering*, v. 8, n. 3, p. 195–218.

YOUNGER, P. L; WOLKERSDORFER, C. (2004). Mining impacts on the fresh water environment: technical and managerial guidelines for catchment scale management. *Mine water and the environment*, v. 23, p. s2–s80.

WENDLAND, E; BARRETO, C; GOMES, L.H. (2007). Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. *Journal of Hydrology*, v. 342, n. 3–4, p. 261–269.