UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MANOEL CAMILO MOLEIRO CABRERA

Valoração do impacto ambiental de cavas de mineração de areia e argila com base na
evapotranspiração

Versão Corrigida
São Carlos – SP
2016

MANOEL CAMILO MOLEIRO CABRERA

Valoração do impacto ambiental de cavas de mineração de areia e argila com base na
evapotranspiração

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos obtenção do título
de Doutor em Ciências: Engenharia
Hidráulica e Saneamento

Orientador:
Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

São Carlos – SP
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Cabrera, Manoel Camilo
C266v Valoração do impacto ambiental de cavas de
mineração de areia e argila com base na
evapotranspiração / Manoel Camilo Cabrera; orientador
Edson Wendland. São Carlos, .

- Programa de e Área de Concentração em --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, .

1. Lisímetros. 2. Tanque 20 m². 3. Razão de Bowen.
4. ETgage. 5. Evapotranspirômetro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MANOEL CAMILO MOLEIRO CABRERA**.

Título da tese: "Evapotranspiração e pagamentos de serviços ambientais em cavas de mineração".

Data da defesa: 17/03/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Rodrigo de Melo Porto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Tadeu Fabrício Malheiros**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **João Batista Dias de Paiva**
(Universidade Federal de Santa Maria/UFSM)

Aprovado

Prof. Associado **Lulz Roberto Angelocci**
(Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo/ESALQ)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, apoio e fonte de toda a minha saúde, sabedoria, motivação e persistência para realização deste trabalho.

Ao Prof. Edson Wendland pela orientação, cobrança e viabilização de recursos financeiros indispensáveis para realização deste trabalho. Em especial à Sá pela paciência e auxílio.

Aos meus familiares Rosangela, Rubens, Alberto e Caio pela compreensão e apoio. Para Juliana pela companhia e ajuda indispensável.

À Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e a Universidade de São Paulo (USP).

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional e agregados.

Ao técnico Roberto Bérghamo pela ajuda na construção da parte experimental.

Ao pessoal do Departamento de Hidráulica e Saneamento, principalmente à Priscila, Flávia e Fernanda.

“Operação Lava Jato uma centelha de lucidez no Brasil”

“Measuring Reference Evapotranspiration ET_o . The ‘up’ side of water cycle”

CoCoRaHS – Community Collaborative Rain, Hail, & Snow Network

RESUMO

CABRERA, M.C.M. **Valoração do impacto ambiental de cavas de mineração de areia e argila com base na evapotranspiração** 2016. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos SP.

A atividade mineradora causa alterações na superfície, as quais influenciam a perda de água para atmosfera. Antes da instalação das cavas de mineração, há uma perda natural de água (evapotranspiração) da superfície. Com o aprofundamento da cava, essa área se torna uma lagoa, devido à surgência de água na cava proveniente do aquífero, e a evapotranspiração é alterada para evaporação. A quantificação da alteração no balanço hídrico devido às cavas é importante para se avaliar o impacto da mineração nos estoques hídricos subterrâneos e auxiliar no licenciamento e programas de recuperação de áreas degradadas pelas cavas. Este trabalho tem como objetivo quantificar experimentalmente as modificações nas variáveis do balanço hídrico; fornecer uma ferramenta de previsão das perdas evaporativas para o licenciamento ambiental em cavas de mineração e valorar economicamente o impacto dessa perda nas reservas hídricas subterrâneas.

Para isso, foi utilizado um experimento composto por um lisímetro de drenagem com nível constante contendo solo argiloso (*lis-arg*) e outro arenoso (*lis-aren*), um tanque de evaporação com nível constante enterrado no solo (*tenc*), tanque de 20 m² e o método de *Penman-Monteith FAO-56*. O monitoramento dos lisímetros foi feito durante 56 meses.

Considerando períodos de quatro meses e fazendo a variação de armazenamento de água nos lisímetros igual a zero, conclui-se que a evapotranspiração da grama batatais nos lisímetros foi inferior a evaporação dos tanques e a evapotranspiração estimada pelo método padrão de *Penman-Monteith FAO-56*. A taxa de cobertura vegetal na área dos lisímetros que no inverno apresentava baixos índices, 50 % da superfície evaporante, e a estimativa do saldo de radiação adotada pela *FAO-56* que superestima o valor são as causas. A evapotranspiração do lisímetro com solo arenoso atinge uma relação unitária com a metodologia da *FAO-56* quando se muda a forma de estimar o saldo de radiação, adotando este como 48% da irradiância solar global e apenas no período de novembro a fevereiro (exceto março a junho de 2015). A drenagem dos lisímetros com solo argiloso e com solo arenoso apresentaram valores semelhantes, e ambos foram em média 50% da precipitação.

Para a fase de licenciamento ambiental de cavas de mineração a relação linear $0,9ND$, sendo ND o número de dias após o surgimento da área alagada na cava, pode ser utilizado para prever a lamina de água perdida do armazenamento subterrâneo para a atmosfera. A relação citada foi obtida em uma superfície gramada com solo arenoso e outra de água livre num clima tropical úmido, com baixa deficiência hídrica no inverno, e com uma evapotranspiração média de 3,3 mm/dia.

Durante o licenciamento ambiental essa metodologia pode prever impactos (perdas evaporativas) devido à instalação e aumento das cavas de mineração. Nos programas de recuperação de áreas degradadas o impacto nos recursos hídricos subterrâneos devido à mudança de superfície feito durante a atividade minerária pode ser quantificado com essa simples relação ($0,9ND$). O método requer apenas a medição da área convertida em superfície de água livre, para isto podem ser usadas imagens de satélite e a relação acima descrita.

Aplicou-se o método nas cavas de mineração de areia na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e em Campo Grande – MS. O incremento de evaporação ($0,9ND$) aliado com o valor cobrado de R\$0,02/m³ e a área alagada das cavas permitiram quantificar economicamente o valor do impacto.

Palavras-Chave: Lisímetros, Tanque 20 m², *ETgage*, Razão de *Bowen*.

ABSTRACT

CABRERA, M.C.M. **Evaluation of the environmental impact of sand and clay mining pits based on evapotranspiration** 2016. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

The mining activity causes changes in the surface, which influence water loss to the atmosphere. Before installation of the pit mining, there is a natural water loss (evapotranspiration) of the surface. With the deepening of the pit, the area becomes a pond due to water upwelling in the pit from the aquifer, and evapotranspiration is changed to evaporation. The quantification of the change in water balance due to the pit is important to assess the impact of mining on groundwater reserves, and assist in licensing and degraded areas recovery programs for pits. This study aims: experimentally quantify the changes in the variables of the water balance; provide a predictive tool of evaporative losses for environmental licensing in mining pits and economically value the impact of that loss on groundwater reserves.

For this, we used an experiment consisting of a drainage lysimeter with constant water table containing clay soil (*lys-clay*) and other sandy (*lys-sand*), an evaporation tank with constant water level buried in the ground, 20 m² tank and the *Penman-Monteith FAO-56*. The monitoring of lysimeters was made for 56 months.

Considering four-month periods and making the lysimeters water storage variation equal to zero, it is concluded that the evapotranspiration bahia grass in the lysimeters was less evaporation tanks and evapotranspiration estimated by the standard method of *Penman-Monteith FAO-56*. The vegetation coverage rate in the area of lysimeters in winter had lower rates, 50% of the evaporating surface, and estimate the net radiation adopted by the *FAO-56* that overestimates the value are the causes. Evapotranspiration the lysimeter with sandy soil reaches a unitary relationship with the *FAO-56* methodology when using it changes the way of estimating the net radiation, adopting the net radiation as 48% of global solar irradiance and only in the period from November to February (except March-June 2015). The drainage lysimeters with clay soil and sandy soil were very similar, and both were on average 50% of the rainfall.

For environmental licensing phase mining pits 0.9ND the linear relationship being ND the number of days after the onset of the open water area in the pit, it can be used to predict

water lost groundwater blade to the atmosphere. The above ratio was obtained in a grassy area with sandy soil and other free water in a humid tropical climate, with low water deficiency in the winter, with an average evapotranspiration of 3.3 mm / day.

During the environmental licensing this methodology can predict impacts (evaporative losses) due to installation and increased mining pits. In degraded areas recovery programs the impact on underground water resources due to surface changes made during the mining activity can be quantified with this simple relationship (0.9ND). The method requires only the measurement area converted into free water surface, it can be used for satellite images and the above-described relationship.

It was used the method in sand mining pits in the watershed of the Paraíba do Sul and city Campo Grande - MS. The increase evaporation (0.9ND) allied with the charge of R\$ 0.02 / m³ and the area flooded the pits allowed economically quantify the value of impact.

Keywords: Lysimeters, Tank 20 m², *ETgage*, *Bowen* ratio.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ	Declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura (kPa/°C)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ascensão capilar
ARM	Lâmina de água armazenada no perfil do solo
a_s	Coeficiente de transmutância atmosférica (0,25)
ASCE	Sociedade Estadunidense de Engenheiros Civis
AVe	Água virtual de entrada
AVs	Água virtual de saída
b_s	Coeficiente de transmutância atmosférica (0,50)
c	Coeficiente de confiança ou de desempenho
C	Preço do volume de água (R\$/m³)
CobCal	Software de processamento de imagens para quantificar área verde
C_p	Calor específico do ar a pressão constante (MJ/kg/dia)
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
D	Drenagem
d	Coeficiente de exatidão ou de Willmott
DAP	Disposição à pagar
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DLe	Drenagem lateral de entrada
DLs	Drenagem lateral de saída
DP	Drenagem profunda
d_r	Distancia relativa do sol a Terra em radianos
E	Evaporação
E_{20}	Evaporação tanque padrão (20 m²) - (mm/dia)
e_a	Pressão parcial ou atual de vapor (kPa)
Ee	Escoamento superficial de entrada
EIA	Estudo de impacto ambiental
E_L	Evaporação de superfície livre estimada com método de Linacre (mm/dia)
EO	Evapotranspiração de Oásis
E_{piche}	Evaporímetro de Piché
Es	Escoamento superficial de saída
e_s	Pressão de saturação de vapor média (kPa)
$e_s - e_a$	Déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa)
ET	Evapotranspiração
ET_{areia}	Evapotranspiração de solo com textura arenosa
ET_{argila}	Evapotranspiração de solo com textura argilosa
ETc	Evapotranspiração de cultura
ETgage	Atmômetro composto de copo cerâmico (tipo Bellani) coberto com uma lona verde

ET _o	Evapotranspiração de referência
EV	Evaporação de superfície de água livre
F	Fator de correção devido à altitude do local
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
G	Fluxo de calor no solo (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
G _{sc}	Constante solar igual a 0,0820 MJ/m ² /min
I	Irrigação
I _c	Interceptação
I _f	Infiltração
K ₀	Fator multiplicativo aplicado ao preço unitário da vazão captada
K ₁	Coefficiente de consumo para a atividade (fração da vazão captada que não retorna ao corpo d'água)
K ₂	Fração da vazão do efluente tratado em relação a vazão total de efluente
K ₃	Eficiência do tratamento em termos de remoção de Demanda Biológica de Oxigênio
L _F	Leitura final no parafuso micrométrico em forma de gancho
L _I	Leitura inicial no parafuso micrométrico em forma de gancho
lis-aren	Lisímetro de drenagem com nível constante e preenchido com solo argiloso
lis-arg	Lisímetro de drenagem com nível constante e preenchido com solo argiloso
MRB	Método da razão de Bowen
<i>n</i>	Insolação ou duração do brilho solar valor medido (horas/dia)
<i>N</i>	Insolação máxima ou duração do brilho solar valor teórico (horas/dia)
ND	Contagem do número de dias
NDA	Número do dia no ano (01 - 1 de janeiro, 31 - 31 de janeiro)
O	Média dos valores observados
O _i	Valor observado
P	Precipitação
P _{atm}	Pressão atmosférica (kPa)
P _i	Valor estimado
PPU	Preço público unitário para captação e lançamentos de afluentes (R\$ 0,02/m ³)
PSA	Pagamento por serviços ambiental
PVC	Policloreto de vinil
Q	Vazão no exutório da bacia hidrográfica
Q _{cap}	Vazão captada (m ³ /mês)
Q _{evap}	Diferença de evaporação entre a superfície vegetada e a evaporação de superfície de água livre
Q _g	Irradiância solar global (W m ⁻²)
<i>r</i>	Albedo ou reflexão da superfície
R	Coefficiente de correlação
R _a	Irradiância solar no topo da atmosfera ou extraterrestre (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
<i>r_a</i>	Resistência aerodinâmica (s/m)
RIMA	Relatório de impacto ambiental

R_n	Saldo de radiação sobre a superfície ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
R_{nl}	Saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
R_{ns}	Saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
R_s	Irradiância solar global ou de superfície ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
r_s	Resistência da superfície (s/m)
R_{so}	Irradiância solar, quando a razão n/N é unitária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
Rw	Lançamento de águas residuárias
SAG	Sistema Aquífero Guarani
Se	Evaporação direta do solo
Sp	Percolação na bacia hidrográfica
T	Transpiração
Tanque 20m ²	Tanque de evaporação com área de 20 m ² e profundidade 2 m
t_d	Temperatura do ponto de orvalho (°C)
tenc	Tanque de evaporação com nível constante
$t_{m\acute{a}x}$	Temperatura máxima do ar (°C)
t_{med}	Temperatura média do ar (°C)
$t_{m\acute{i}n}$	Temperatura mínima do ar (°C)
t_{s1}	Temperatura bulbo seco nível 1 (°C) - (70 cm acima da grama)
t_{s2}	Temperatura bulbo seco nível 2 (°C) - (200 cm acima da grama)
t_{u1}	Temperatura bulbo úmido nível 1 (°C) - (70 cm acima da grama)
t_{u2}	Temperatura bulbo úmido nível 2 (°C) - (200 cm acima da grama)
U_2	Velocidade média do vento à 2 m (m/s)
UR_{15}	Umidade relativa às 15:00 da tarde (%)
UR_{21}	Umidade relativa às 21:00 da noite (%)
UR_9	Umidade relativa às 9:00 da manhã (%)
$UR_{m\acute{a}x}$	Umidade relativa máxima (%)
UR_{med}	Umidade relativa média (%)
$UR_{m\acute{i}n}$	Umidade relativa mínima (%)
USP	Universidade de São Paulo
VE	Valor de existência
VERA	Valor econômico do recurso ambiental
VET	Valor econômico total
VF	Valor futuro
VL	Valor de legado
VNU	Valor de não uso
VO	Valor de opção ou de uso potencial
VUD	Valor de uso direto
VUI	Valor de uso indireto
Z	Altitude do local (m)

β	Razão de Bowen ou razão entre o calor sensível e o calor latente
γ	Coeficiente psicrométrico (kPa/°C)
δ	Declinação solar em radianos
ΔARM	Variação de armazenamento de água no perfil do solo
ΔE	Incremento de Evapotranspiração
ΔS	Variação de água na bacia hidrográfica
ε	Relação entre o peso molecular do vapor d'água e do ar seco
Θ_{10}	Umidade no solo à 10 cm de profundidade (%)
Θ_{40}	Umidade no solo à 40 cm de profundidade (%)
Θ_{80}	Umidade no solo à 80 cm de profundidade (%)
λ	Calor latente de evaporação 2,45 MJ.m ⁻² .dia ⁻¹ à 25°C
ρ_a	Massa específica do ar (kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann com o valor de 4,903x10 ⁻⁹ (MJ.K ⁻⁴ .m ⁻² .dia ⁻¹)
φ	Latitude do local em radianos
ω_s	Ângulo horário do pôr do sol em radianos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Produção em toneladas de areia, brita, ferro e aço no Brasil, Estados Unidos e no Mundo. Dados retirados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e U.S. <i>Geological Survey</i> USGS).....	29
Figura 3-1 Principais correntes de interpretação do desenvolvimento sustentável para as políticas públicas, adaptado (MAY, 2010).....	34
Figura 3-2 Visão esquemática do posicionamento das vertentes econômicas, frente à ecologia e a economia (CAVALCANTI, 2010).....	36
Figura 3-3 Categorias de valores econômicos atribuídos ao patrimônio ambiental e descrição detalhada com exemplos por classe discriminada (MUNASINGHE, 1992).	40
Figura 3-4 Imagens das cavas de mineração Águas Claras situada em Belo Horizonte MG, e Serra Pelada em Curionópolis-PA. As cavas encontram-se inundadas e formando espelhos d'água (lagos). A cava de Águas Claras tem 34 hectares e a de Serra Pelada 10 hectares	52
Figura 3-5 Representação esquemática do processo de formação das cavas no local de exploração do bem mineral (mina). Com o avanço das escavações a água presente na zona saturada do solo aparece em superfície e origina o lago (CABRERA, 2011).....	53
Figura 3-6 Imagens de satélite ilustrando a formação e aumento das cavas secas e aquelas com espelhos d'água. Modificação de uso e cobertura do solo devido à lavra de areia, nas proximidades da área urbana de Campo Grande – MS.....	55
Figura 3-7 Imagens de satélite ilustrando as cavas de mineração nas proximidades da área urbana de Campo Grande – MS GOOGLE EARTH (2014)	56
Figura 3-8 Aumento da superfície livre de água devido à expansão das cavas de mineração de areia, em amarelo a área inundada dia 09/05/2003 totalizando 4,1 hectares. Já no dia 09/02/2014 a área coberta por espelho d'água era de 29,3 hectares. Cavas localizadas em Campo Grande MS.	57
Figura 3-9 Imagem datada de 2003 em um trecho do Rio Paraíba do Sul nas proximidades de Aparecida do Norte.	57
Figura 3-10 Imagem datada de 2013 do mesmo trecho da figura 3.9, porém com a indicação em amarelo do aumento dos espelhos de água devido à mineração em cavas.....	58
Figura 3-11 Representação dos fluxos de água em um volume de controle (SENTELHAS, 1998).....	59

Figura 3-12 Representação esquemática dos fluxos de água em uma bacia hidrográfica com destaque para os fluxos de água azul e verde (CALIJURI; CUNHA, 2013; HOEKSTRA et al., 2011).....	62
Figura 3-13 Representação esquemática de um lisímetro de pesagem mecânica (BERNARDO et al., 2008).....	66
Figura 3-14 O Centro Nacional de Pesquisa e Saúde do Instituto de Ecologia dos Solos em Neuherberg Alemanha mantém e opera 32 lisímetros para estudos de balanço hídrico, recarga subterrânea e absorção de nutrientes pelas plantas (HEALY et al., 2007).....	67
Figura 3-15 Construção de um lisímetro de pesagem em Coshocton, Ohio Estados Unidos. Em 1937 foram construídos e preenchidos 11 lisímetros. Esse tipo de lisímetro permite medir também o escoamento superficial do terreno (GOSS et al., 2010).....	68
Figura 3-16 Representação de um lisímetro de drenagem (MEDEIROS, 2008).....	69
Figura 3-17 Lisímetros monolíticos de drenagem (OLIVEIRA, 2006).....	69
Figura 3-18 No lado direito o lisímetro desenvolvido por Thornthwaite para determinar a evapotranspiração (BARBIERI, 1981). Na esquerda o lisímetro de drenagem com nível constante e cobertura retrátil para impedir a entrada de água. Experimento desenvolvido por Barbieri (1981)	70
Figura 4-1 Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada.	74
Figura 4-2 Visão geral dos lisímetros e tanque de evaporação (CABRERA, 2011)	78
Figura 4-3 Reservatórios com mangueira incolor, tubo de vidro transparente e escala graduada para verificação de nível. Os reservatórios são abastecidos com água, geralmente uma vez por mês (CABRERA, 2011).	78
Figura 4-4 Planta dos lisímetros e tanque de evaporação (tenc), ilustrando as caixas principais dos lisímetros com sistema de drenagem na forma de “espinha de peixe”. Dentro do abrigo subterrâneo, estão representadas as caixas auxiliares de cada sistema com a finalidade de manter o nível constante de água, independente da precipitação ou evapotranspiração. Representação sem escala e com dimensões em metros (CABRERA, 2011).....	79
Figura 4-5 Perfil do tanque de evaporação e do abrigo subterrâneo com a caixa reguladora de nível, caixa do sistema de drenagem e tanque coletor graduado. A caixa reguladora possui uma torneira de boia para suprimento contínuo de água, independente da evaporação. A caixa do sistema de drenagem possui dois tubos na posição vertical (tulipas)	

para direcionar o excedente de água proveniente das precipitações no tanque de evaporação. Representação sem escala e com dimensões em metros (CABRERA, 2011).....	80
Figura 4-6 Perfil do lisímetro e do abrigo subterrâneo com a caixa reguladora de nível, caixa do sistema de drenagem e tanque coletor graduado. O nível de água no interior dos lisímetros foi mantido a 1,0 m abaixo da superfície do terreno. A caixa reguladora possui uma torneira de boia para suprimento contínuo de água, independente da evapotranspiração. A caixa do sistema de drenagem possui dois tubos na posição vertical (tulipas) para direcionar o excedente de água proveniente das precipitações nos lisímetros. Representação sem escala e com dimensão em metros (CABRERA, 2011).....	80
Figura 4-7 Planta detalhada do abrigo subterrâneo e reservatórios de alimentação. Cada sistema possui uma caixa reguladora de nível, uma caixa de drenagem e um tanque coletor para armazenar o volume de água proveniente das precipitações. O tanque de evaporação possui um tanque auxiliar que entra em funcionamento após o preenchimento do tanque coletor graduado principal. Representação sem escala e com valores em metros (CABRERA, 2011).....	81
Figura 4-8 Lisímetros e tanque de evaporação dentro da Estação Climatológica do CRHEA (CABRERA, 2011).....	82
Figura 4-9 Visão superior da caixa do sistema de drenagem, caixa reguladora de nível e tanque coletor graduado do <i>lis-arg</i> (CABRERA, 2011).	82
Figura 4-10 Imagens da implantação do sistema de drenagem mostrando o preenchimento do <i>lis-arg</i> com o umedecimento completo do solo para fins de adensamento (CABRERA, 2011).....	84
Figura 4-11 Localização do ponto de coleta do solo arenoso para preencher o <i>lis-aren</i> (CABRERA, 2011).....	85
Figura 4-12 Escavação em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani para retirada do solo arenoso que compõe o lisímetro <i>lis-aren</i> utilizado no trabalho, data das imagens 25-08-2010 (CABRERA, 2011).....	86
Figura 4-13 Imagens da implantação do sistema de drenagem em sequência, o preenchimento do <i>lis-aren</i> com o umedecimento completo do solo para fins de adensamento (CABRERA, 2011).....	87
Figura 4-14 Curva granulométrica do solo argiloso no <i>lis-arg</i> (CABRERA, 2011).	88
Figura 4-15 Curva granulométrica do solo arenoso no <i>lis-aren</i> (CABRERA, 2011).	89

Figura 4-16 Sensor de pressão e temperatura MiniDiver e Barodiver. Leitura ótica do Barodiver para armazenamento de dados no computador (CABRERA, 2011).	90
Figura 4-17 <i>ETgage</i> à esquerda e a haste com os dois níveis de medição à direita para o método da razão de <i>Bowen</i>	96
Figura 4-18 Conjunto de tanques 20 m ² (Padrão) localizado na Estação Climatológica do CRHEA em Itirapina – SP.....	98
Figura 4-19 Programa de computador CobCal que foi utilizado para composição dos índices de cobertura vegetal dos lisímetros.	100
Figura 4-20 Disposição da sonda de umidade com três sensores no interior do lisímetro. Níveis de medição de umidade no solo também são mostrados.....	100
Figura 5-1 Chuva média mensal medida entre 1979 e 2014, na Estação Climatológica do CRHEA. Em azul, os meses mais chuvosos; em amarelo e vermelho os mais secos.	103
Figura 5-2 Chuva anual acumulada medida entre 1979 e 2014, na Estação Climatológica do CRHEA. Os anos sinalizados em amarelo correspondem aqueles com dados dos lisímetros. A linha vermelha indica a média anual.	103
Figura 5-3 Variação mensal da temperatura média estimada com as observações das 9,15 e 21 horas acrescida das temperaturas máxima e mínima. As temperaturas absolutas extremas, entre novembro/2010 e agosto/2015 também são mostradas.....	104
Figura 5-4 Total mensal de precipitação no formato de barras invertidas e curvas de irrigação acumulada no <i>lis-arg</i> (vermelho) e <i>lis-aren</i> (preto) durante período de 11/2010 a 06/2015.....	105
Figura 5-5 Balanço hídrico climatológico indicando os meses com deficiência hídrica no solo e aqueles que apresentam um excesso. Os dados foram obtidos da estação climatológica do CRHEA situada em Itirapina-SP. A evapotranspiração foi estimada com o método de Thornthwaite e a temperatura média do ar.	106
Figura 5-6 Balanço hídrico climatológico sequencial mensal entre 2010 e 2015. A evapotranspiração foi estimada com o método de <i>Penman-Monteith</i> FAO 56	106
Figura 5-7 Replântio e adubação da grama batatais com reconstrução da camada inicial de solo no <i>lis-aren</i> e <i>lis-arg</i> , com o objetivo de igualar a condição da superfície evaporante. Procedimento efetuado em 04/11/2014.	108
Figura 5-8 Superfície evaporante dos lisímetros coberta com grama batatais nos anos de 2010 e 2011. Observa-se a maior quantidade de áreas sem recobrimento com grama no <i>lis-</i>	

arg. Para ambos os lisímetros, o menor desenvolvimento foliar é registrado no final do inverno e início da primavera/2011. 109

Figura 5-9 Cobertura vegetal dos lisímetros em 2012 e 2013. O replantio da grama na superfície do *lis-arg*, realizado em novembro/2011, proporcionou um melhor desenvolvimento no verão de 2011/2012. Ao centro, imagens da grama batatais no inverno/2012..... 110

Figura 5-10 Superfície evaporante dos lisímetros no inverno/2013 e primavera/2014. Ao centro, imagens da grama batatais no verão 2013/2014..... 111

Figura 5-11 Cobertura vegetal dos lisímetros no verão de 2014/2015 e 2012/2013. Ao centro, imagens da grama batatais no inverno/2015..... 112

Figura 5-12 Variação da cobertura de grama batatais na superfície dos lisímetros, valor expresso em porcentagem relativa à área evaporante que é de 2,78 m². A linha vermelha com marcadores circulares representa o *lis-arg*, a linha preta com marcadores triangulares simboliza o *lis-aren* (Dados no apêndice). 113

Figura 5-13 Gráfico de dispersão entre a evapotranspiração medida nos lisímetros e a porcentagem da superfície evaporante coberta com grama. O gráfico da esquerda refere-se ao *lis-arg* e o da direita ao *lis-aren*. 113

Figura 5-14 Umidade do solo argiloso e arenoso, expressa em base volumétrica (%), às profundidades de 10, 40 e 80 cm. As linhas pretas representam a variação do conteúdo de água no solo do *lis-aren*. Já essa variável para o *lis-arg* é mostrada na cor vermelha. As chuvas diárias que alteram a umidade no solo também são simbolizadas com as barras invertidas. 115

Figura 5-15 Lâmina de água armazenada até 80 cm de profundidade para a argila e areia. A diferença entre o armazenamento do *lis-arg* e *lis-aren* é apresentada pela linha cinza. 117

Figura 5-16 Chuva e drenagem dos lisímetros. No período 12 não houve drenagem no *lis-aren*. Cada período corresponde a 4 meses. A razão entre as drenagens dos lisímetros também é mostrada no gráfico através da linha com marcadores circulares..... 118

Figura 5-17 Drenagem acumulada no tanque coletor graduado do *lis-arg* (esquerda) e *lis-aren* (direita) após as sucessivas chuvas de janeiro de 2011..... 119

Figura 5-18 Drenagem dos lisímetros e a chuva em curvas acumuladas durante o período de 30/10/2010 a 07/07/2015. Os lisímetros apresentaram valores semelhantes para a drenagem. 120

Figura 5-19 Gráfico de dispersão entre medidas de irradiância solar global e estimativas com dados de insolação. Diferentes instrumentos de registro da insolação são utilizados, *Blake Larsen sun recorder* e o heliógrafo *Campbell-Stokes*..... 122

Figura 5-20 Correlação linear entre a temperatura média mensal do ar e a irradiância solar global na estação climatológica do CRHEA, período novembro/2010 a agosto/2015 (Dados no apêndice). 122

Figura 5-21 Gráfico de dispersão entre o saldo de radiação medido sobre a grama batatais e o valor estimado com a metodologia da *FAO 56*. No gráfico A foram utilizados dados de irradiância solar global estimados com a equação de *Angstrom Prescott*. No gráfico B, esta variável foi medida com piranômetro de fotodiodo de silício. A reta 1:1 também é mostrada em ambos os gráficos. 123

Figura 5-22 Correlação diária entre a irradiância solar global e o saldo de radiação medido sobre a grama batatais. Com a equação de *Angstrom Prescott* estimou-se os valores de irradiância solar global. 124

Figura 5-23 Variação das taxas de evapotranspiração nos lisímetros em 14 períodos. As barras verticais são as variações da evapotranspiração nos lisímetros e também aquelas estimadas com metodologia da *FAO 56*. A relação adimensionalizada entre a evapotranspiração dos lisímetros é mostrada com valores nos marcadores. Cada período corresponde a quatro meses consecutivos, iniciado em nov./2010 e com término em jun./2015, totalizando 56 meses. A evapotranspiração dos lisímetros nos períodos 1 e 7 está superestimada. 126

Figura 5-24 Irrigação subsuperficial nos lisímetros durante os dias e as noites (dados no apêndice)..... 129

Figura 5-25 Variação da evapotranspiração do gramado da Estação Climatológica do CRHEA durante o período de 02/03/2015 a 31/08/2015. Os dados medidos no *ETgage* são simbolizados com marcadores triangulares (verde). As linhas com marcadores em formato de losango simbolizam a evapotranspiração medida com o método da razão de *Bowen*. A chuva diária é simbolizada pelas barras verticais invertidas. 131

Figura 5-26 Gráfico de dispersão entre as medidas do *ETgage* e do método da razão de *Bowen*. Na figura A, não estão incluídos os pontos de agosto. Na figura B os pontos de agosto estão circulados em vermelho..... 131

Figura 5-27 Variação da evapotranspiração do gramado da Estação Climatológica do CRHEA durante o período de 20/12/2014 a 31/08/2015. As linhas com marcadores em

formato de losango simbolizam a evapotranspiração medida com o método da razão de *Bowen*. A evaporação medida com o tanque 20 m² é mostrada com marcadores circulares. A chuva diária é simbolizada pelas barras verticais invertidas. 132

Figura 5-28 Evaporação observada no tanque com nível constante em milímetros acumulados por mês, (linha vermelha). A duração do brilho solar foi acumulada em totais mensais, em horas, (linha laranja). O acumulado de chuva mensal (mm/mensal) é representado pelas barras verticais azuis (dados no apêndice). 133

Figura 5-29 Variação da razão de insolação, umidade relativa do ar e velocidade. A linha preta representa a média mensal da velocidade do vento (2,0 m), a vermelha simboliza a razão de insolação (n/N). A umidade relativa do ar é indicada com barras verticais (dados no apêndice). 134

Figura 5-30 Chuva e evaporação acumulada em milímetros (linha azul). A linha preta simboliza o tanque de 20 m² e a linha laranja o tanque de nível constante 135

Figura 5-31 Palhas na superfície do tanque de evaporação enterrado com nível constante e filme de alga que dificultaram a uniformidade da condição de evaporação 136

Figura 5-32 Variações da cor da água do tanque de evaporação, essa variação também altera o albedo da água. 136

Figura 5-33 Gráficos de dispersão entre a evaporação medida utilizando o tanque de evaporação com nível constante e aquela observada no tanque de 20 m². No gráfico A foram utilizados pares de dados diários. No gráfico B foi empregada uma média mensal. 137

Figura 5-34 Balanço hídrico acumulado para o *lis-arg*. A linha preta representa a entrada total que é a soma da precipitação e da irrigação. A linha vermelha representa a saída total que é o somatório da evapotranspiração e da drenagem. 138

Figura 5-35 Balanço hídrico acumulado para o *lis-aren*. A linha preta representa a entrada total que é a soma da precipitação mais irrigação. A linha vermelha representa a saída total que é o somatório da evapotranspiração e da drenagem. 138

Figura 5-36 Evaporação no tanque de nível constante e evapotranspiração acumuladas nos lisímetros durante o período de 11/2010 a 06/2015. A família de equações lineares que representam as perdas de água acumulada com os dias também é mostrada. 140

Figura 5-37 Curvas de evapotranspiração acumulada esperada conforme a textura do solo (HILLEL; BAVEL, 1976). 140

Figura 5-38 Fórmula de cobrança pelo uso da água instituída na bacia do Paraíba do Sul. A equação está desmembrada em três parcelas, referentes aos tipos de uso do recurso hídrico (REBOUÇAS et al., 2006)	144
Figura 5-39 Projeção do impacto monetário gerado pelo acréscimo de perdas evaporativas ocorridas devido à substituição de 29 hectares de área gramada para superfície de água livre, em cavas de mineração de areia próxima à Campo Grande MS.....	146
Figura 5-40 Projeção do impacto monetário gerado pelo acréscimo de perdas evaporativas ocorridas devido à substituição de 2252 hectares de área vegetada para superfície de água livre, em cavas de mineração de areia na bacia do Paraíba do Sul, trecho entre Taubaté SP e Pindamonhangaba SP.	147
Figura 8-1 Início das escavações e abertura da vala	164
Figura 8-2 Construção do abrigo subterrâneo e montagem do telhado	164
Figura 8-3 Preparação da base e colocação das caixas principais dos lisímetros e tanque de evaporação	165
Figura 8-4 Preenchimento dos espaços entre as caixas principais e a parede do abrigo subterrâneo e revestimento com grama batatais	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Categorias de serviços dos ecossistemas. Fonte Adaptado de <i>Millenium Ecosystem Assessment</i> (2005).	45
Tabela 3-2 Evapotranspiração média diária em milímetros para diferentes regiões do mundo (ALLEN et al., 1998).....	64
Tabela 3-3 Resumo dos métodos para observação (OBS) e estimativa (EST) da evapotranspiração. Adaptado de (WANG; DICKINSON, 2012)	65
Tabela 4-1 Instrumentos meteorológicos e medidas realizadas na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA)	74
Tabela 4-2 Descrição dos dados meteorológicos utilizados com a unidade de medição, tempo e horário de observação	76
Tabela 4-3 Granulometria do solo argiloso no <i>lis-arg</i> (CABRERA, 2011)	88
Tabela 4-4 Granulometria do solo arenoso no <i>lis-aren</i> (CABRERA, 2011)	89
Tabela 4-5 Faixa de valores do índice de desempenho (c) e as classificações qualitativas	102
Tabela 5-1 Evapotranspiração, chuva e área da superfície evaporante dos lisímetros cobertos com grama.....	126
Tabela 5-2 Relação de evapotranspiração estimada (ET_o) e observada nos lisímetros. Os coeficientes utilizando a ET_o FAO 56 com R_n igual à $0,48R_s$ também é mostrada.....	128
Tabela 5-3 Determinação monetária do impacto hídrico devido às perdas evaporativas nas cavas de mineração de areia em Campo Grande MS	145
Tabela 5-4 Determinação monetária do impacto hídrico devido às perdas evaporativas nas cavas de mineração de areia na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul no trecho entre Taubaté e Pindamonhangaba.	145
Tabela 8-1 Dados para construção do gráfico de variação da cobertura de grama batatais na superfície dos lisímetros referente à Figura 5-12.....	166
Tabela 8-2 Dados para construção do gráfico de correlação linear entre a temperatura média diária do ar e a irradiância solar global na estação climatológica do CRHEA referente à Figura 5-20 e Figura 5-29.....	167
Tabela 8-3 Dados para construção do gráfico de irrigação subsuperficial nos lisímetros durante os dias e as noites referente à Figura 5-24.....	169

Tabela 8-4 Dados para construção do gráfico de evaporação, chuva e insolação observados no tanque com nível referente à Figura 5-28.....	170
--	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
2	OBJETIVOS	32
2.1	Objetivos Gerais	32
2.2	Etapas de desenvolvimento	32
3	REVISÃO DA LITERATURA	33
3.1	Desenvolvimento Sustentável.....	33
3.2	Economia ambiental e ecológica	34
3.3	Valor econômico total	37
3.4	Métodos de valoração ambiental	40
3.5	Pagamentos de serviços ambientais.....	45
3.6	Mineração em cava.....	50
3.7	Balanço Hídrico e Água Azul/Verde.....	58
3.8	Evapotranspiração	62
3.9	Lisímetros	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1	Caracterização da Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA).....	73
4.2	Dados meteorológicos	75
4.3	Lisímetros e tanque de evaporação com nível constante.....	76
4.3.1	Funcionamento dos lisímetros e do tanque de evaporação	76
4.3.2	Descrição dos lisímetros (<i>lis-arg</i> e <i>lis-aren</i>) e tanque de evaporação (<i>tenc</i>)	77
4.4	Retirada do solo argiloso	83
4.5	Preenchimento do lisímetro com solo argiloso (<i>lis-arg</i>)	83
4.6	Retirada do solo arenoso.....	85
4.7	Preenchimento do lisímetro com solo arenoso (<i>lis-aren</i>).....	86
4.8	Caracterização física dos solos	88

4.8.1	Solo do lis-arg	88
4.8.2	Solo do lis-aren	89
4.9	Equipamento de monitoramento do nível de água	90
4.10	Operação e manutenção dos lisímetros e tanque de evaporação	90
4.11	Método de <i>Penman-Monteith</i> <i>FAO-56</i>	91
4.12	Balanço hídrico	95
4.13	<i>ETgage</i> e razão de <i>Bowen</i>	96
4.14	Tanque 20 m ²	97
4.15	Método de Linacre	99
4.16	Cobertura de grama	99
4.17	Umidade do solo	100
4.18	Análise estatística	101
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	102
5.1	Precipitação e temperatura	102
5.2	Consumo de água (irrigação) e umidade nos lisímetros	104
5.3	Drenagem nos lisímetros	118
5.4	Saldo de radiação e insolação	120
5.5	Evapotranspiração	125
5.6	<i>ETgage</i> e Método da Razão de <i>Bowen</i>	130
5.7	Evaporação nos tanques	133
5.8	Balanço Hídrico	137
5.9	Análise comparativa das perdas evaporativas nos lisímetros e tanques	139
5.10	Valoração ambiental da proteção exercida pela cobertura do solo	141
5.11	Determinação do impacto ambiental usando o método custo de reposição	144
5.12	Projeções utilizando séries de 50 anos para o impacto minerário	146
6	CONCLUSÕES	147
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
8	APÊNDICES	164

8.1	Detalhes dos lisímetros, tanque de evaporação e montagem.....	164
-----	---	-----

1 INTRODUÇÃO

A garantia de um suprimento hídrico com qualidade e quantidade é um pré-requisito para a segurança alimentar, saúde pública, proteção de ecossistemas e diversas finalidades. Isto faz com que as maiores reservas de água doce disponíveis no globo, as subterrâneas, tenham uma importância essencial para atingir todas as metas de desenvolvimento estabelecidas em 18/09/2000 e contidas na Declaração do Milênio (<http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.pdf>) (ONU, 2000). Dentre as metas listadas nessa declaração, pode-se destacar: diminuir em 50 % até o ano de 2015 a proporção de pessoas sem acesso à água potável e reduzir também à metade a proporção de pessoas que sofrem de fome (SCHUOL et al., 2008). As metas relacionadas à água não foram atingidas, apenas aquela ligada à pobreza e a fome, segundo uma reportagem da *British Broadcasting Corporation* (BBC) veiculada no Brasil em junho de 2014.

Os recursos hídricos são importantes insumos para as atividades econômicas as quais geram uma ampla gama de alterações sobre as águas. Uma atividade essencial à fixação do homem em um determinado local é a construção civil. As atividades ligadas a ela, como por exemplo a mineração, estão dentre as atividades de maior relevância para a sociedade. A quantidade de materiais como brita, areia e ferro consumidos pela sociedade também refletem o grau de desenvolvimento econômico. Para prover estes insumos, as atividades de mineração causam significativas mudanças na paisagem, cobertura do solo e consequentemente, na quantidade e qualidade das águas.

Recentemente, no dia 05/11/2015, a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Minas Gerais foi o maior desastre ambiental do país causado por um empreendimento de mineração. O colapso da barragem, em um momento que a vazão do Rio Doce estava abaixo do valor esperado segundo o boletim de novembro/2015 da ANA, diminuiu ainda mais a qualidade da água do rio, prejudicando todas as atividades ligadas aos recursos hídricos (ANA, 2015). Há vários estudos sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais ligados à atividade minerária, incluindo aqueles sobre o acúmulo de constituintes devido à evaporação da água de minas (EARLY, 1998; HAN et al., 2009; YOKO et al., 1997).

A drenagem das minas é outro efeito negativo das atividades mineradoras, causando o rebaixamento do nível de água subterrânea. Este, quando presente em regiões com poços de abastecimento e irrigação, pode inviabilizar a extração da água (GRAY, 1998; YOUNGER; WOLKERSDORFER, 2004).

Os empreendimentos minerários são grandes consumidores de água. Somente no Brasil existem 663 barragens de contenção de rejeitos de mineração (ANA, 2014). O Brasil possui 23.037 espelhos d'água com área a partir de 20 hectares, sendo 6.929 artificiais e 16.108 naturais (MENESCAL et al., 2009). A mineração de cobre no mundo utilizou mais de 1,3 bilhão de m³ de água em 2006 (GUNSON, 2010). Entretanto, em escala global, as atividades mineradoras usam apenas uma pequena porção de água comparativamente com a irrigação. Em países com extensas regiões áridas como Austrália, Chile e África do Sul, a mineração sozinha tem uma demanda de 2,0 a 4,5% de água (BANGERTER et al., 2010; BROW, 2003).

Apesar dos impactos causados ao meio ambiente, a atividade de mineração é imprescindível ao desenvolvimento humano. A demanda por matéria prima (minérios) é cada vez maior conforme ilustra a Figura 1-1.

Figura 1-1 Produção em toneladas de areia, brita, ferro e aço no Brasil, Estados Unidos e no Mundo. Dados retirados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e U.S. *Geological Survey* (USGS).

Tendo em vista as perspectivas de aumento da produção mineral, é preciso determinar a quantidade de água perdida das reservas subterrâneas quando existe uma dinâmica hídrica alterada por tal atividade. A extração de minérios em cavas é uma prática comum. A cava de mineração com grande destaque nacional é a do garimpo de Serra Pelada em Curionópolis - PA. Em Paracatu - MG, assim como em Serra Pelada, a extração do ouro está modificando a superfície e alterando as águas superficiais e subterrâneas.

Na região do Quadrilátero Ferrífero, a atividade mineradora originou várias cavas inundadas. Nessa região há uma preocupação da sociedade em relação aos impactos nos aquíferos da região e, consequentemente, nos estoques hídricos da bacia do Rio das Velhas, principal manancial responsável por abastecer 2,5 milhões de habitantes da cidade de Belo Horizonte MG (REBOUÇAS et al., 2006). Na bacia do rio Paraíba do Sul, a mineração em

cavas é responsável pelo fornecimento de areia para a construção civil na Região Metropolitana de São Paulo. Essa atividade vem transformando a superfície vegetada em inúmeros espelhos d'água, o que pode comprometer o armazenamento de água nessa bacia. A produção de água dessa bacia é fundamental para os 6,3 milhões de habitantes da cidade do Rio de Janeiro.

A bacia de Paraíba do Sul passou por um período de seca no ano de 2014. As alterações no uso do solo causadas pelo homem aliado à variabilidade pluviométrica produzem modificações nas entradas de água, bem como interferem no armazenamento da bacia. A mineração em cava é uma atividade que substitui a superfície vegetada por um espelho d'água (lagoa), formado por contribuições de águas subterrâneas e superficiais. Dessa forma, uma quantidade de água armazenada no solo é disponibilizada para a superfície livre e, posteriormente, perdida em função da evaporação. Essa perda de água por evaporação é o principal fator a ser considerado na gestão de água em reservatórios (JOHNSON; SHARMA, 2010).

A formação de superfícies de água em áreas mineradas tem impacto direto no balanço hídrico, afetando os fluxos de água como a evapotranspiração e a recarga de aquíferos. Isso é devido ao esperado aumento da evaporação quando comparado com a evapotranspiração. A evaporação de superfícies livres, como, por exemplo, lagos e banhados, frequentemente representa grandes perdas no ciclo hidrológico local, acarretando em uma menor disponibilidade hídrica (ASSOULINE et al., 2008; MENGISTU; SAVAGE, 2010).

Devido à grande área superficial das cavas abertas inundadas, pouco pode ser feito para reduzir as perdas por evaporação, o que torna ainda mais importante prever com precisão essas perdas evaporativas. A utilização de modelos matemáticos é uma alternativa para a previsão dessas perdas evaporativas.

Um artigo de revisão publicado na *Nature Climate Change*, periódico internacional de alto impacto, alertou que a mudança de cobertura do solo nas áreas tropicais produz importantes respostas no clima (WOHL et al., 2012). (JUNG et al., 2010) descreveram que mais da metade da energia solar recebida pela superfície é usada para evaporar a água. Assim, há um interesse da comunidade científica nacional e internacional na quantificação do impacto minerário nas taxas de evaporação, principalmente com dados de campo confiáveis em faixas tropicais.

A Lei n.997/76 da Resolução SMA n.51/06 prevê a obrigação de o empreendedor minerário solicitar a Licença de Operação, apresentando um Plano de Recuperação da Área

Degradada (PRAD). Nos Relatórios de Impactos Ambientais não há menções sobre impactos no ciclo de água ou nos recursos hídricos subterrâneos antes e depois da instalação das cavas de mineração, não contabilizando as mudanças de fluxos e a perda de água para atmosfera. Essa pesquisa é relevante para conhecer e avaliar o efeito da mineração, até então negligenciado, na outorga de recursos hídricos. Mesmo na literatura especializada, como o capítulo 13 “Água e Mineração” da obra “Águas Doces no Brasil” ou no livro “Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração” não há menções de estudos científicos quantificando este tipo de impacto da atividade mineradora nos recursos hídricos (PINHEIRO, 2011; REBOUÇAS et al., 2006).

Na literatura internacional, o mais prestigiado periódico na área de água e mineração, *Journal of International Mine Water Association*, também não tem publicações a respeito da mudança no balanço hídrico, especialmente a quantidade de água perdida para a atmosfera e a mudança no conteúdo de água do solo, devido às alterações de sua cobertura ocasionada pelas cavas de mineração.

Neste sentido, surgem alguns questionamentos. A proteção exercida pelo solo, como a de cobertura dos estoques hídricos subterrâneos, frente ao poder evaporante da atmosfera pode ser considerado desprezível na manutenção da quantidade dos aquíferos? Ainda, poderia este serviço ser valorado economicamente e de forma simples em cavas de mineração?

Na situação anterior à cava de mineração, a cobertura de solo presta um serviço ambiental que é a proteção e a manutenção das reservas hídricas. Essa atividade ainda não foi contemplada economicamente no licenciamento e Programa de Recuperação de Áreas Degradadas em cavas de mineração.

O presente estudo é necessário ao zoneamento ambiental de mineração instituído pela Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo conforme disposto na Resolução SMA n.28/99 e também pela recente Resolução SMA 16 de 28/04/2011, que instituiu um Grupo Técnico para proceder a “Revisão do zoneamento ambiental das áreas com atividade minerária de extração de areia na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo, e para estudar medidas de recuperação de áreas degradadas por essa atividade”.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

- Quantificar experimentalmente as modificações nas variáveis do balanço hídrico quando há a substituição de uma superfície vegetada por água livremente exposta à atmosfera;
- Fornecer uma ferramenta simples para auxiliar na previsão das perdas evaporativas no licenciamento e recuperação de áreas degradadas em cavas de mineração;
- Valorar economicamente o impacto prévio nas reservas hídricas subterrâneas devido à mudança de evapotranspiração para evaporação de água livre em áreas mineradas por cavas.

2.2 Etapas de desenvolvimento

- Medir a evapotranspiração da grama batatais (*Paspalum notatum L.*) em dois lisímetros de drenagem com nível constante, sendo um com solo argiloso (*lis-arg*) e outro arenoso (*lis-aren*);
- Quantificar a evaporação de superfície livre utilizando dois tipos de tanques e analisar a evaporação observada no tanque de nível constante (*tenc*) em relação ao tanque 20 m²;
- Com base em série de medidas meteorológicas realizadas sobre um gramado, estimar a evapotranspiração de referência com o método de *Penman-Monteith* padronizado pela *FAO 56*;
- Determinar a evapotranspiração de grama batatais (*Paspalum notatum L.*) com o método micrometeorológico da razão de *Bowen* (MRB);
- Quantificar o saldo de radiação em uma superfície gramada;
- Medir a evapotranspiração com um atmômetro de cápsula porosa e lona verde modelo *ETgage* e verificar o desempenho desse instrumento na estimativa da evapotranspiração com o método da razão *Bowen*;
- Construir curvas de evapotranspiração e evaporação acumuladas;
- Realizar a valoração monetária da proteção do solo, auxiliar na identificação e previsão do impacto das perdas evaporativas no licenciamento da mineração com cava.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Desenvolvimento Sustentável

A preocupação com a poluição e os impactos nos recursos ambientais advindos das atividades antrópicas ao longo dos anos, principalmente após a revolução industrial, introduziram mudanças para incorporar as questões ambientais na política.

Segundo Costanza et al., (1997), os problemas básicos para os quais precisam de políticas inovadoras e instrumentos de gestão incluem:

- Falta de sustentabilidade com o crescente aumento da população humana que excedem a capacidade de carga da Terra;
- Crescimento tecnológico nas atividades industriais que proporcionou o aumento da escala de intervenção na terra e origina resíduos que poluem o ar, a água e a terra;
- Mudança da superfície terrestre com destruição de habitats de espécies, redução da biodiversidade e aumento da erosão dos solos.

Em 1987, a ideia do desenvolvimento sustentável ganhou projeção internacional com a publicação do relatório *Brundtland*, elaborado pela primeira ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. A definição de desenvolvimento sustentável segundo esse relatório é: *“Desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades”* Nota-se que esta definição busca harmonizar o desenvolvimento econômico e as matrizes dos recursos naturais (ONU, 1987).

Vinte anos após o encontro de Estocolmo, as bases para os próximos encontros entre líderes globais já estavam lançadas. A Conferência do Rio em 1992 reuniu 178 nações que discutiram temas direcionados para a conservação ambiental, a qualidade de vida na Terra e a consolidação política e técnica do desenvolvimento sustentável.

Outras reuniões surgiram com a adoção do ideário sustentável, como por exemplo em 1997 o Protocolo de Quioto (mudanças climáticas). Novamente no Rio de Janeiro em 2012, a conferência Rio+20 mobilizou a comunidade global para discutir a realidade ambiental e o *modus operandi* do desenvolvimento econômico e do ambiente (JACOBI; SINISGALLI, 2012). Já em dezembro de 2015, a Conferência do Clima (COP21) foi a cúpula climática com mais participações. Nesta, foi aprovado o primeiro acordo de extensão global para frear as emissões de gases do efeito estufa visando amenizar os impactos da mudança climática.

A aplicação dos preceitos de sustentabilidade nas economias está ligada diretamente ao modelo de consumo atual, sendo necessário que a sociedade reflita sobre o sistema econômico vigente. Como destaca May (2010), alcançar a sustentabilidade implica em um gigantesco desafio de promover uma alteração de ordem civilizacional, de uma “civilização do ter para uma civilização do ser”, fazendo a ressalva que essa mudança não pode perder o dinamismo científico e tecnológico intrínseco da sociedade moderna.

De acordo com Novion e Valle (2009) no desenvolvimento sustentável existem duas principais correntes básicas de interpretação econômica, a Economia Ambiental e a Economia Ecológica, as quais serão discutidas a seguir.

3.2 Economia ambiental e ecológica

A produção de bens materiais transacionados no mercado, tais como insumos, matéria prima, alimentos, energia e produtos, decorre das atividades antrópicas para satisfazer a necessidade das sociedades. Após a revolução industrial, esta produção aumentou a escala de transformação das paisagens e a pressão exercida pela espécie humana sobre os recursos naturais do planeta. A capacidade de carga do planeta, ou seja, seus limites não são e nunca serão efetivamente conhecidos de modo preciso, por mais que a ciência avance. É dever da sociedade, portanto, adotar uma postura de precaução para não esgotar os recursos naturais. Assim, faz-se necessário estabelecer premissas e conceitos fundamentados no desenvolvimento sustentável para exercer com respaldo técnico e teórico o princípio da precaução (Figura 3-1).

Figura 3-1 Principais correntes de interpretação do desenvolvimento sustentável para as políticas públicas, adaptado (MAY, 2010).

A economia ambiental considera a natureza, o meio ambiente ou a biosfera como partes ou setores da macroeconomia: florestal, pesqueiro, mineral, agropecuário, áreas protegidas, pontos ecoturísticos, etc. Já para economia ecológica, a macroeconomia é parte integrante de um todo bem mais amplo, que a envolve e a sustenta, a ecossistêmica. Esta expressão foi cunhada por Samuel Murgel Branco, um dos mais importantes ecólogos brasileiros e fundador do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (local onde foi desenvolvida a parte experimental desta investigação).

A teoria da economia convencional afirma que não há limites impostos pelo ambiente ao crescimento da atividade humana. Este, por sua vez, não ocorre no vazio e não é gratuito, tendo um custo que pode vir a ser mais elevado que o benefício, proporcionando um crescimento “às avessas” (MAY, 2010).

A incoerência básica da abordagem convencional da produção está em reduzir o processo a uma questão de alocação. Esse método trata todos os fatores como se fossem de natureza igualitária, supondo que a troca entre eles não tem limites e que o fluxo de recursos naturais pode ser fácil e indefinidamente trocado por capital (ROMEIRO, 2004).

Outras grandes incoerências da abordagem convencional são ignorar o fluxo inevitável de resíduos e apostar na substituição ilimitada dos fatores. Maquinário e equipamentos não podem suprir fatores primários de produção, isto é, insumos naturais. O capital natural não pode ser trocado por capital construído, pois estes são complementares (MAY, 2010).

O arcabouço conceitual da economia ambiental (neoclássica) se mostra fragilizado uma vez que apresenta uma falta de reflexão sobre as relações historicamente estabelecidas entre a sociedade e a natureza. É nessa questão que se apoia a economia ecológica.

A economia ecológica, ao contrário da ambiental, reconhece que o mercado é apenas um possível mecanismo para alocação. Na economia ecológica, a alocação eficiente é importante, mas está longe de ser o objetivo principal.

A economia ecológica vê a Terra como um navio e o material bruto da produção econômica como a carga desse navio. A navegabilidade do navio é determinada pela saúde ecológica, pela disponibilidade de recursos e o formato do navio (DALY; FARLEY, 2004). Esses autores destacam que a economia ecológica reconhece que estamos navegando em águas desconhecidas e ninguém pode prever o tempo de viagem, por isso não sabemos exatamente quão pesada é a carga para deixar a viagem segura, entretanto se a carga estiver muito pesada fará que o navio afunde.

A economia convencional não considera a natureza como externalidade do processo econômico; a economia ambiental se atenta em dar preço (valor) à natureza, com a indicação de vê-la como amenidade, enquanto a economia ecológica dá à natureza a condição de suporte insubstituível de tudo o que a sociedade pode fazer (CAVALCANTI, 2010).

Externalidades são manifestações de preços totalmente ineficientes, que afetam o bem-estar do indivíduo (MAY, 2010). As externalidades estão presentes sempre que terceiros ganham não pagando por benefícios marginais ou ficam com o ônus sem ser compensados por suportarem o malefício adicional (MOTTA, 1998). O mercado valoriza corretamente o bem ou serviço se o sistema de preços funciona livremente e, para tanto, é necessário trabalhar com bens que seguem os princípios básicos da rivalidade e da exclusividade, assim, para atingir a eficiência econômica exige que se atribua o “preço correto” (MOTTA, 1998).

O desafio de colocar valor monetário a bens e serviços ecológicos é comprovar cientificamente que eles valem aquilo que os cálculos descrevem além de estimar ativos naturais somados a ativos antrópicos, tornando-os substituíveis (CAVALCANTI, 2010).

Cavalcanti (2010) destaca que o conceito de sustentabilidade ecológica deve ser lembrado como a manutenção de estoques físicos de capital natural, não a de seus similares valores monetários. Segundo esse autor, a visão ecológica da economia não pode ser confundida com a economia ambiental (Figura 3-2). Ainda, analisando o ponto de vista desse autor, o estudo econômico com base em princípios ecológicos tem como meta promover a modelagem perfeita dos elos que fazem as interfaces entre sistemas naturais e econômicos ou produtivos.

Figura 3-2 Visão esquemática do posicionamento das vertentes econômicas, frente à ecologia e a economia (CAVALCANTI, 2010).

Maiores detalhes sobre a economia ecológica e a convencional podem ser vistos nos trabalhos de Costanza, (1991); Costanza et al., (1997); Daly e Farley, (2004); May, (2010) e Romeiro, (2004).

A visão otimista presente no ideal de desenvolvimento sustentável tem que ser combinada ao ceticismo da razão e esse ceticismo só está presente na economia ecológica (MAY, 2010).

O desafio para a economia ecológica na escala de bacias hidrográficas é fornecer um quadro analítico de informações coerente com os estoques naturais, visando o apoio à decisão, que é normativa e positiva, a descrição desse quadro deve estar aberta a várias métricas e pontos de vista (ERICKSON et al., 2007). Na economia ecológica um desafio adicional é a transferência de métodos integrados entre diversos contextos ambientais e sociais.

A ineficiência na utilização dos recursos naturais ocorre devido às falhas de mercado, deficiências que são provenientes do fato que alguns bens e serviços ambientais não têm apropriação privada. Reparadas estas falhas, soluções eficientes para a utilização dos recursos naturais poderiam ser obtidas através do mercado. Por exemplo, a escassez crescente de um bem ou serviço ambiental aumenta seu preço e introduz inovações poupadoras deste bem ou serviço, seja pelo aumento na eficiência no seu uso, seja pela troca por outro recurso mais facilmente disponível (MAY, 2010). Na tentativa de corrigir essas imperfeições são utilizados preços, aplicados aos bens e serviços ambientais públicos, através de métodos de valoração econômica, que mensuram a disposição a pagar dos agentes econômicos por determinado bem ou serviço ambiental.

3.3 Valor econômico total

Visando alcançar o desenvolvimento sustentável por meio da economia ecológica, faz-se necessário que os bens e serviços ambientais fiquem anexados à contabilidade econômica dos países (MATTOS, 2002). Quantificar o valor econômico de um recurso ambiental é estimar o valor monetário deste em relação aos outros bens e serviços da economia (MOTTA, 1998). Para mensurar os recursos naturais, podem-se utilizar valores monetários como padrão de medida. O valor econômico do meio ambiente tem sido objeto de intensa discussão e pode ser consultado nos trabalhos de Amazona, (2009); Cirino e Lima, (2008) e Dechen et al., (2015).

Os múltiplos usos da água e a necessidade da sociedade e dos ecossistemas por esse elemento, tem o tornado cada vez mais escasso, condição esta que desperta o interesse da economia e, conseqüentemente, a atribuição de um valor econômico (REBOUÇAS et al., 2006). Porém, a ausência de preços para os recursos ambientais e os serviços por ele prestados acarreta no uso excessivo e indiscriminado deste recurso (SILVA, 2008).

Avaliações econômicas mais exatas e precisas resultarão certamente no aprimoramento da gestão pública de bens e serviços ecossistêmicos. Esses são serviços de caráter público que não são transacionados no mercado e, portanto, não tem preços definidos (MOTTA, 1998).

A valoração é o ato de atribuir valor a algo, por exemplo, a valoração econômica de árvores urbanas é a busca para expressar uma relação de funcionalidade das árvores com a população. Pode-se assumir que esse valor é dado pela união entre sujeito e objeto (árvore), adicionado com interpretações econômicas, sociológicas, ambientais, psicológicas, políticas, religiosas e de moral (TOSETTI, 2012).

Existe um grande número de situações reais que são necessárias às valorações ambientais. Para isso, é prudente que todos os métodos de valoração ambiental tenham em comum o ponto de conceituar e mensurar as gratificações ambientais que as pessoas almejam e quanto elas estão dispostas a pagar por esses benefícios (ROMERO, 1997).

Nos estudos de valoração ambiental é comum denominar o valor econômico como VERA (valor econômico do recurso ambiental) ou VET (valor econômico total). O VET ou VERA pode ser dividido em valores de usos e valor de não uso (MATTOS, 2002; MOTTA, 1998; SILVA, 2008).

Os valores de usos podem ser particionados em valores de uso direto (VUD), valores de uso indireto (VUI) e valor de opção ou valor de uso potencial (VO). Já o valor de não uso pode ser denominado também de valor de existência (VE). O arranjo matemático do VET ou VERA é apresentado segundo a Equação 1.

$$VET \text{ ou } VERA = (VUD + VUI + VO) + VE \quad (\text{Equação 1})$$

Valor de uso direto (VUD) ocorre quando o indivíduo utiliza de um recurso, por exemplo, na forma de extração, visitação ou outra atividade de produção ou consumo direto. No valor de uso indireto (VUI), o benefício atual do recurso parte das funções ecossistêmicas, por exemplo, a proteção do solo, a qualidade da água produzida na bacia e a estabilidade climática decorrente da preservação das florestas. Já o valor de opção (VO), a pessoa dá valor em usos direto e indireto que poderão ser usufruídos em um futuro próximo e cuja conservação pode ser ameaçada. Por exemplo, o benefício advindo de fármacos elaborados com base em propriedades medicinais, ainda não descobertos da biota. O valor de opção refere-se à disponibilidade do recurso ambiental para uso futuro, e pode ser estimado por projeções baseadas em dados históricos, como mostrado na Equação 2, onde VF é o Valor Futuro e DAP é a disposição à pagar.

$$VO = VF + DAP \quad (\text{Equação 2})$$

A DAP aborda incertezas sobre a disponibilidade conectada à procura do bem no futuro. Assim, o valor de opção pode ser positivo ou negativo, dependendo das predileções futuras dos indivíduos.

O valor de não uso (ou valor passivo - VNU) representa o valor de existência (VE) que está combinado ao uso (embora represente consumo ambiental). Ele é derivado de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de espécies não humanas ou preservação de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para o indivíduo. É um valor dado pelas pessoas a certos recursos naturais, como florestas e animais em extinção, mesmo que não usem ou apreciem. O VNU pode ser diferenciado entre o valor de legado (VL) e o valor de existência (VE), conforme a Equação 3.

$$VNU = VL + VE \quad (\text{Equação 3})$$

Detalhadamente, a equação do VET pode ser representada segundo a Equação 4.

$$VET = (VUD + VUI + VF + DAP) + (VL + VE) \quad (\text{Equação 4})$$

O valor de uso é atribuído por aquelas pessoas que usufruem o meio ambiente em risco. Os valores de uso direto e indireto estão associados com as possibilidades presentes de uso dos recursos (MATTOS, 2002). Mattos (2002) destaca que o valor de opção é aquele que pessoas que não usufruem o meio ambiente atualmente atribuem a ele.

O valor de não uso traduz um valor que reside nos recursos ambientais, sem necessariamente haver uma relação de causa e efeito com seres humanos, de uso efetivo atual ou de possibilidade de uso futuro (MARQUES; COMUNE, 1995). Esse conceito de valor de existência pode ser a ligação entre economistas e ecólogos, proporcionando um melhor e mais profundo entendimento da questão ambiental, na tentativa de absorver todos os valores que um recurso ambiental possa conter (MATTOS, 2002; SILVA, 2008).

Assim, um determinado tipo de uso pode ser excludente em relação a outro tipo de uso do recurso ambiental. Por exemplo, o uso de área para agropecuária exclui seu uso para conservação da floresta que cobria este solo. O estágio inicial para mensurar o VET ou VERA é identificar esses usos excludentes; o segundo passo é quantificar esses valores. Por isto, a tarefa para encontrar preços de mercado adequados que representem os valores dos recursos naturais é extremamente complicada, e esse obstáculo é aumentado à medida que caminhamos no valor de uso para não uso (MOTTA, 1998).

A valoração econômica do meio ambiente tem passagem obrigatória na quantificação do VET ou VERA, para que se possa analisar o bem ou serviço ambiental prestado. Como o valor total do meio ambiente não pode ser mensurado na sua totalidade por relações de mercado, grande parte de seus componentes não são comercializados e os preços fixados pelo jogo econômico não refletem o conjunto de recursos usados na produção (MARQUES; COMUNE, 1995).

A Figura 3-3 ilustra as classes de valores e expõe os detalhes de cada classe que compõe o VET.

Figura 3-3 Categorias de valores econômicos atribuídos ao patrimônio ambiental e descrição detalhada com exemplos por classe discriminada (MUNASINGHE, 1992).

Os métodos de valoração do meio ambiente estimam o valor total através do valor de uso, de opção e de existência. Essas técnicas podem ser agrupadas em conjuntos com base nos seus comportamentos e no tipo de mercado que a utiliza seja o mercado convencional, implícito ou construído (MUNASINGHE, 1992).

3.4 Métodos de valoração ambiental

A contabilização da degradação dos recursos ambientais deve ser valorada de acordo com a classificação do recurso, o qual pode ser de fluxo ou exaurível. Esta distinção é necessária face à característica intrínseca que cada um apresenta, isto é, degradação ou esgotamento (SILVA, 2008).

Os objetivos dos métodos de valoração ambiental consistem em determinar quanto melhor ou pior ficará o bem-estar das pessoas devido às alterações na quantidade (escassez ou abundância) de bens e serviços ambientais. Assim, a metodologia de valoração atenderá o objetivo a que foi proposta se for capaz de captar esses distintos compartimentos de valores econômicos (MOTTA, 1998).

Segundo May (2010) os métodos de valoração podem ser classificados em:

1. Métodos que se baseiam no mercado de bens substitutos
 - a. Custo de recuperação ou reposição
 - b. Custo de controle
 - c. Custo de oportunidade
 - d. Custo irreversível
 - e. Custo evitado
 - f. Produtividade marginal
 - g. Produção
2. Métodos de preferência revelada
 - a. Custo de viagem
 - b. Preço Hedônico
3. Métodos de preferência declarada
 - a. Valoração Contingente
 - b. *Conjoint analysis* (análise conjunta)
4. Método de função efeito
5. Métodos multicritérios
6. Métodos de valoração de fluxos de matéria e energia

No geral, os métodos de valoração não apresentam uma classificação estática, podendo-se utilizar vários enfoques dependendo do propósito. Motta (1998) descreve 13 estudos de casos envolvendo métodos de valoração. May et al., (2000) fazem uma análise em estudos de caso envolvendo a valoração econômica da biodiversidade nos principais biomas brasileiros.

No mercado, há uma constante interação entre produtores e consumidores, porém, recursos da natureza não tem cotação nos mercados tradicionais. Portanto, é comum estimar os preços desses recursos via técnicas de mercado de bens substitutos. A analogia com mercado de bens substitutos facilita a estimativa do preço do ativo ambiental de forma bem simples e objetiva. Para isso, adota os princípios da permuta com outro bem substituto e o consumidor não perde o bem-estar em relação ao bem consumido anteriormente.

Os métodos da categoria de bens substitutos se baseiam em preços de mercado de bens privados cuja produção é afetada pela disponibilidade de bens e serviços ambientais ou que são substitutos ou complementares a eles. Devido a essa característica, esses métodos de valoração monetária não retratam mercados alternativos para serviços ambientais especiais.

O método de preferência revelada (também denominado de função da produção) é composto por dois tipos, o custo de viagem e o preço hedônico. Os métodos de função de produção analisam casos onde o recurso ambiental está associado à produção de um recurso privado e, geralmente, assumem que as variações na oferta do recurso ambiental não alteram os preços de mercado (MATTOS, 2002).

O método do preço hedônico tem esse nome em referência ao Hedonismo, doutrina que leva em conta que o prazer individual e imediato é o único bem possível, tendo como princípio e fim da vida moral (MAY, 2010).

Para se aplicar preços em qualquer tipo de mercadoria, com uso mais frequente em propriedades, o método de preços hedônicos é largamente utilizado. Esse método é utilizado também para valorar efeitos como: a sensação de ouvir uma boa música e o apreço por uma boa obra de arte. Já o método custo de viagem é usado para valorar sítios naturais de visitação pública (SILVA, 2008).

Maia e Romeiro (2008) aplicaram e testaram a validade e a confiabilidade do método de custo de viagem no Parque Nacional de Serra Geral, entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Ortiz et al., (2000) mediram o valor ambiental do Parque Nacional do Iguaçu utilizando também este método.

Outro método existente é o da valoração contingente, o qual é mais indicado nas seguintes situações (SILVA, 2008):

- Bens de propriedade comum cujo consumo é imprescindível à sobrevivência humana;
- Recursos de amenidades, tais como característica paisagística, cultural, ecológica, histórica ou singular;
- Situações em que dados sobre preços são indisponíveis ou ausentes no mercado.

Silva (2008) relata que em muitos casos esse é o único método capaz de captar valores de existência de bens e serviços ambientais e é perfeitamente adaptável a grande maioria dos problemas ambientais.

Esse aspecto de fácil aplicação é o ponto forte do método de valoração contingente, garantindo a sua aplicação em uma gama de situações variadas. No entanto, a crítica desse método é a sua limitação de captar valores ambientais de pessoas que não entendem ou desconhecem os serviços ecossistêmicos (MOTTA, 1998). Se durante a simulação com mercados hipotéticos via questionários em campo, as pessoas são capazes de captar e entender o correto funcionamento de um ecossistema que está sendo apresentada na pesquisa de valoração, elas são induzidas a revelar sua verdadeira disposição a pagar (DAP) ou disposição a aceitar (DAA) (MOTTA, (1998). Se não entendem, no entanto, elas não são capazes de atribuir um valor a ser pago pelo serviço.

Venkatachalam (2004) em seu estudo faz uma revisão sobre o método da valoração contingente, apontando a existência de críticas relacionadas à confiabilidade dos resultados. Entretanto, esse método da valoração contingente é bastante utilizado no contexto de florestas urbanas (TOSETTI, 2012).

Viana et al., (2012) fizeram um levantamento dos métodos de valoração mais empregados em arborização urbana nos últimos 10 anos em periódicos de importância internacional. Os autores encontraram que o método do valor contingente, seguido do hedônico, são os mais frequentes.

May (2010) descreve que o governo dos Estados Unidos, após o derramamento de óleo bruto do petroleiro *Exxon Valdez* no Alasca, aplicou o método de valoração contingente com o objetivo de avaliar os danos e obrigar a *Exxon Corporation* a ressarcir os prejudicados. O autor descreve que este método foi utilizado para propor técnicas econométricas que abordem o máximo de vieses fornecendo maior credibilidade à valoração. Esse mesmo autor cita que o método da valoração contingente é o mais usado dentre todas as metodologias referenciadas, tendo mais de 2000 pesquisas publicadas. Segundo Motta (1998) a valoração contingente também é o único método com potencial de captar o valor de existência (VE).

A Mata Atlântica brasileira é reconhecida globalmente como uma das florestas tropicais com maior biodiversidade. A Mata Mesófila Semidecídua figura entre os biomas mais fragmentados e ameaçados do Domínio de Mata Atlântica. Um dos maiores remanescentes deste bioma (35000 hectares) é o Parque Estadual Morro do Diabo, estado de São Paulo. Adams et al. (2008) aplicaram o método da valoração contingente para estimar a disposição a pagar (DAP) da população da vizinhança. Os resultados desse estudo mostraram uma alta quantidade de DAPs nulos e votos de protesto, entretanto a população está disposta a pagar R\$ 7.080.385,00 por ano pela conservação do parque. Os autores indicaram que o valor da

preservação está intrinsicamente vinculado à capacidade de pagamento da população, o qual aumenta com o nível de renda.

Rivas et al. (2009) mostraram resultados opostos, indicando que a qualidade ambiental não é um bem de luxo, descrevendo que pessoas com baixa renda possuem alta demanda por qualidade ambiental. Os autores abordaram a conservação de recursos naturais com a técnica da análise conjunta (*Conjoint analysis*) para estimar a DAP das comunidades que vivem à margem do rio Amazonas/Solimões para evitar danos ao ecossistema. Neste método, os indivíduos receberam um conjunto de cartões, em cada um deles uma situação diferente foi descrita relativas ao recurso ambiental. Essa metodologia é aplicada quando o cenário hipotético é pouco compreendido pelos entrevistados, como a valoração de recursos naturais por indígenas, por exemplo (MAY, 2010).

Métodos multicritérios tentam unir a abordagem neoclássica e a ecológica no aspecto da mensuração de valores da biodiversidade e, com isso, avançar no objetivo de atingir unidades comuns de avaliação, essa metodologia reconhece o problema da incerteza e ausência de dados. A valoração do balanço dos fluxos de matéria e energia, um método de multicritério, tem como princípio integrar à valoração ambiental aos princípios da economia ecológica, fazendo uma análise integrada entre insumo-produto em um sistema onde há uma troca permanente de materiais, energia e produtos. Dessa maneira, essas relações são mais bem avaliadas via balanço de massa e energia (MAY, 2010).

Como mencionado anteriormente, valorar o ambiente é estimar um preço para eventual dano ou passivo ambiental ocasionado por intervenção humana. Neste trabalho, o conceito de valoração será aplicado à atividade minerária com cavas e sua consequente formação de superfície livre, culminando no aumento da evaporação líquida e possível impacto nos estoques hídricos subterrâneos.

Tavares et al. (1999) realizaram uma pesquisa sobre a valoração ambiental na ótica da gestão das águas, relatando que a monetarização ambiental é uma ferramenta de apoio na tomada de decisão envolvendo recursos hídricos para subsidiar processos de outorga.

A base conceitual da valoração ambiental é dada pela economia neoclássica que precisa ser complementada com ideais da economia ecológica para avançar nessa questão complexa e desconhecida de perdas evaporativas em ambiente de mineração. Assim, será possível progredir na formulação de políticas públicas para essa situação negligenciada, permitindo colocar econometria aos serviços ambientais prestados pela natureza.

3.5 Pagamentos de serviços ambientais

O crescimento econômico faz com que a renda per capita aumente, sendo que nos estágios iniciais desse processo a degradação ambiental é intensificada até um determinado ponto. Somente então, a qualidade ambiental começa a melhorar (MAY, 2010). Esse autor explica que nos estágios iniciais do desenvolvimento econômico a crescente degradação do ambiente é aceita como um efeito colateral ruim, mas inevitável. A Lei da Política Nacional do Meio Ambiente define degradação ambiental como “alteração adversa das características do meio ambiente” (art.3 inciso II). Contudo, a partir de um nível de bem-estar econômico a população fica mais sensível e disposta a pagar pela melhoria da qualidade do meio ambiente (MAY, 2010). Assim com a melhor distribuição de renda, cria-se um momento para corrigir as falhas de mercado decorrentes da essência pública da maior parte dos serviços ambientais. Isso pode evitar e diminuir a socialização do prejuízo ambiental.

De que maneira devemos cobrar por serviços que anteriormente eram fornecidos de graça pela natureza? Quais compensações financeiras podem ser distribuídas para aqueles que mantem serviços ambientais? Estes questionamentos aliados às falhas de mercado permitem introduzir a temática dos serviços ambientais nas políticas públicas e gestão dos recursos naturais (ROMEIRO, 2004).

Existem diversas definições para os serviços ambientais e serviços ecossistêmicos, porém a mais aceita é aquela dada pelas Nações Unidas na Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment*) (ASSESSMENT, 2005). Segundo esta, serviços ecossistêmicos são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas. Entre eles, incluem serviços de provisões, regulação, suporte, e culturais, os quais são exemplificados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Categorias de serviços dos ecossistemas. Fonte Adaptado de *Millenium Ecosystem Assessment* (2005).

Categoria	Produtos ou benefícios obtidos
Abastecimento	Bens ou produtos obtidos dos ecossistemas – alimentos, água doce, madeira, fibra, outros
Regulação/ Controle	Benefícios obtidos a partir de processos naturais – regulação do clima, doenças, erosão, fluxo de água e polinização, proteção contra riscos naturais, outros
Cultural	Benefícios não materiais obtidos dos ecossistemas – recreação, valores espirituais, estéticos, paisagístico, patrimônio cultural, outros
Suporte	São serviços necessários a todas as demais categorias de Serviços Ecossistêmicos (SE) – ciclagem de nutrientes, produção primária, formação do solo

Assim, com base na definição de serviços ambientais, não é difícil aceitar como benefício um serviço mesmo que este não possua um valor de uso. O capital natural é também um imenso fundo de serviços intangíveis. Os serviços prestados pela natureza, apesar de não

serem combinados fisicamente aos produtos, são essenciais para as formas de vida conhecidas (MAY, 2010). Portanto, a valoração econômica desses serviços ecossistêmicos se mostra como importante tentativa para avaliar os custos ecológicos do crescimento e mensurar as externalidades positivas. Neste contexto, surge o pagamento por serviços ambientais.

O termo “pagamentos por serviços ambientais” (PSA) ainda não é completamente definido, gerando controvérsias. Segundo Wunder (2005) para que seja definido como pagamentos por serviços ambientais é necessário que eles atendam a uma série de critérios, tais como:

1. Ser uma transação voluntária;
2. Ter um serviço ambiental bem definido (ou um tipo de uso de terra que assegure este serviço);
3. Ser “comprado” por ao menos um comprador dos serviços;
4. Ter pelo menos um provedor dos serviços;
5. O provedor (ofertante) deve assegurar a provisão do serviço prestado (condicionante);

Segundo Onishi et al. (2013) a instalação do mecanismo de PSA tem como pré-condições o caráter voluntário da transação, a identificação de que ao menos um serviço ambiental esteja beneficiando algum agente interessado em garantir a manutenção de tal serviço e o esclarecimento de quem será a parte pagadora e quem será a parte recebedora.

O segundo critério é particularmente interessante dentro do contexto minerário, pois estas atividades atuam intensamente no uso e cobertura do solo, suprimindo alguns serviços ambientais para produção de minério, como por exemplo, a interferência em áreas de cultivo e biodiversidade, entre outros.

Segundo Novion e Valle (2009) a definição de Wunder é extremamente restritiva e coloca erroneamente toda a ênfase do termo PSA nos mecanismos mercadológicos. Os critérios 1 e 3 na definição de Wunder envolvem premissas econômicas e obrigam a existência de pessoas ou atores para pagar e receber. Mills e Porras (2002) fizeram uma revisão em 287 casos internacionais de PSA. Segundo eles, reduzidos casos citados nesse estudo se encaixariam na definição de Wunder.

Os PSA's podem ser públicos ou privados e, geralmente, englobam os serviços de captação de carbono, conservação da biodiversidade, conservação de recursos hídricos e conservação da beleza cênica (WUNDER et al., 2009).

Favaro (2012) elaborou um guia para implementação de um programa de pagamento de serviços ambientais no município de Rio Grande da Serra, visando à melhoria da saúde ambiental. Nesse guia de construção de PSA são propostos os seguintes tópicos:

- a) identificação dos Serviços Ambientais prestados pela região, da demanda por esses serviços, das oportunidades de PSA e seleção daqueles cujos resultados promovam melhoria da saúde ambiental da região;
- b) identificação de associações ou organizações de moradores com potencial para participar do programa de PSA;
- c) seleção das metodologias para avaliação (valoração) e monitoramento de serviços ambientais;
- d) identificação e avaliação de custos para a viabilização do programa de PSA;
- e) identificação de entraves para a implementação do programa;
- f) avaliação de mecanismos financeiros existentes para a viabilização da remuneração necessária ao PSA;

Diversas questões devem ser levantadas na fase de concepção de um programa de PSA para garantir o sucesso do programa frente à complexidade exigida (VIVIAN, 2012). Algumas delas são:

- Quais os serviços ambientais que se pretende focar?
- Já existe legislação ou instrumento dirigido a esses objetivos?
- Os proprietários e os produtores têm a noção de que muitos benefícios de um adequado uso do solo são externalidade positivas?
- Os utilizadores ou beneficiários dos serviços são fáceis de serem identificados e envolvidos no esquema?
- Os custos de transação esperados para os diversos atores envolvidos são baixos ou gerenciáveis quando comparados com os custos de outras opções?

Assim, identificado o potencial de um esquema para o pagamento de serviços ambientais, é necessário a verificação e o acompanhamento da manutenção e da continuidade da qualidade dos serviços prestados (ROMEIRO, 2004).

Fasiaben et al. (2009) estima o aporte de recursos necessários para implantação de PSA na região amazônica, fazendo importantes observações sobre a aplicabilidade do método no arco do desmatamento.

Antoniazzi (2008) fez um estudo visando estimar ofertas de serviços ambientais de conservação do solo na bacia do rio Corumbataí. Essa análise mostrou que a adoção de

práticas com maior produção de serviços ambientais depende de incentivos, uma vez que nas condições atuais elas não são atrativas, pois geram menores retornos aos agricultores no local estudado.

Tito e Ortiz (2013) descrevem que o momento atual é extremamente favorável à aplicação de PSAs devido à degradação ambiental vivida pelo planeta. De fato, existe na literatura um volume considerável de publicações sobre o tema, entretanto há poucas iniciativas de capacitação direta, refletindo o baixo grau de consciência por parte dos provedores e de demandantes de serviços ambientais. Tito e Ortiz (2013) argumentam que o entendimento sobre PSA ainda é muito superficial o que dificulta agregar valores aos serviços e aos produtos. Eles relatam que existe lentidão na inserção de recursos, mesmo onde há fundo específico para aquela modalidade de PSA, sendo que a desburocratização é vital para dar escala a propostas. Os autores propõem que PSA não deve ser visto como alternativa exclusiva, e sim inserida em um universo de incentivos possíveis. Em outras palavras, afirmam que atuar somente sobre PSA, sem tratar de regularização fundiária ou fortalecimento de cadeias produtivas, pode não mudar uma situação potencialmente mais complexa.

Em 2012, existiam 180 iniciativas de PSA de acordo com Vivian e Santos (2012) as quais englobam o mecanismo REDD (Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento e Degradação).

Uma extensa revisão sobre PSA aplicados ao manejo de água e solo pode ser encontrada em (PRADO et al., 2010). A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2007) também disponibiliza um texto completo sobre o assunto. O Ministério do Meio Ambiente divulgou um relatório sobre experiências com PSA na Mata Atlântica com foco sobre os recursos hídricos, biodiversidade e carbono florestal (MMA, 2011). Também relativo a este bioma, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) elaborou um texto sobre serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais, resultado do projeto ServiAmbi – Avaliação de indicadores e valoração de serviços ambientais em diferentes sistemas de manejo (PARRON et al., 2015). Para o bioma Amazônia tem-se a obra intitulada de “Pagamentos por serviços ambientais, perspectivas para a Amazônia legal” (WUNDER et al., 2009).

Esta nova ferramenta, PSA, também pode aumentar a eficiência da política ambiental posta em prática que tem por base a regulação direta através de instrumentos de comando e controle. Esses tradicionais mecanismos de comando e controle feitos pela União, Estado ou

Município têm caráter punitivo, impondo alterações no comportamento dos agentes degradadores e tem alto custo.

Fundamentalmente, as leis ambientais impõem restrições àqueles que degradam o meio ambiente através dos instrumentos de comando e controle. Já a política de PSA, incentiva positivamente o emprego de comportamentos ambientalmente corretos, como os princípios de sustentabilidade e beneficia quem promove a manutenção e respeita os direitos das gerações futuras. Este sistema “ganha-ganha” na forma PSA complementa o modelo poluidor-pagador, dando uma importância aos conceitos de capital natural e serviços ambientais que são fornecidos pelo meio ao homem.

Onishi et al. (2013) ressaltam a necessidade de implantação de PSA em conjunto com outros mecanismos de comando e controle. Desta forma, os autores acreditam que os esforços de proteção de áreas e manutenção de recursos hídricos serão efetivos a longo prazo. Antoniazzi (2008) destaca que PSA são mecanismos promissores para financiamento da proteção ambiental e podem complementar as atuais regulações.

Apesar de estar em alta, ainda que em publicações acadêmicas, o pagamento por serviços ambientais é desconhecido ou ignorado pela maior parte da população brasileira.

Com a crescente implantação de comitês de bacia no Brasil, tem-se pressionado aqueles se beneficiam com fluxos regulares de água de boa qualidade no sentido de que estes devam contribuir, arcando com o custo de reflorestamento e da manutenção da cobertura florestal dos mananciais (ROMEIRO, 2004).

Chaves et al. (2004) simulou a aplicação do Programa Produtor de Água da Agência Nacional de Águas em uma bacia hidrográfica de abastecimento urbano no Distrito Federal. Pagiola et al. (2013) descrevem 10 projetos locais de manejo e produção de água utilizando PSA. Esse programa está ligado com a Agência Nacional de Águas (ANA) e tem como foco o estímulo à política de PSA, visando à proteção hídrica no Brasil. O programa é direcionado à conservação de mananciais estratégicos e tem como viés o pagamento de uma compensação financeira a produtores rurais. Este programa apoia 16 projetos que visem à diminuição da erosão e do assoreamento de mananciais no meio rural, objetivando a melhoria da qualidade, quantidade e a regularização da oferta de água em bacias hidrográficas de importância estratégica para o país. Porém, não há menção no programa de apoio e aplicação de PSA em bacias hidrográficas com intensa atividade mineradora.

Cardoso et al. (2013) descrevem um programa de PSA na manutenção de áreas de florestas em Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro, sendo este último na Bacia do Rio

Guandu, que devido à transposição recebe água (160 m³/s) do Paraíba do Sul (REBOUÇAS et al., 2006). A geração de impacto na bacia do Paraíba do Sul, devido à mineração por cava aberta aliada a alta densidade populacional da bacia, exige uma correta gestão da água nessa região.

As atividades mineradoras tem causado um impacto cada vez maior em grandes áreas, afetando a cobertura do solo e a capacidade dos ecossistemas em prover diferentes serviços essenciais à manutenção da vida (serviços ecossistêmicos) entre eles a disponibilidade hídrica.

A conservação de superfícies naturais é uma medida fundamental para equacionar este problema, porém a grande demanda por recursos minerários pode ocasionar conflitos com esta medida, principalmente nas áreas próximas a grandes centros de consumo. Esta conservação concorre diretamente com as atividades produtivas potencialmente degradadoras, o que exige a definição de políticas ambientais específicas para a indução dos esforços de conservação ou para atividades sustentáveis. Os PSA's têm potencial induzir práticas sustentáveis na conservação dos recursos hídricos, principalmente em áreas mineradas.

No Brasil, existe uma dificuldade em se atribuir valores econômicos aos bens ambientais devido a uma situação econômica instável. Aliado a isso, a visão tradicional da água como um bem livre e inesgotável dificulta a implantação da cobrança pelo uso da água como um instrumento de gerenciamento (TAVARES et al., (1999). Outro aspecto que torna essa cobrança difícil, é a correta medição da evapotranspiração, essa corresponde a um significativo fluxo de água nas bacias hidrográficas. A evapotranspiração é a componente do balanço hídrico intrinsecamente dependente do tipo de superfície. Na mineração em cava a mudança da cobertura e uso do solo altera a evapotranspiração. Em Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) envolvendo atividade minerária as alterações na evapotranspiração são negligenciadas ou desprezadas.

3.6 Mineração em cava

Como mencionado, a mineração causa impacto significativo ao meio ambiente, pois esta atividade implica na retirada da vegetação, exposição do solo aos processos erosivos com modificações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, causando também a poluição do ar (MECHI; SANCHES, 2010). As atividades de mineração afetam áreas relativamente pequenas, mas podem ter um grande impacto local sobre o meio ambiente (SALOMONS, 1995).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 1990) em seu relatório de recuperação de áreas degradadas pela mineração adota a seguinte definição: “*A degradação de uma área ocorre quando a vegetação nativa e a fauna forem destruídas, removidas ou expulsas; a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada e a qualidade e regime de vazão do sistema hídrico for alterado*”. Em síntese, a degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e inviabiliza o desenvolvimento socioeconômico da região.

De acordo com esse conceito sobre degradação, qualquer alteração que se manifeste no regime de vazão do sistema hídrico de uma área é considerada uma degradação ambiental.

A mineração de areia, cascalho e argila implica em transformações significativas na paisagem, sendo que os recursos hídricos superficiais e subterrâneos no local minerado podem ser afetados devido à descaracterização do local.

A mineração, ao retirar a vegetação, pode impedir também a regeneração da mesma. Em áreas mineradas, o solo superficial (geralmente mais fertilidade) é removido e os solos remanescentes ficam expostos aos processos erosivos que podem gerar assoreamento dos corpos d'água do entorno e a jusante da área. A qualidade das coleções de águas superficiais da mesma bacia, a jusante do empreendimento, pode ser prejudicada em razão da turbidez ocasionada pelos sedimentos erodidos finos em suspensão (MECHI; SANCHES, 2010). Os sedimentos também são um contaminante por sua própria composição e pelos elementos químicos que podem levar absorvidos, aumentando os níveis de nitrogênio e fósforo nas massas d'água e favorecendo sua eutrofização (MORGAN, 2005).

O regime hidrológico dos rios, córregos e aquíferos pode ser transformado quando se faz uso desses recursos na lavra (desmonte hidráulico) e no beneficiamento, podendo causar o rebaixamento do lençol freático devido a isso ou devido à evaporação das lagoas formadas após a inundação da cava. A redução da capacidade de escoamento dos canais de rios e córregos pode provocar a instabilidade de suas margens, causando a eliminação das matas ciliares. O impacto visual ocasionado pela alteração da paisagem devido a atividades mineradoras depende do volume de escavação e da visibilidade em razão de sua localização (MECHI; SANCHES, 2010).

O local onde se explora o minério pode ser aberto, subterrâneo ou misto. O tamanho dessas áreas pode permitir classificá-las em regionais e locais (CALIJURI; CUNHA, 2013). Ao se aprofundar a atividade de mineração a surgência da água nas cavas são um problema, pois induzem restrições operacionais e econômicas aos processos de lavra (REBOUÇAS et

al., 2006). Esse efeito da inundação ou surgência das águas na cava pode ser verificado nas cavas exauridas de mineração de ouro em Serra Pelada e de ferro em Águas Claras, como mostrado na Figura 3-4.

Figura 3-4 Imagens das cavas de mineração Águas Claras situada em Belo Horizonte MG, e Serra Pelada em Curionópolis-PA. As cavas encontram-se inundadas e formando espelhos d'água (lagos). A cava de Águas Claras tem 34 hectares e a de Serra Pelada 10 hectares

O lago de Águas Claras na configuração final possuirá uma profundidade máxima de 234 m, posicionado como ambiente hídrico mais profundo do país, e com boa qualidade de água (VON SPERLING et al., 2004).

A cava de mineração de ouro em Serra Pelada foi o maior garimpo a céu aberto de ouro e foi aberta em 1980. Ao final de 1981, as escavações atingiram o nível de água subterrânea inundando toda a cava (MEIRELLES et al., 1982).

O tipo de mineral lavrado está diretamente associado ao tamanho e a operação da área onde se explora o bem mineral (mina), sendo que a exploração de areia, cascalho e argila também pode ser feita através das cavas (CALIJURI; CUNHA, 2013). Os principais métodos de extração de areia, cascalho e argila são (BRUSCHI; PEIXOTO, 1997):

- Extração manual de areia, cascalho e argila;
- Extração de areia, cascalho e argila em fossa a seco;
- Extração de areia e cascalho em leito de cursos d'água;
- Extração de areia e cascalho em leito de cursos navegáveis;
- Extração de areia e cascalho em área de várzea – Circuito em cava fechada; e
- Extração de argila em área de várzea – Circuito em cava fechada.

Como o circuito em cava fechada é o objeto de estudo desta pesquisa, ele será mais bem discutido a seguir.

O aproveitamento de recursos minerais através de um processo de extração que origina uma lagoa na mina, com a recirculação de partículas finas e água através de dispositivos de drenagem para a própria lagoa é denominado circuito em cava fechada. Assim, quando a

exploração da jazida mineral está acima do nível do aquífero, a cava ainda está seca, mas com o aprofundamento das escavações, o nível de água é atingido fazendo com que haja a surgência de água e lagoas formadas na cava. A cava fechada pressupõe a formação de lagoas não conectadas diretamente aos cursos d'água. A Figura 3-5 ilustra a cava de mineração e a formação da lagoa.

Figura 3-5 Representação esquemática do processo de formação das cavas no local de exploração do bem mineral (mina). Com o avanço das escavações a água presente na zona saturada do solo aparece em superfície e origina o lago (CABRERA, 2011).

A extração de minerais Classe II do Código de Mineração – areia, cascalho e argila, empregados na construção civil e na fabricação de cerâmica vermelha, gera degradação ambiental nos locais onde ocorre (BRUSCHI; PEIXOTO, 1997). Os principais impactos ambientais nos recursos hídricos são a mudança da paisagem, do uso do solo e o desequilíbrio do balanço hídrico, o qual é afetado com o aumento de áreas alagadas.

A atividade minerária com a formação de espelhos d'água causa alteração significativa, sobretudo em localidades próximas a grandes aglomerados urbanos. Nesses locais, a demanda por novas fontes de água e por insumos para a construção civil, como a areia, é aumentada devido ao crescimento econômico e populacional. Assim, a alteração do uso do solo através das cavas faz com que a atividade mineradora entre em conflito com outros usuários de água na bacia.

O incremento das atividades minerárias para atender a demanda crescente da construção civil, favorece a contaminação das reservas subterrâneas e superficiais de água, causando impactos na disponibilidade hídrica do local.

A formação de lagoas através de cava fechada é facilitada quando a exploração da jazida mineral é feita em áreas próximas a corpos d'água, onde o nível do aquífero é pouco profundo. As lagoas formadas muitas vezes atingem tamanhos que permitem a sua visualização através de imagens de satélite.

As Figuras 3-6 a 3-7 ilustram imagens de satélite das cavas de mineração para exploração de areia em Campo Grande – MS. No início da atividade mineradora, a camada fértil do solo foi suprimida para iniciar a abertura da cava e exploração da areia. Nesta etapa de aprofundamento, a cava ainda se encontra seca, porém devido às chuvas e a surgência de água subterrânea a cava é inundada, formando a lagoa.

Figura 3-6 Imagens de satélite ilustrando a formação e aumento das cavas secas e aquelas com espelhos d'água. Modificação de uso e cobertura do solo devido à lavra de areia, nas proximidades da área urbana de Campo Grande – MS.

Figura 3-7 Imagens de satélite ilustrando as cavas de mineração nas proximidades da área urbana de Campo Grande – MS GOOGLE EARTH (2014)

A superfície líquida das cavas em Campo Grande - MS em 05/09/2003 era de 4,1 hectares, já a área coberta por espelhos d'água em 09/02/2014 era de 29,3 hectares (Figura 3-8).

Figura 3-8 Aumento da superfície livre de água devido à expansão das cavas de mineração de areia, em amarelo a área inundada dia 09/05/2003 totalizando 4,1 hectares. Já no dia 09/02/2014 a área coberta por espelho d'água era de 29,3 hectares. Cavas localizadas em Campo Grande MS.

A bacia hidrográfica do Paraíba do Sul é intensamente modificada pela mineração. Nas várzeas do rio há uma grande quantidade de cavas de mineração. As Figura 3-9 e Figura 3-10 mostram o aumento de superfície livre devido às cavas de mineração durante 11 anos (2003-2013) em um trecho do Rio Paraíba do Sul nas proximidades de Aparecida - SP. Destaca-se que na cidade de São José dos Campos - SP, este tipo de mineração está proibida desde 1994.

Figura 3-9 Imagem datada de 2003 em um trecho do Rio Paraíba do Sul nas proximidades de Aparecida do Norte.

Figura 3-10 Imagem datada de 2013 do mesmo trecho da figura 3.9, porém com a indicação em amarelo do aumento dos espelhos de água devido à mineração em cavas.

Para melhorar o entendimento do impacto minerário nos fluxos de água dentro da bacia hidrográfica, faz-se necessário explicitar esses fluxos em compartimentos visando a correta identificação e mensuração dos processos hidrológicos.

A correta quantificação dos volumes de água em bacias e os seus reflexos quando há mudanças de cobertura e uso do solo pode ser feita utilizando a metodologia do balanço hídrico. O método do balanço deve estar associado às ferramentas de suporte científico para a quantificação precisa e viável dos seus componentes.

3.7 Balanço Hídrico e Água Azul/Verde

A maioria dos problemas envolvendo a distribuição, quantidade e qualidade da água no ambiente decorrem da alteração do equilíbrio hidrológico. Portanto, há uma necessidade de se atingir um equilíbrio hidrológico sustentável perante as irregularidades do clima, visando, dessa forma, garantir a disponibilidade hídrica segura para as próximas gerações e mantendo os ecossistemas e as atividades econômicas (WANG et al., 2008).

O balanço hídrico é a aplicação da lei de conservação da massa através da equação da continuidade, utilizando a contabilidade de componentes hidrológicos em uma dada área e período de tempo (CALIJURI; CUNHA, 2013). Também, pode ser descrito como o balanço de toda a água envolvida entre os sistemas solo, planta e atmosfera, podendo oferecer a qualquer instante a quantidade de água disponível contida em um perfil do solo pré-determinado. As demandas da planta junto ao solo, da atmosfera junto à planta, e do solo como armazenador de água, ficam bem caracterizados com o balanço hídrico (OMETTO, 1981).

A Figura 3-11 representa o viés agrônômico do balanço hídrico e as variáveis envolvidas. Nesse viés, há um enfoque na zona não saturada do solo com o objetivo de conhecer a necessidade de água para os cultivos e produção de biomassa. As entradas de água numa porção de solo explorado por plantas correspondem à precipitação (P), irrigação (I), escoamento superficial de entrada (Ee), drenagem lateral de entrada (DLe) e ascensão capilar (AC). As saídas correspondem ao escoamento superficial de saída (Es), drenagem lateral de saída (DLs), drenagem profunda (DP), variação de armazenamento de água no solo (ΔARM) e evapotranspiração (ET). A subtração das entradas com as saídas tem como resultado a variação do armazenamento de água no solo.

Figura 3-11 Representação dos fluxos de água em um volume de controle (SENTELHAS, 1998).

No balanço hídrico representado na Figura 3-11, o orvalho (O) representa uma contribuição com ordem de magnitude muito pequena (no máximo 0,5 mm/d) (SENTELHAS, 1998). A precipitação e a irrigação podem ser medidas facilmente, já a ascensão capilar, que ocorre em períodos secos, a drenagem profunda que ocorre em períodos extremamente chuvosos, e a variação do armazenamento de água no solo (ΔARM), podem ser determinadas com uso de técnicas descritas por Libardi, (2012) e Reichardt; Timm, (2012).

Para estudos hidrológicos em uma escala maior, como em uma bacia hidrográfica, o balanço hídrico tem a finalidade de analisar os seguintes aspectos: comportamento hidrológico, impactos das mudanças climáticas, efeitos de alteração no uso e cobertura do solo e padrões especiais e temporais de oferta e demanda hídrica (CALIJURI; CUNHA, 2013).

O intervalo de tempo para a estimação do balanço hídrico pode ser de horas até anual, se houver disponibilidade de dados, instrumentos sensíveis e, conforme o objetivo proposto, o balanço hídrico pode apresentar vários níveis de detalhamento. As unidades dos componentes podem ser descritas em volume ou lâmina de água, geralmente expressa em milímetros. A vantagem deste último é a não necessidade dos dados de área para efeitos comparativos. O balanço hídrico pode ser definido segundo critérios de componentes hidrológicos em três gerações.

A primeira geração é mais simples, capacitada a várias escalas e mede a variação de água na bacia (ΔS) utilizando a precipitação (P), irrigação ou importação de água para a bacia (I), escoamento superficial ou vazão no exutório da bacia (Q) e evapotranspiração (ET) (HEALY et al., 2007), como mostrado na Equação 5.

$$\Delta S = P + I - ET - Q \quad (\text{Equação 5})$$

Gupta (2008) cita que na equação do balanço hídrico, o armazenamento de água no solo pode ser desprezado quando se trabalha com uma grande bacia hidrográfica por um longo período. Sendo que o balanço hídrico pode ser apresentado na forma da Equação 6.

$$P = Q + ET \quad (\text{Equação 6})$$

Onde (P) é a precipitação; (Q) é a vazão no exutório da bacia e (ET) é a evapotranspiração.

As medidas de evapotranspiração são escassas em muitas áreas, por isso, esses valores são muitas vezes baseados na diferença entre a precipitação (P) e a vazão no exutório da bacia (Q) (REBOUÇAS et al., 2006).

Barreto (2006) e Gomes (2008) utilizaram essa metodologia do balanço hídrico visando obter a estimativa da recarga direta e profunda em bacia hidrográfica na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. Esse equacionamento também foi utilizado para determinar fluxos de água em pastagem, cana e cerrado (OLIVEIRA, 2014; YOULTON, 2013).

A segunda geração detalha melhor os componentes integrantes da primeira geração, conforme a análise requerida de água na bacia, como mostra a Equação 7:

$$\Delta S = P + I - I_c - T - E - S_e - S_p - Q \quad (\text{Equação 7})$$

ΔS variação de água na bacia; (P) precipitação; (I) irrigação ou importação de água para bacia; (I_c) interceptação; (T) transpiração; (E) evaporação da folhagem ou vegetal; (S_e) evaporação direta do solo; (S_p) percolação; e (Q) vazão no exutório da bacia (Q).

Em bacias hidrográficas urbanas, o balanço hídrico de segunda geração é dado de acordo com a Equação 8 (MITCHELL et al., 2003).

$$\Delta S = P + I - ET - D - I_F - R_w \quad (\text{Equação 8})$$

Onde ΔS é a variação de água na bacia; (P) é a precipitação; (I) é a irrigação ou importação de água para bacia visando abastecimento público; (ET) é a evapotranspiração; (D) drenagem para fora da bacia; (I_F) é a infiltração e (R_w) é o lançamento de águas residuárias.

O balanço hídrico de 3ª geração leva em consideração os produtos consumidos na bacia e que não foram produzidos nela para mensurar a transferência de água entre bacias e o impacto que os usuários desta podem gerar nos recursos hídricos de outras bacias (CALIJURI; CUNHA, 2013). Dessa maneira, essa demanda hídrica introduzida em produtos comercializados é denominada de água virtual. Neste terceiro nível, o balanço em bacias hidrográficas urbanas acrescido das águas virtuais é representado pela Equação 9.

$$\Delta S = P + I - ET - D - I_F - R_w + AVe - AVs \quad (\text{Equação 9})$$

Onde (ΔS) variação de água na bacia; (P) precipitação; (I) irrigação ou importação de água para bacia visando abastecimento público; (ET) evapotranspiração; (D) escoamento superficial ou drenagem para fora da bacia; (I_F) infiltração; (R_w) lançamento de águas residuárias; (AVe) água virtual de entrada e (AVs) água virtual de saída.

Os fluxos no ciclo hidrológico podem ser distinguidos em duas categorias: azul e verde, os quais agrupam vários componentes do balanço de água, facilitando o manejo e conservação dos recursos hídricos na bacia (CALIJURI; CUNHA, 2013). A água azul é originária de aquíferos, lagos, rios e reservatórios, enquanto a água verde consiste da parcela contida na zona insaturada do solo e disponível para ser utilizada pelas plantas (CHARTRES; VARMA, 2010).

O caráter dinâmico rege a transformação da água proveniente das precipitações em fluxos de água verde e azul. Desse modo, a distinção da tipologia do fluxo entre azul ou

verde, é causada pelos processos hidrológicos e parcelas de armazenamento na bacia. Portanto, a azul é identificada pelo escoamento superficial e subterrâneo, e a verde é aquela correspondente ao escoamento subsuperficial e evapotranspiração (Figura 3-12).

Figura 3-12 Representação esquemática dos fluxos de água em uma bacia hidrográfica com destaque para os fluxos de água azul e verde (CALIJURI; CUNHA, 2013; HOEKSTRA et al., 2011).

A determinação da evapotranspiração é importante para aperfeiçoar o uso da água nos processos produtivos e auxiliar na determinação da pegada hídrica dos produtos agrícolas e seus derivados. Por ser uma importante e significativa parcela do balanço hídrico, sendo fundamental nesta pesquisa, a evapotranspiração será mais bem discutida a seguir.

3.8 Evapotranspiração

Um dos processos fundamentais relacionado ao balanço hídrico no solo é a evapotranspiração, pois é considerado o maior desafio prever e quantificar essa etapa dos processos hidrológicos (DINGMAN, 2014; WANG; BRAS, 2011). Recentemente, foi detectada uma tendência global ascendente de evapotranspiração com a utilização de 32 anos de dados (1982-2013) obtidos por sensoriamento remoto (ZHANG et al., 2015).

De acordo com Pereira et al., (1997) a evaporação é o fenômeno pelo qual uma substância passa da fase líquida para a fase gasosa (vapor). A evaporação de água ocorre tanto em uma massa continua (mar, lago, rio, poça) como em uma superfície úmida (planta, solo). Este fenômeno exige o suprimento de energia externa e a transforma em calor latente.

Para estimar a evaporação de água em lagos em 1917 Sleight publicou seu trabalho intitulado “*Evaporation from the surface of water and river-bed materials*”, nesta pesquisa o autor forneceu as primeiras medições de evaporação utilizando evaporímetros enterrados e sobre o solo.

Em 1926, Ira Sprague Bowen lançou seu estudo divulgando as bases teóricas para estimar a evaporação de massas de água a partir da incorporação ao balanço energético da relação entre calor sensível e latente (BOWEN, 1926).

No ano de 1948, foi dado um passo importante para lançar as bases dos atuais conceitos físicos que regem os fenômenos de evaporação e evapotranspiração nas escalas agrônômicas e hidrológicas. Charles Warren Thornthwaite e Howard Penman lançaram essenciais contribuições no campo da modelagem físico-empírico-matemática para estimar esses processos. Em 1965, Monteith introduziu importantes conceitos na determinação da evapotranspiração tais como a resistência aerodinâmica e de cobertura (MONTEITH; UNSWORTH, 2013). Assim, o estudo da evapotranspiração a partir destas publicações evoluiu de forma acelerada e consistente em todas as áreas de ciências ambientais, meteorologia, engenharias, física, matemática, geografia e fisiologia vegetal (AMORIM, 1998).

Um estudo detalhado sobre o início da agrometeorologia no Brasil e, consequentemente, sobre as medições de evapotranspiração pode ser verificado nas pesquisas de Camargo (1993); Camargo; Camargo (2000) e Sedyama, (1996).

A transpiração das plantas mais a evaporação de água do solo, folhas e caule constituem a perda de água nas superfícies vegetadas denominada de evapotranspiração (ET). Em uma vegetação em crescimento ativo, ausente de deficiências nutricionais, ataque de pragas e moléstias a evapotranspiração é controlada apenas pela disponibilidade de energia solar e pela interação da demanda atmosférica com o suprimento de água do solo às plantas (PEREIRA et al., 2013).

Em 1998, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura lançou o relatório de Irrigação e Drenagem N°56 que revisou as diretrizes básicas dos requerimentos hídricos para as culturas. Esse relatório já possui mais de 11500 citações e se tornou uma referência no assunto de evapotranspiração (PEREIRA et al., 2015). Neste relatório, foi reformulado o conceito de evapotranspiração de referência.

Sentelhas (1998) cita que existe diversas maneiras de se determinar a evapotranspiração de uma cultura, porém existe na literatura uma multiplicidade de termos relacionados à evapotranspiração que são, muitas vezes, vagos e dúbios. Dessa maneira, iremos apresentar apenas os termos essenciais a esse texto, como a evapotranspiração de referência, real, cultura e de oásis.

A evapotranspiração de referência (ET_o) é aquela que ocorre em uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica e nutricional tendo ótimas condições de desenvolvimento, com altura média de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência da superfície de 70 s.m^{-1} (ALLEN et al., 1998). O índice de área foliar é assumido como $2,88 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Outro ponto fundamental é que a área circundante tem que possuir uma vegetação perene, ser extensa e apresentar tamanho suficiente para diminuir os efeitos da advecção de calor através dos ventos secos e quentes. Com esse conceito, Allen et al. (1998) descrevem que a ET_o é um elemento climático que expressa o poder evaporante da atmosfera (PEREIRA et al., 2013).

A evapotranspiração real ou atual (ET) é a perda de água que a superfície vegetada está tendo naquele instante, independente do seu estágio vegetativo e do meio que a envolve e pode relatar o débito de água que ocorreu (OMETTO, 1981). Se a superfície vegetada estiver em condições descritas na evapotranspiração de referência (ET_o) a evapotranspiração real será igual a de referência.

A evapotranspiração de cultura (ET_c) ocorre quando há ótimas condições de umidade (irrigada) e nutriente do solo, e em bom estado fitossanitário de forma a permitir a produção compatível com o potencial genético do cultivar no campo, com área mínima de 1 hectare (PEREIRA et al., 2013).

Bernardo et al. (2008) descrevem a evapotranspiração de oásis (EO) quando há uma pequena área com umidade disponível circundada por uma extensa área seca e quando a área tampão não é suficiente para remover os efeitos advectivos do calor sensível.

Allen et al. (1998) construíram a Tabela 3-2 onde dispõem valores de evapotranspiração média em mm.dia^{-1} para diferentes locais e climas.

Tabela 3-2 Evapotranspiração média diária em milímetros para diferentes regiões do mundo (ALLEN et al., 1998)

Região e Clima	Temperatura média diária (°C)		
	Frio < 10°C	Moderado 20°C	Quente >30°C
Trópicos e subtropicais			
Úmido e sub-úmido	2-3	3-5	5-7
Árido e semi-árido	2-4	4-6	6-8
Regiões temperadas			
Úmido e sub-úmido	1-2	2-4	4-7
Árido e semi-árido	1-3	4-7	6-9

Existem muitos métodos e metodologias para estimar a evapotranspiração que possuem vantagens e desvantagens. Portanto, é imprescindível que se tenha o conhecimento necessário

para analisar essas metodologias e também as técnicas de coleta de dados climáticos, com o objetivo de obter valores representativos e consistentes das condições locais. A Tabela 3-3 resume alguns métodos que podem ser utilizados para estimar a evapotranspiração.

Tabela 3-3 Resumo dos métodos para observação (OBS) e estimativa (EST) da evapotranspiração. Adaptado de (WANG; DICKINSON, 2012)

Tipo	Método	Escala temporal	Escala espacial
OBS	Correlação de turbilhões (<i>eddy covariance</i>)	0,25 h – anual	> 100 m
	Razão de Bowen – Balanço de energia	0,25 h – anual	> 20 m
	Lisímetros	0,5 h – anual	pontual
	Cintilômetro	0,5 h – anual	> 10 m e < 10 km
	Balanço hídrico superficial	mensal – anual	> 100 km e < 10 ³ km
	Balanço hídrico atmosférico	mensal – anual	> 100 km e < 10 ³ km
EST	Penman-Monteith e FAO 56	diário	pontual
	Modelos empíricos	variável	pontual
	Sensoriamento remoto	variável	global

3.9 Lisímetros

A lisimetria é um dos métodos diretos para medição da evapotranspiração de maior aceitabilidade dentre o meio acadêmico, sendo muito utilizado para ajustar métodos indiretos. Porém o seu alto custo de implantação limita seu uso a estudos acadêmicos (MEDEIROS, 2008).

O único dispositivo capaz de medir a evapotranspiração com razoável eficiência é o lisímetro. Black (1968) recomenda a lisimetria como o único método praticável para determinar a evapotranspiração com boa precisão.

Em um levantamento feito por Lanthaler (2004) existem 2440 caixas de lisímetros na Europa. Há ainda uma plataforma elaborada por essa autora (http://www.lysimeter.at/HP_EuLP/index.html) com descrição e relatórios das estações lisimétricas da Europa, inclusive com informações sobre a estação de Rothamsted, onde Penman desenvolveu o método indireto de maior aceitabilidade no meio acadêmico. O site www.lysimeter.com também dispõe informações e imagens da construção e operação de lisímetros.

Tanner (1962) descreve que lisímetros são dispositivos constituídos de um volume de solo isolado do solo circundante local, de forma a medir todas as variáveis hidrológicas ou suprimir alguns termos da equação geral do balanço de água.

A palavra lisímetro é derivada do grego; *lysis* significa dissolução ou movimento e *metron*, significa mensurar. Lisímetros são caixas preenchidas com solos desagregados ou blocos inteiros de solo, enterrados em campo para representar as características do

ambiente. Possuem a função de determinar a evapotranspiração ou evaporação, depende se estão cobertos por vegetação ou apenas com o solo desprovido de cobertura vegetal (ABOUKHALED et al., 1982). A vegetação dentro e imediatamente fora da caixa deve apresentar a mesma altura e índice de área foliar. Os lisímetros permitem isolar a zona radicular das culturas a partir do seu ambiente, controlando os processos de entrada/saída e medindo com maior precisão os diferentes termos na equação do balanço de água no solo (ALLEN et al., 1998).

Os lisímetros são classificados de acordo com seu funcionamento. Silva (1996) descreve que esses dispositivos utilizados em pesquisas de evapotranspiração, podem ser agrupados em três modalidades: pesáveis, sendo a variação de massa do sistema determinada por um mecanismo de pesagem; não-pesáveis com drenagem livre, são os mais utilizados em locais de alta precipitação e Lisímetros não-pesáveis com lençol freático de nível constante, mais utilizado em áreas onde o nível de água subterrânea é elevado. O mesmo autor destaca que os lisímetros também são classificados, quanto ao perfil do solo utilizado (reconstruído ou monolítico) e ao sistema de drenagem: a vácuo ou gravidade.

Segundo Sentelhas (1998) o lisímetro de pesagem é o mais utilizado no meio científico. Assim com o consumo de água pelas plantas do lisímetro ocorre uma diminuição de peso do volume de controle, sendo proporcional a evapotranspiração. Esse tipo de instrumento pode empregar células de carga instaladas sob uma caixa impermeável, medindo a variação de peso do conjunto caixa e solo. Também podem ser do tipo pesagem mecânica (Figura 3-13). Lisímetros de pesagem possuem elevado custo, sendo somente encontrado em centros de pesquisa.

Figura 3-13 Representação esquemática de um lisímetro de pesagem mecânica (BERNARDO et al., 2008)

Silva (1996) destaca que existem vários mecanismos de pesagem, os mais modernos são as células de carga. O mesmo autor escreve que, os lisímetros de pesagem apresentam uma grande variabilidade no “design” que está relacionada diretamente com os objetivos de pesquisa e refinamento dos sistemas de pesagem.

Pereira et al. (1997) citam que os lisímetros de pesagem permitem mensurar de forma direta a evapotranspiração em períodos curtos, horários ou diários, destacando que alguns permitem medir variações da ordem de 0,01 mm, porém ressalta o alto custo deste tipo de lisímetro devido aos sistemas sofisticados. Quaglia (2005) desenvolveu e construiu três lisímetros de pesagem para determinar a evaporação direta do solo descoberto e foi empregada apenas uma célula de carga para cada lisímetro.

Em Davis, há um lisímetro de pesagem mecânica instalado na Universidade da Califórnia, tendo 6,07 m de diâmetro e 0,96 m de profundidade, totalizando uma área de 29 m². Esse lisímetro utiliza uma balança com capacidade para 50 toneladas e sensibilidade de 900 gramas, com leituras automáticas a cada dois minutos (PRUITT; ANGUS, 1960). Em Neuherberg, Alemanha existe um avançado Centro de Estudo com 32 lisímetros (Figura 3-14). Nesses lisímetros foi desenvolvido uma pesquisa utilizando isótopos para estudar o fluxo em zona não saturada (STUMPP et al., 2009).

Figura 3-14 O Centro Nacional de Pesquisa e Saúde do Instituto de Ecologia dos Solos em Neuherberg Alemanha mantém e opera 32 lisímetros para estudos de balanço hídrico, recarga subterrânea e absorção de nutrientes pelas plantas (HEALY et al., 2007).

Lisímetros de pesagem também são utilizados para medir as variáveis do balanço hídrico, como percolação, escoamento superficial e evapotranspiração (Figura 3-15).

Figura 3-15 Construção de um lisímetro de pesagem em Coshocton, Ohio Estados Unidos. Em 1937 foram construídos e preenchidos 11 lisímetros. Esse tipo de lisímetro permite medir também o escoamento superficial do terreno (GOSS et al., 2010).

Um esquema de filtragem para correção dos componentes do balanço hídrico em grandes lisímetros de pesagem com alta precisão pode ser visto no trabalho de Hannes et al. (2015).

Trabalho realizado por Silva (1996) nas condições climáticas de Piracicaba – SP, mostra que o lisímetro de pesagem apresentou boa concordância com os dados de ET_o estimados pelo método de *Penman-Monteith*, que também é padrão nas estimativas (JENSEN et al., 1990).

Lisímetros de drenagem são grandes vasos com paredes impermeáveis enterrados até o nível do solo e plantados com vegetação idêntica à do terreno circundante, constituindo amostra representativa da área vegetada. A Figura 3-16 ilustra um lisímetro de drenagem. O lisímetro de drenagem é o mais usado devido a suas características simples, baixo custo, sem partes móveis e fácil operação.

Camargo (1961) utilizando lisímetros de drenagem, compostos por caixas de cimento amianto, em três localidades Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba mediu a evapotranspiração. O autor conclui que o evaporímetro de Piche apresentava resultados discordantes principalmente nos meses de agosto a setembro e a equação de Thornthwaite estima de maneira satisfatória a evapotranspiração mensal no planalto paulista.

O movimento de água no solo um processo relativamente lento, os lisímetros de drenagem funcionam adequadamente apenas em períodos longos de observação (7 a 10 dias) e requer cuidados especiais, como irrigação periódica para manter a variação do conteúdo de água no solo próximo a zero (PEREIRA et al., 1997).

Nos lisímetros de percolação ou drenagem, Bernardo et al., (2008) destacam que a irrigação deve ser diária ou a cada dois dias, com determinada quantidade de água, de forma que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações. Camargo (1961) cita que as irrigações nesse tipo de lisímetro devem ser feitas em dias alternados para evitar a excessiva perda de nutrientes do solo, principalmente o nitrogênio.

Figura 3-16 Representação de um lisímetro de drenagem (MEDEIROS, 2008)

Munk et al. (2011) utilizaram dois lisímetros de drenagem com grandes dimensões (20,0 x 10,0 x 1,8 m) para analisar os efeitos da variação de pressão atmosférica na percolação dos grandes lisímetros no Alasca, Estados Unidos.

Oliveira (2006) em seu estudo sobre a influência da palha nas variáveis hidrológicas do balanço hídrico e para obter uma melhor representatividade das condições de campo, elaborou dois lisímetros de drenagem com uma amostra indeformada de 1 m³ de solo. Este tipo de lisímetro com amostra de solo indeformada é denominado de monolítico. O autor concluiu que o lisímetro com palha apresentou menores taxas de evapotranspiração e aumento da percolação. A Figura 3-17 ilustra a implantação dos lisímetros monolíticos.

Figura 3-17 Lisímetros monolíticos de drenagem (OLIVEIRA, 2006)

Thornthwaite em 1945 propôs um tipo de lisímetro ou evapotranspirômetro de drenagem com nível constante (Figura 3-18). Esse dispositivo consiste de um tanque com 4 m² com 70 cm de profundidade, com caixas auxiliares de suprimento e percolação de água, sendo o nível de água no interior do lisímetro mantido constante por meio de um sistema de válvula e boia (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Barbieri (1981) em Araras-SP, elaborou um lisímetro com o mesmo princípio de funcionamento para medir a evapotranspiração da cana de açúcar. O dispositivo possuía uma cobertura retrátil para evitar a entrada de água pluvial (Figura 3-18).

Figura 3-18 No lado direito o lisímetro desenvolvido por Thornthwaite para determinar a evapotranspiração (BARBIERI, 1981). Na esquerda o lisímetro de drenagem com nível constante e cobertura retrátil para impedir a entrada de água. Experimento desenvolvido por Barbieri (1981)

Uma revisão relatando e discutindo sucessivas modificações introduzidas no modelo original de Thornthwaite é apresentada nos trabalhos de (GANGOPADHYAYA, 1966).

Silva (1996) analisou o desempenho de lisímetros, tanque classe A e o método de *Penman-Monteith* na determinação da evapotranspiração de referência (ET_0). A nas 41 dias de coleta de dados.

Tabela 3.4 descreve os valores obtidos nesse estudo. O mesmo autor concluiu que a ET_0 medida com o lisímetro de pesagem, apresentou boa concordância com os valores diários

estimados pelo modelo de *Penman-Monteith*, já para os lisímetros de drenagem e de nível constante os resultados se apresentaram inconsistentes em base diária e quinquidiária de cálculo. Porém o período de análise foi pequeno, com apenas 41 dias de coleta de dados.

Tabela 3.4 Valores de evapotranspiração de referência acumulada (ET_o) medidos e estimados durante o período de 21/02/96 a 01/04/96 (SILVA, 1996)

Dispositivo e/ou método		Evapotranspiração de referência (ET_o) (mm.dia ⁻¹)	Evapotranspiração de referência (ET_o) (mm)
Métodos Diretos	Lisímetro de pesagem	3,04	124,84
	Lisímetro de drenagem	3,59	147,42
	Lisímetro de nível constante	3,38	138,76
Métodos Indiretos	<i>Penman-Monteith</i>	3,39	139,14
	Tanque Classe A	1,95	80,33

Assis (1978) comparou 184 valores de ET_o obtido através de um lisímetro de nível constante com os valores estimados pelo método de *Penman*, obtendo um coeficiente de correlação de 0,83, altamente significativo. Machado (1996) analisou 150 medidas de evapotranspiração em um lisímetro de nível constante com aquelas obtidas através da equação de *Penman-Monteith*, concluindo que para valores médios decendiais apresentaram uma concordância muito boa, com coeficiente de correlação igual a 0,91.

No geral, lisímetros são empregados para cultura de porte pequeno ou médio. Porém Fritschen et al. (1973) utilizou lisímetro com árvore de 28 m de altura em uma floresta. Para determinar a evapotranspiração de florestas ou culturas de grande porte como eucaliptos geralmente são utilizados métodos sem movimentação de solo, e com instalação e manuseio mais fácil como os micrometeorológicos (Balanço de energia e razão de *Bowen*, correlações de turbilhões e método aerodinâmico). Pois esses métodos não necessitam isolar uma porção de solo para medir a evapotranspiração. Consistem em medir variáveis micrometeorológicas (saldo de radiação, umidade relativa, perfil de velocidades do vento e temperaturas) sobre a vegetação de interesse.

A forma da superfície evaporante do lisímetro depende do objetivo. Lisímetros com formato circular facilitam a distribuição do peso sobre as células de carga. Por outro lado, os lisímetros em formato retangular são mais indicados devido a facilidade de construção.

Os lisímetros monolíticos, quando a porção de solo é retirada intacta, possuem a vantagem de representar as condições de campo sem a necessidade de se esperar alguns meses para que haja a acomodação do solo (PEREIRA et al., 2013). Quando se trabalha com lisímetros não monolíticos deve-se realizar um molhamento frequente e se possível esperar algum tempo para se iniciar as medidas. Porém é bem mais fácil construir um lisímetro fazendo uma trincheira e repor o solo dentro da caixa na sequencia inversa. Essa opção

também não exige que se levante grande peso com auxílio de guindaste para colocar o sistema de drenagem ao fundo da caixa do lisímetro, como verificado nos trabalhos de Feltrin (2013) e Oliveira (2006).

O material que se emprega na construção da caixa principal do lisímetro também deve ser analisado. O inox vem sendo utilizado para construção da caixa principal do lisímetro, por ser leve resistente à água e durável. Diferença de aquecimento nas paredes do lisímetro pode causar uma evapotranspiração desigual quando comparada entre o lisímetro e áreas adjacentes. Allen et al. (1991) destacam que esse erro pode ser da mesma magnitude da exatidão da evapotranspiração (30 W/m^2 é equivalente à $0,04 \text{ mm/h}$ de evapotranspiração). Deve-se atentar para o fato que a superfície evaporante do lisímetro fica exposta a ação de roçadeiras e máquinas de poda nos gramados de estações climatológicas, assim é essencial utilizar materiais resistentes.

A profundidade do lisímetro depende do objetivo, lisímetros para analisar a evapotranspiração de culturas agrícolas devem ser profundos o suficiente para envolver completamente as raízes da cultura. Geralmente adotam-se profundidades variando de 0,7 à 2,0 m. Por outro lado, devem ser bem profundos os lisímetros para analisar a recarga de aquíferos. Kitching e Shearer (1982) estimaram a recarga subterrânea utilizando um lisímetro com 5 m de profundidade.

Para estimar a evapotranspiração com lisímetros devem-se medir as outras variáveis do balanço hídrico, no mínimo a chuva, irrigação e drenagem, e assim obter a evapotranspiração como resíduo final. Em períodos com excessivas chuvas, mesmo utilizando pluviômetros para medir a drenagem, essa medida apresenta problemas como transbordamento ou mal funcionamento dos pluviômetros, conforme relatado por Feltrin et al. (2011); Medeiros (2008) e Peruchi (2009).

Quanto ao custo e operação, os lisímetros de drenagem são os mais simples e baratos quando relacionados aos demais. Esses lisímetros devem ser irrigados constantemente para manter a variação de armazenamento de água no solo próxima a zero. Porém, produzem estimativas consistentes de evapotranspiração em períodos iguais ou superiores a uma semana (PEREIRA et al., 2013). Segundo esses autores, para minimizar o tempo de trânsito da água nesse tipo de lisímetro sua profundidade não deve ser excessivamente maior do que aquela necessária para conter as raízes. Um problema comum que pode afetar todos os lisímetros é o escoamento de água pela parede interna dos lisímetros sem permear o solo afetando as medidas.

Os lisímetros de pesagem possuem a vantagem de determinar a evapotranspiração em períodos inferiores a uma hora e permitem a comparação com métodos micrometeorológicos. Entretanto, são sistemas de elevado custo. Santiago (2001) destaca que lisímetro de pesagem, com célula de carga de alta sensibilidade, impossibilita a evapotranspiração em escala horária quando há elevada velocidade do vento, esta produz variações positivas na massa do lisímetro sem que haja qualquer acréscimo real de evapotranspiração. Ainda, segundo esse autor em períodos com chuvas prolongadas e intensas, o lisímetro de pesagem fornece valores questionáveis de evapotranspiração.

Lisímetros com nível de água constante possuem a vantagem de não provocar uma perda excessiva de nutrientes devido a irrigação superficial constante, como no lisímetro de drenagem. O sistema de drenagem de um lisímetro com nível constante deve funcionar visando retirar o mais rápido possível a água proveniente das chuvas, evitando que o solo fique encharcado acima do nível freático. Machado e Mattos (2001) elaboraram um lisímetro de nível constante com uma caixa do sistema de drenagem separada e um recipiente com a atendendo a essa finalidade. Se o nível de água no lisímetro é mantido muito próximo da superfície para permitir o constante abastecimento da zona de raízes, esse fato pode impedir o crescimento da zona radicular e proliferação de doenças.

Segundo Aboukhaled et al. (1982) o movimento ascendente da água a partir do nível constante pode não atender completamente a demanda especialmente em condições extremas de evaporação, resultando em valores mais baixos de evapotranspiração. Em alguns casos esses autores recomendam que seja adicionado um sistema de irrigação por superfície.

O lisímetro com nível constante apresenta uma operação tão simples como o de drenagem, evita a perda desnecessária de nutrientes do solo e assegura um suprimento de água adequado para uma região sem longo período com elevado déficit hídrico, ou com o nível de água próximo a superfície terrestre.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA)

O trabalho experimental foi desenvolvido na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), da Escola de Engenharia de São Carlos, apresentada na Figura 4-1. Este posto agrometeorológico convencional de primeira classe possui uma área de 10.000 m², cujas coordenadas geográficas são: Latitude 22° 01' 22" S,

Longitude 43° 57' 38" W e altitude de 733 metros. Está localizado no km 13 da rodovia Domingos Innocentini, município de Itirapina (SP), às margens da Represa do Lobo e distante cerca de 23 km do Campus 1 da Universidade de São Paulo (USP), no centro da cidade de São Carlos. Na Tabela 4-1 estão descritos os instrumentos meteorológicos presentes na estação e utilizados nessa pesquisa.

Figura 4-1 Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada.

Tabela 4-1 Instrumentos meteorológicos e medidas realizadas na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA)

Variável Agrometeorológica	Estação Convencional (Observação diária às 7:00)	Estação Automática datalogger (CR10X e CR1000) – Campbell Scientific
<i>Chuva</i>	Pluviômetro <i>Ville de Paris</i>	Pluviógrafo de Bâscula (<i>Texas Eletronics</i> 0.1 mm)
<i>Irradiância Solar Global</i>	Actinógrafo Bimetálico <i>Robitzsch (Fuess)</i>	Piranômetro de Fotodiodo de Silício (<i>Licor</i>)
<i>Insolação</i>	Heliógrafo <i>Campbell Stokes (Fuess)</i>	Blake Larsen Sun Recorder
<i>Saldo de Radiação</i>	Não Dispõe	NR Lite (<i>Kipp & Zonen</i>)
<i>Pressão Atmosférica</i>	Barômetro de cuba fixa e Barógrafo capsula aneróide (ambos <i>Fuess</i>)	Barômetro <i>Vaisala</i>
<i>Temperatura do Ar</i>	Termômetro de Máxima com estrangulamento e mercúrio em vidro (<i>Fuess</i>). Termômetro de Mínima com álcool etílico em vidro e bulbo bifurcado (<i>Fuess</i>). Termógrafo com lâmina bimetálica constituída de bronze e invar, ambos instalados em abrigo meteorológico convencional.	Termistor (<i>Vaisala</i> HMP45C) localizado em abrigo de 10 pratos
<i>Umidade Relativa</i>	Higrógrafo de cabelo (<i>Fuess</i>) instalado em abrigo meteorológico convencional.	Sensor Capacitivo (<i>Vaisala</i> HMP45C) localizado em abrigo de 10 pratos
<i>Velocidade e Direção do Vento</i>	Anemômetro de 3 canecas a 2,0 m do solo	Anemômetro de 3 canecas com cata-vento (<i>Young</i>)
<i>Evaporação de Superfície Livre</i>	Tanque Classe A e 20 m ² ambos com parafuso micrométrico	Não dispõe
<i>Poder Evaporante do Ar a sombra</i>	Atmômetro de Pichê	Não dispõe
<i>Evapotranspiração do Gramado</i>	Não Dispõe	Atmômetro <i>ETgage</i>

A região possui temperatura e umidade relativa média de 21,6 °C e 71%, respectivamente. Fevereiro é o mês mais quente com temperatura média de 24,3 °C, junho e julho são os meses mais frios com as menores temperaturas (17,7 °C). A precipitação média mensal de julho é a menor, sendo de apenas 28 mm. Agosto apresenta a menor umidade relativa média, com 64%, e a maior média de duração do brilho solar com 263 horas/mês. Janeiro é o mês mais nublado (167 horas de insolação por mês), úmido (UR_{med} 77%) e chuvoso (286 mm). A precipitação média anual, entre 1979 e 2014, foi de 1485 mm.

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 (MACHADO; MATTOS, 2001).

4.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no experimento foram coletados durante 62 meses compreendendo o período de 30/10/2010 até 31/12/2015.

Esses dados foram obtidos através dos equipamentos convencionais da Estação Climatológica e serviram para estimar a evapotranspiração, evaporação e realizar uma análise em conjunto com os dados lisimétricos e evaporimétricos. Foram utilizados os seguintes dados utilizados: evaporação do tanque padrão (E_{20}), precipitação (P), temperatura máxima do ar ($t_{máx}$), temperatura mínima do ar ($t_{mín}$), temperatura média do ar (t_{med}), pressão atmosférica (P_{atm}), velocidade média do vento a 2,0 m de altura (U_2), umidade relativa máxima ($UR_{máx}$), umidade relativa mínima ($UR_{mín}$), umidade relativa média (UR_{med}), irradiância solar global na superfície (R_s), saldo de radiação (R_n), insolação ou duração do brilho solar (n) e evaporação do Pichê (E_{piche}). Na Tabela 4-2 estão descritos as variáveis meteorológicas medidas e utilizadas nessa pesquisa.

Tabela 4-2 Descrição dos dados meteorológicos utilizados com a unidade de medição, tempo e horário de observação

Variável Meteorológica			Unidade	Escala Temporal
Evaporação	Tanque Padrão	E_{20}	mm/d	Evaporação obtida no período de 24 horas
Precipitação (<i>Ville de Paris</i>)		P		Total precipitado durante 24 horas
Temperatura do ar (Termômetros e termógrafo <i>Fuess</i>)	Máxima	$t_{máx}$	°C	Temperatura máxima observada durante 24 horas
	Mínima	$t_{mín}$		Temperatura mínima observada durante 24 horas
	Média	t_{med}		Temperatura média observada, que compreende as temperaturas máxima e mínima juntamente com as temperaturas medidas as 09:00, 15:00 e 21:00.
Pressão atmosférica (Barômetro <i>Vaisala</i>)		P_{atm}	mbar	Pressão atmosférica horária
Velocidade média do vento (Anemômetro de 3 conchas <i>Fuess</i>)	2,0 m de altura do solo	U_2	m/s	Velocidade média do vento obtida durante 24 horas
Umidade relativa (Higrógrafo de cabelo humano <i>Fuess</i>)	Média	UR_{med}	%	Umidade relativa média, que compreende a umidade relativa medida às 09:00, 15:00 e duas vezes a observada às 21:00
Irradiância Solar Global (Piranômetro de Fotodiodo Licor)		R_s	MJ/m/dia	Irradiância solar global diária
Insolação ou duração do brilho solar (heliógrafo <i>Campbell-Stokes</i>)		n	Horas/dia	Insolação diária

4.3 Lisímetros e tanque de evaporação com nível constante

Nesta pesquisa, foram construídos um tanque de evaporação (*tenc*) e dois lisímetros, todos adotando como princípio de funcionamento a manutenção do nível de água constante. Um dos lisímetros foi preenchido com solo argiloso (*lis-arg*) e o outro com solo arenoso (*lis-aren*). Em ambos a superfície evaporante foi coberta com grama batatais.

4.3.1 Funcionamento dos lisímetros e do tanque de evaporação

Com a evapotranspiração ou evaporação há um abaixamento do nível de água dentro dos lisímetros e do tanque de evaporação, porém cada sistema é ligado diretamente com uma caixa reguladora de nível. Esta caixa, através do princípio físico dos vasos comunicantes, supre de água os lisímetros e tanque de evaporação até estabelecer o equilíbrio. Este suprimento, por sua vez, provoca um abaixamento no nível de água dentro da caixa reguladora de nível, fazendo com que a torneira de boia libere água do reservatório de alimentação no mesmo volume correspondente a evaporação ou evapotranspiração. Esse volume transformado em lâmina correspondente à área de exposição do lisímetro ou do tanque de evaporação.

Durante a ocorrência de precipitações, o nível de água nos lisímetros e tanque de evaporação tende a se elevar. Esse aumento de nível será transmitido também para a caixa do

sistema de drenagem, fazendo com que o conjunto de tubos na posição vertical dentro da caixa direcione o volume de água excedente para o tanque coletor graduado. Dessa forma, o nível de água permanece e o acréscimo de água proveniente das precipitações é medido no tanque graduado.

4.3.2 Descrição dos lisímetros (lis-arg e lis-aren) e tanque de evaporação (tenc)

A Figura 4-2 e a Figura 4-3 ilustram os lisímetros, tanque de evaporação e os reservatórios graduados. Os lisímetros e o tanque de evaporação consistem de caixas enterradas; fabricadas de fibra de vidro com 1,52 m de diâmetro inferior, 1,88 m de diâmetro superior e 1,32 m de profundidade, tendo uma área de exposição de 2,78 m². Maiores detalhes da montagem dos lisímetros podem ser vistos no apêndice 8.

Na parte inferior dos lisímetros e do tanque de evaporação, foram acoplados tubos de Policloreto de Vinil (PVC) de 32 mm, por onde se dá o abastecimento de água. Esses tubos são ligados a uma caixa reguladora de nível localizada no abrigo subterrâneo, contendo uma torneira de boia para manter o nível de água. As caixas reguladoras de níveis dos lisímetros são ligadas através de tubos a reservatórios com volume de 90 litros. O reservatório ligado ao tanque de evaporação possui uma capacidade de 360 litros. Nesses reservatórios, são feitas as leituras diárias do volume de água consumida pelo processo de evapotranspiração ou evaporação. O nível de água dentro dos reservatórios é verificado através de mangueiras transparentes de silicone, com graduação e localizado na parte externa.

Figura 4-2 Visão geral dos lisímetros e tanque de evaporação (CABRERA, 2011)

Figura 4-3 Reservatórios com mangueira incolor, tubo de vidro transparente e escala graduada para verificação de nível. Os reservatórios são abastecidos com água, geralmente uma vez por mês (CABRERA, 2011).

O sistema de drenagem dos lisímetros consiste de dois tubos de PVC de 50 mm, independentes, localizados na camada de brita. Junto à estes dois tubos, são interligados lateralmente outros quatro tubos de igual diâmetro, formando uma rede de drenagem na forma de “espinha de peixe” com orifícios por onde o excesso de água escoar até uma caixa localizada no abrigo subterrâneo.

O nível de água dos lisímetros está a 1,0 m abaixo da superfície do terreno, mas para o tanque de evaporação este nível está na mesma altura da superfície evaporante dos lisímetros.

As Figuras 4-4 a 4-7 representam os desenhos esquemáticos dos lisímetros e tanque de evaporação. A Figura 4-8 e a Figura 4-9 ilustram os lisímetros e tanque de evaporação na Estação Climatológica do CRHEA.

Figura 4-4 Planta dos lisímetros e tanque de evaporação (tenc), ilustrando as caixas principais dos lisímetros com sistema de drenagem na forma de “espinha de peixe”. Dentro do abrigo subterrâneo, estão representadas as caixas auxiliares de cada sistema com a finalidade de manter o nível constante de água, independente da precipitação ou evapotranspiração. Representação sem escala e com dimensões em metros (CABRERA, 2011).

Figura 4-5 Perfil do tanque de evaporação e do abrigo subterrâneo com a caixa reguladora de nível, caixa do sistema de drenagem e tanque coletor graduado. A caixa reguladora possui uma torneira de boia para suprimento contínuo de água, independente da evaporação. A caixa do sistema de drenagem possui dois tubos na posição vertical (tulipas) para direcionar o excedente de água proveniente das precipitações no tanque de evaporação. Representação sem escala e com dimensões em metros (CABRERA, 2011).

Figura 4-6 Perfil do lisímetro e do abrigo subterrâneo com a caixa reguladora de nível, caixa do sistema de drenagem e tanque coletor graduado. O nível de água no interior dos lisímetros foi mantido a 1,0 m abaixo da superfície do terreno. A caixa reguladora possui uma torneira de boia para suprimento contínuo de água, independente da evapotranspiração. A caixa do sistema de drenagem possui dois tubos na posição vertical (tulipas) para direcionar o excedente de água proveniente das precipitações nos lisímetros. Representação sem escala e com dimensão em metros (CABRERA, 2011).

Figura 4-7 Planta detalhada do abrigo subterrâneo e reservatórios de alimentação. Cada sistema possui uma caixa reguladora de nível, uma caixa de drenagem e um tanque coletor para armazenar o volume de água proveniente das precipitações. O tanque de evaporação possui um tanque auxiliar que entra em funcionamento após o preenchimento do tanque coletor graduado principal. Representação sem escala e com valores em metros (CABRERA, 2011).

Figura 4-8 Lisímetros e tanque de evaporação dentro da Estação Climatológica do CRHEA (CABRERA, 2011).

Figura 4-9 Visão superior da caixa do sistema de drenagem, caixa reguladora de nível e tanque coletor graduado do *lis-arg* (CABRERA, 2011).

4.4 Retirada do solo argiloso

O *lis-arg* foi preenchido com solo argiloso desagregado proveniente de uma área minerada nas nascentes do rio Uberabinha em Uberaba–MG. A amostra de 5 m³ de solo foi disponibilizada e transportada por uma mineradora a partir do seu pátio de estocagem. O solo argiloso que compoe o *lis-arg* é utilizado na fabricação de artigos refratários.

4.5 Preenchimento do lisímetro com solo argiloso (*lis-arg*)

Na parte inferior do lisímetro, inicialmente foi colocado um conjunto de tubos furados na forma de espinha de peixe. Em seguida, colocou-se uma camada de brita para encobrir os tubos e, por cima desta camada, foi disposta uma manta geotêxtil com uma fina camada de areia grossa. O *lis-arg* foi preenchido com solo argiloso em camadas de 30 cm de espessura. Após o enchimento completo da caixa principal do lisímetro para fins de adensamento do solo, o mesmo foi irrigado até a saturação e, em seguida, o lisímetro foi drenado. A Figura 4-10 ilustra o preenchimento do lisímetro.

Figura 4-10 Imagens da implantação do sistema de drenagem mostrando o preenchimento do *lis-arg* com o umedecimento completo do solo para fins de adensamento (CABRERA, 2011).

Figura 4-12 Escavação em área de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní para retirada do solo arenoso que compõe o lisímetro *lis-aren* utilizado no trabalho, data das imagens 25-08-2010 (CABRERA, 2011).

4.7 Preenchimento do lisímetro com solo arenoso (*lis-aren*)

Na parte inferior do lisímetro, inicialmente foi colocado um conjunto de tubos furados na forma de espinha de peixe. Em seguida, colocou-se uma camada de brita para encobrir os tubos e, por cima desta camada, foi disposta uma manta geotêxtil com uma fina camada de areia grossa. O *lis-aren* foi preenchido com solo arenoso em camadas de 30 cm de espessura, na mesma sequência verificada no campo. Após o enchimento completo da caixa principal do lisímetro para fins de adensamento do solo, o mesmo foi irrigado até a saturação e em seguida o lisímetro foi drenado. A Figura 4-13 ilustra o preenchimento do lisímetro.

Figura 4-13 Imagens da implantação do sistema de drenagem em sequência, o preenchimento do *lis-aren* com o umedecimento completo do solo para fins de adensamento (CABRERA, 2011).

4.8 Caracterização física dos solos

O *lis-arg* e *lis-aren* foram preenchidos com solos desagregados.

4.8.1 Solo do *lis-arg*

Foi coletada uma amostra composta do material argiloso antes da disposição na caixa principal do lisímetro. A granulometria é apresentada na Tabela 4-3 e Figura 4-14.

Tabela 4-3 Granulometria do solo argiloso no *lis-arg* (CABRERA, 2011)

Diâmetro das Partículas (mm) ABNT	Granulometria (%)
Pedregulho > 2,0	0,7
2,0 > Areia Grossa > 0,6	2,6
0,6 > Areia Média > 0,2	8,8
0,2 > Areia Fina > 0,06	2,4
0,06 > Silte > 0,002	20,1
0,002 > Argila	65,4

Figura 4-14 Curva granulométrica do solo argiloso no *lis-arg* (CABRERA, 2011).

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. Quando suficientemente úmido, molda-se facilmente de diferentes formas; 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). Através da curva granulométrica, conclui-se que o solo do *lis-arg* é uma argila siltosa.

4.8.2 Solo do *lis-aren*

Foi coletada uma amostra composta com três diferentes profundidades (20, 40 e 80 cm) durante a extração do solo na área de afloramento do Aquífero Guarani. A granulometria é apresentada na Tabela 4-4 e Figura 4-15.

Tabela 4-4 Granulometria do solo arenoso no *lis-aren* (CABRERA, 2011)

Diâmetro das Partículas (mm) ABNT	Granulometria (%)
Pedregulho > 2,0	0,3
2,0 > Areia Grossa > 0,6	8,8
0,6 > Areia Média > 0,2	63,6
0,2 > Areia Fina > 0,06	16,4
0,06 > Silte e Argila	10,9

Figura 4-15 Curva granulométrica do solo arenoso no *lis-aren* (CABRERA, 2011).

O solo do *lis-aren* é denominado areia fina a média, possuindo a predominância de partículas com diâmetro de 0,06 a 0,6 mm em sua composição. Apresenta característica não coesiva e não plástica sendo, formado por minerais ou partículas de rochas.

4.9 Equipamento de monitoramento do nível de água

Dentro dos reservatórios de alimentação dos lisímetros e tanque de evaporação, foram colocados sensores de pressão para monitorar o nível de água. Esses sensores facilitam o monitoramento e permitem aumentar a frequência de medições sem a presença de um observador, possibilitando registrar variações de nível em um curto intervalo de tempo nos horários menos favoráveis a observação humana, como, por exemplo, períodos noturnos, feriados e finais de semana.

A Figura 4-16 ilustra o equipamento utilizado para determinar o nível de água nos reservatórios que abastecem os lisímetros.

Figura 4-16 Sensor de pressão e temperatura MiniDiver e Barodiver. Leitura ótica do Barodiver para armazenamento de dados no computador (CABRERA, 2011).

4.10 Operação e manutenção dos lisímetros e tanque de evaporação

Os seguintes procedimentos foram efetuados para operação e manutenção do experimento:

- Reposição de água nos reservatórios alimentadores sempre que necessário;
- Transferência de dados, obtidos através dos sensores de nível, pressão e temperatura, para o computador portátil;
- Leituras na régua da água percolada através dos lisímetros e da água drenada pelo tanque de evaporação nos tanques coletores graduados;
- Esvaziamento dos tanques coletores graduados periodicamente ou após eventos chuvosos significativos;

- Remoção de palhas e folhas da superfície evaporante do tanque de evaporação;
- Retirada de vegetação invasora e indesejada nas proximidades e na superfície exposta dos lisímetros;
- Limpeza da mangueira de silicone e tubo de vidro juntamente com a escala graduada dos reservatórios de alimentação;
- Monitoramento do nível de água na caixa principal dos lisímetros através do tubo verificador de nível e com auxílio de um medidor de nível;
- Controle de formigueiros na superfície exposta dos lisímetros.

4.11 Método de *Penman-Monteith* FAO-56

A equação de *Penman-Monteith* (Equação 10) foi padronizada pelo boletim número 56 da FAO e é utilizada por vários pesquisadores em diversos países para estabelecer um padrão em relação a outras metodologias no cálculo de evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN et al., 1998).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

Δ = declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$)

R_n = saldo de radiação ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

ρ_a = massa específica do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

C_p = calor específico do ar a pressão constante ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$)

$(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa)

r_s = resistência de superfície ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

r_a = resistência aerodinâmica ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$)

$\lambda = 2,45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ à 25°C calor latente de evaporação

Com o objetivo de descrever uma vegetação hipotética de referência, foram combinadas as equações de resistência aerodinâmica e de superfície com a equação de *Penman-Monteith*. A vegetação de referência hipotética é descrita como sendo uma superfície gramada com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência de superfície de $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ definida pela FAO-56. Combinando expressões generalizadas de densidade do ar (ρ_a), com equações simplificadas

de r_a e r_s para grama, e de acordo com a parametrização proposta pela *FAO-56*, a equação 10 reduz para equação 11 expressa a seguir:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \frac{\gamma 900}{(t_{med} + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34) U_2} \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo:

Δ = declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$)

R_n = saldo de radiação total ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

γ = coeficiente psicométrico ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$)

900 = valor aproximado das constantes que constam na equação ($\text{kJ}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{d}^{-2}$)

t_{med} = temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$)

U_2 = velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referencia medida (kPa)

A sequência de cálculo do método é descrita a seguir. A declividade da curva de pressão de vapor é dada pela equação 12:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 e_s^{\frac{17,27 t_{med}}{t_{med} + 237,3}} \right]}{(t_{med} + 237,3)^2} \quad (\text{Equação 12})$$

A equação 13 descreve a temperatura média diária (t_{med}) em graus *Celsius* ($^{\circ}\text{C}$).

$$t_{med} = \frac{t_{máx} + t_{mín}}{2} \quad (\text{Equação 13})$$

$t_{máx}$ = temperatura máxima do dia ($^{\circ}\text{C}$)

$t_{mín}$ = temperatura mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$)

A pressão de saturação de vapor média (e_s) é relacionada pela equação 14.

$$e_s = \frac{[e^o(t_{máx}) + e^o(t_{mín})]}{2} \quad (\text{Equação 14})$$

$e^o(t_{máx})$ = pressão de vapor a temperatura máxima (kPa)

$e^o(t_{mín})$ = pressão de vapor a temperatura mínima (kPa)

As pressões de vapor $e^o(t_{máx})$ e $e^o(t_{mín})$ são expressas através das equações 15 e 16.

$$e^o(t_{máx}) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot t_{máx}}{t_{máx} + 237,3}\right)} \quad (\text{Equação 15})$$

$$e^o(t_{\min}) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot t_{\min}}{t_{\min} + 237,3}\right)} \quad (\text{Equação 16})$$

Para o cálculo do déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$), têm-se a pressão parcial de vapor, e_a (kPa) estabelecida pela equação 17.

$$e_a = \frac{e^o(t_{\min}) \frac{UR_{\max}}{100} + e^o(t_{\max}) \frac{UR_{\min}}{100}}{2} \quad (\text{Equação 17})$$

e_a = pressão parcial de vapor (kPa)

$e^o(t_{\min})$ = pressão de vapor a temperatura mínima (kPa)

$UR_{\max}$ = umidade relativa máxima obtida através do termohigrógrafo de cabelo (%)

$e^o(t_{\max})$ = pressão de vapor a temperatura máxima (kPa)

$UR_{\min}$ = umidade relativa mínima obtida através do termohigrógrafo de cabelo (%)

Devido à falta de dados de $UR_{\max}$ e $UR_{\min}$ foi utilizada a equação 18.

$$e_a = e_s \left(\frac{UR_{\text{med}}}{100} \right) \quad (\text{Equação 18})$$

e_a = pressão parcial de vapor (kPa)

UR_{med} = umidade relativa média (%)

A umidade relativa média UR_{med} (%) foi calculada utilizando a equação 19 com as medições obtidas através do termohigrógrafo de cabelo.

$$UR_{\text{med}} = \frac{UR_9 + UR_{15} + 2 UR_{21}}{4} \quad (\text{Equação 19})$$

UR_9 = umidade relativa às 9:00 da manhã (%)

UR_{15} = umidade relativa às 15:00 da tarde (%)

UR_{21} = umidade relativa às 21:00 da noite (%)

A pressão atmosférica foi estimada utilizando a equação 20.

$$P_{\text{atm}} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad (\text{Equação 20})$$

P_{atm} = pressão atmosférica (kPa)

Z = altitude do local, corresponde a 733 m

O coeficiente psicrométrico é estimado através da equação 21.

$$\gamma = \frac{C_p P_{atm}}{\varepsilon \lambda} \quad (\text{Equação 21})$$

γ = coeficiente psicrométrico (kPa.°C⁻¹)

$C_p = 1,013 \times 10^{-3}$ (MJ.Kg⁻¹.°C⁻¹) calor específico à pressão constante

P_{atm} = pressão atmosférica (kPa)

$\varepsilon = 0,622$ é a relação entre o peso molecular do vapor d'água e do ar seco

$\lambda = 2,45$ (MJ.Kg⁻¹) calor latente de evaporação da água

O saldo de radiação (R_n) pode ser medido ou estimado através da equação 22.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Equação 22})$$

Sendo, R_{ns} , o saldo de radiação de ondas curtas e R_{nl} , o saldo de radiação de ondas longas.

R_{ns} é dado pela equação 23.

$$R_{ns} = (1 - r).R_s \quad (\text{Equação 23})$$

Sendo que r é o albedo ou coeficiente de reflexão, cujo valor recomendado em literatura para cultura padrão (grama batatais) é 0,23, e R_s é a radiação solar global que pode ser medida em superfície ou estimada através da equação 24 (*Angstrom-Prescott*).

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) . R_a \quad (\text{Equação 24})$$

a_s e b_s são constantes de valores 0,25 e 0,50, respectivamente (a soma dessas constantes corresponde à transmissividade atmosférica), n é a insolação diária ou duração do brilho solar obtido através do heliógrafo e N são as horas de máximo fotoperíodo.

As horas de fotoperíodo (N) são obtidas através da equação 25.

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (\text{Equação 25})$$

ω_s é o ângulo horário do pôr do sol, em radianos, estimado pela equação 26.

$$\omega_s = \arccos[-tg(\varphi).tg(\delta)] \quad (\text{Equação 26})$$

Assim φ é a latitude do local em radianos e δ a declinação solar também em radianos, obtida através da equação 27:

$$\delta = 0,4093 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot NDA - 1,39\right) \quad (\text{Equação 27})$$

NDA é a número do dia no ano.

A radiação solar no topo da atmosfera (R_a) em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ é obtida através da equação 28.

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (\text{Equação 28})$$

G_{sc} a constante solar igual a $0,0820 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$

d_r é a distancia relativa do sol a Terra em radianos, cuja expressão é dada pela equação

29.

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} NDA\right) \quad (\text{Equação 29})$$

O saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) é calculado com auxílio de equação de *Brunt* (30).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(t_{máx} + 273,16)^4 + (t_{mín} + 273,16)^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (\text{Equação 30})$$

30)

R_{nl} é o saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* com o valor de $4,903 \times 10^{-9} \text{ (MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1})$

$t_{máx}$ é a temperatura máxima registrada pelo termômetro de máxima ($^{\circ}\text{C}$)

$t_{mín}$ é a temperatura mínima registrada pelo termômetro de mínima ($^{\circ}\text{C}$)

e_a é a pressão parcial de vapor (kPa)

R_s é a irradiância solar global ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)

R_{so} é a irradiância solar, quando $n \cdot N^{-1}$ é igual a 1,0 e foi calculada através da equação

31.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z) R_a \quad (\text{Equação 31})$$

Z = altitude do local, corresponde a 733 m

O fluxo de calor no solo (G) pode ser considerado nulo para períodos diários conforme recomendação do boletim da *FAO-56*.

4.12 Balanço hídrico

O balanço hídrico nos lisímetros foi estimado segundo a equação 32

$$P + I = D + ET \quad (\text{Equação 32})$$

P é a precipitação medida com um pluviômetro *Ville de Paris*

I é a irrigação

D é a drenagem

ET é a evapotranspiração estimada como resíduo da equação

4.13 *ETgage* e razão de *Bowen*

Um atmômetro composto de copo cerâmico (tipo *Bellani*) coberto com uma lona verde, reservatório de água e um sistema eletrônico de medição foi instalado para medir a evapotranspiração de referência ou a evaporação de um gramado irrigado. O tecido verde simula o dossel de uma cultura. O *ETgage* possui um reservatório que fornece água para umedecimento da cápsula, desta forma, quando ocorre evaporação há um fluxo de água entre o reservatório e a cápsula porosa evaporante (Figura 4-17). Esse fluxo é medido por um sistema eletrônico e contabilizado como 0,2 mm.

Figura 4-17 *ETgage* à esquerda e a haste com os dois níveis de medição à direita para o método da razão de *Bowen*.

Uma torre com dois psicrômetros aspirados de termopar visando à medição de gradientes de temperatura e pressão de vapor foi colocada acima da grama batatais da estação (MARIN et al., 2001). Esses gradientes juntamente com o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo permitiram determinar a evapotranspiração com o método micrometeorológico do balanço de energia e razão de *Bowen*. O equacionamento necessário a aplicação desse método é descrito pela equação 33 e equação 34 (PEREIRA et al., 2013). Para aplicar esse método é necessário também utilizar um critério de rejeição de medidas. Foi utilizado o critério

proposto por Perez et al. (1999). Valores de evapotranspiração noturna foram desprezados. Dados de temperatura, saldo de radiação e fluxo de calor foram coletados em um *datalogger* modelo *CR1000* marca *Campbell Scientific*, o intervalo entre as leituras escolhido foi de 30 minutos.

$$ET = \frac{R_n - G}{\lambda(1 + \beta)} \quad (\text{Equação 33})$$

$$\beta = \frac{\gamma t_{s2} - t_{s1}}{(\Delta + \gamma)(t_{u2} - t_{u1}) - \gamma(t_{s2} - t_{s1})} \quad (\text{Equação 34})$$

Sendo:

ET evapotranspiração (mm/30 min)

β razão de *Bowen* ou razão entre o calor sensível e o calor latente

R_n é o saldo de radiação medido sobre a superfície ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

t_{s1} temperatura bulbo seco nível 1 ($^{\circ}\text{C}$) - (70 cm acima da grama)

t_{s2} temperatura bulbo seco nível 2 ($^{\circ}\text{C}$) - (200 cm acima da grama)

t_{u1} temperatura bulbo úmido nível 1 ($^{\circ}\text{C}$) - (70 cm acima da grama)

t_{u2} temperatura bulbo úmido nível 2 ($^{\circ}\text{C}$) - (200 cm acima da grama)

γ coeficiente psicrométrico ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$) – equação 21

Δ declividade da curva de saturação de vapor ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$) – equação 12

$\lambda = 2,45 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ à 25°C calor latente de evaporação

Adotando uma altura média para a grama batatais de 0,15 m e o deslocamento do plano zero como 67% dessa altura tem-se uma bordadura necessária é de aproximadamente 68 metros, considerando também que o psicrômetro aspirado mais elevado está a 2,0 m de altura (PEREIRA et al., 2013). A Estação Climatológica do CRHEA possui esse valor de bordadura exigido. O outro psicrômetro aspirado foi colocado a 0,7 m, mantendo uma distância mínima maior que 0,5 m da grama, para facilitar manutenção e evitar que eventuais falhas no corte da grama prejudicasse a aspiração.

4.14 Tanque 20 m²

A evaporação de uma superfície livre de água foi estimada com o *tenc* e também com um tanque 20 m² que é considerado padrão. Pereira et al. (1997) citam as características do tanque 20 m² a seguir:

O tanque 20 m² é um tanque cilíndrico, com 5 m de diâmetro, 2 m de profundidade, resultando numa superfície de evaporação igual a 20 m². O fundo é plano, construído de chapa de ferro de 1/4" de espessura, e parede lateral de 3/16". O tanque é enterrado, deixando-se uma borda de 0,075 m acima do solo, sendo pintado internamente de branco. As medidas são feitas num poço tranquilizador que se comunica com a água do tanque através de um tubo de 3/4" de diâmetro, cuja extremidade se localiza no fundo do tanque, para minimizar a agitação da água pelos ventos.

A variação de nível no tanque Padrão (20 m²) é medida com auxílio de um parafuso micrométrico, que possui uma ponta de medida tipo gancho assentada em cima de um poço tranquilizador devidamente nivelado e fixado na parede lateral do tanque, sendo a precisão de medida cerca de 0,02 mm. A leitura de nível é realizada todos os dias às 7:00 horas da manhã e a diferença de duas leituras consecutivas dá o valor de evaporação. A Figura 4-18 ilustra o tanque 20 m².

Figura 4-18 Conjunto de tanques 20 m² (Padrão) localizado na Estação Climatológica do CRHEA em Itirapina – SP.

A determinação da lâmina no tanque 20 m² (E_{20}) é estimada com auxílio da equação 35.

$$E_{20} = L_I + P - L_F \quad (\text{Equação 35})$$

E_{20} evaporação obtida no tanque 20 m² (mm/dia)

L_I leitura inicial no parafuso micrométrico em forma de gancho (mm)

P precipitação ocorrida no período considerado (mm)

L_F leitura final no parafuso micrométrico em forma de gancho (mm)

4.15 Método de Linacre

Esse método foi utilizado para preencher as falhas de dados evaporimétricos do tanque 20 m². É baseado na simplificação dos dois termos (adiabático e diabático) da equação de Penman (1948) com a utilização de relações empíricas de saldo de radiação e poder evaporante do ar, que tiveram desempenho satisfatório em vários climas do mundo (LINACRE, 1993). O autor substituiu a função aerodinâmica do vento por uma simplificação ($2,5U_2$). A equação 36 representa o método de Linacre para estimar a evaporação de superfície livre.

$$E_L = 0,015 + (0,00042t_{med}) + (10^{-6} Z)[(0,8 Q_g) - 40 + 2,5 F U_2 (t_{med} - t_d)] \quad (Equação 36)$$

E_L evaporação de superfície livre estimada com método de Linacre (mm/dia)

t_{med} temperatura média do ar (°C), estimada em função dos extremos $(t_{máx} + t_{mín})/2$

Q_g irradiância solar global ($W m^{-2}$)

F fator de correção devido à altitude do local [$F = 1 - (8,7 \cdot 10^{-5}Z)$]

Z altitude do local (m) igual à 733 m

U_2 velocidade média diária do vento à 2,0 m ($m s^{-1}$)

t_d temperatura do ponto de orvalho (°C) – Equação 37

$$t_d = \left(237,3 \ln \frac{e_a}{0,6108} \right) / \left(17,27 - \ln \frac{e_a}{0,6108} \right) \quad (Equação 37)$$

e_a = pressão parcial de vapor (kPa) – Equação 18

4.16 Cobertura de grama

A superfície evaporante dos lisímetros foi coberta com grama batatais. Para avaliar a cobertura vegetal foi utilizado o *software CobCal* versão 2.1. Imagens da área superficial dos lisímetros, durante o dia, foram feitas e processadas no *software*. A indicação da cobertura vegetal era feita por cores selecionadas conforme interpretação do usuário (Figura 4-19).

Figura 4-19 Programa de computador CobCal que foi utilizado para composição dos índices de cobertura vegetal dos lisímetros.

4.17 Umidade do solo

A umidade do solo nos lisímetros foi medida com auxílio de duas sondas que utilizam o método da reflectometria no domínio da frequência. As sondas *EnviroSCAN*® da *Sentek* são constituídas por um tubo de acesso fixado no solo com 1,0 m de profundidade e sensores ajustáveis a cada 10 cm. O primeiro sensor foi colocado a 10 cm de profundidade, o segundo a 40 cm e o último a 80 cm (Figura 4-20).

As sondas foram escolhidas devido à sua facilidade de instalação nas condições experimentais e possibilidade de alteração dos níveis de medição. Evett et al., (2006) avaliaram dispositivos de medição da umidade e destacaram que o instrumento fabricado pela *Sentek* apresentou bons resultados.

Figura 4-20 Disposição da sonda de umidade com três sensores no interior do lisímetro. Níveis de medição de umidade no solo também são mostrados.

Os dados gerados pela sonda ficaram armazenados em um *datalogger CR1000®* (Campbell Scientific) que foi programado para efetuar leituras com frequência de 10 minutos. A curva de calibração para o solo arenoso foi obtida no trabalho de (YOULTON, 2013). Para o solo argiloso foi utilizado uma curva genérica disponibilizada pelo fabricante da sonda.

Com os dados de umidade do solo em diferentes profundidades expressos em %, estimou-se a lamina de água (ARM) contida no perfil dos lisímetros até 90 cm (Equação 38). O método do trapézio foi utilizado. Maiores detalhes sobre esse método podem ser consultados no texto de Libardi (2012).

$$ARM = \left\{ \left(\frac{\theta_{10}}{100} \right) 0,1 + \left[\frac{\left(\frac{\theta_{10}}{100} \right)}{2} + \frac{\left(\frac{\theta_{40}}{100} \right)}{2} \right] 0,3 + \left[\frac{\left(\frac{\theta_{40}}{100} \right)}{2} + \frac{\left(\frac{\theta_{80}}{100} \right)}{2} \right] 0,4 \right\} 1000 \quad (\text{Equação 38})$$

ARM = Lâmina de água armazenada no perfil (0-90 cm) do lisímetro (mm.dia⁻¹)

Θ_{10} = Umidade no solo à 10 cm de profundidade (%)

Θ_{40} = Umidade no solo à 40 cm de profundidade (%)

Θ_{80} = Umidade no solo à 80 cm de profundidade (%)

4.18 Análise estatística

Fui utilizado a regressão linear para atestar os valores e a significância dos coeficientes de determinação (R²). Também foi utilizado o índice de exatidão, proposto por Willmott et al. (1985) (Equação 39).

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum [(P_i - O) + (O_i - O)]^2} \quad (\text{Equação 39})$$

P_i = Valor estimado

O_i = Valor observado

O = Média dos valores observados

Para completar a análise estatística foi utilizado o índice de confiança ou desempenho (c) proposto por (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Esse coeficiente considera o índice de precisão expresso pelo coeficiente de correlação (R) e o de exatidão (d). O critério de interpretação qualitativa do índice de confiança é apresentado na

Tabela 4-5. O índice de confiança é colocado da seguinte forma (Equação 40).

$$c = R d \quad (\text{Equação 40})$$

Tabela 4-5 Faixa de valores do índice de desempenho (c) e as classificações qualitativas

Valor de c	Desempenho
$>0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados lisimétricos foram coletados durante o período de 56 meses (início em 11/2010 e término em 06/2015). O nível de água nos reservatórios abastecedores foi medido manualmente por observador diário desde 11/2010 até 12/2012. Após esse período foram utilizados dois transdutores de pressão acoplado com *dataloggers* e um sensor de ultrassom conectado a um microcomputador. A drenagem dos lisímetros foi medida por um observador aproximadamente duas vezes por semana. Em novembro de 2014 foram colocados dois pluviômetros de báscula.

A temperatura do bulbo seco e úmido em dois níveis, o fluxo de calor no solo, saldo de radiação, dados necessários para o método da Razão de Bowen, foram obtidos durante 8 meses (20/12/2014 a 31/08/2015). Já a evaporação do atmômetro *ETgage* foi coletada no período de 02/03/2014 a 31/08/2015 (6 meses). A umidade do solo nos lisímetros foi medida entre partir de 05/2014 estendendo-se até 07/2015.

5.1 Precipitação e temperatura

O período com a maior incidência pluviométrica na região abrange os meses de outubro até março. Junho possui a menor precipitação média mensal com 28 mm. Janeiro é o mês mais chuvoso com 286 mm, como pode ser visto na Figura 5-1.

Figura 5-1 Chuva média mensal medida entre 1979 e 2014, na Estação Climatológica do CRHEA. Em azul, os meses mais chuvosos; em amarelo e vermelho os mais secos.

O acumulado anual de chuva, no período de 1979 até 2014, pode ser visualizado na Figura 5-2.

Figura 5-2 Chuva anual acumulada medida entre 1979 e 2014, na Estação Climatológica do CRHEA. Os anos sinalizados em amarelo correspondem aqueles com dados dos lisímetros. A linha vermelha indica a média anual.

Na Figura 5-2 observa-se que o maior valor de precipitação ocorreu no ano de 1983 com um total de 2456 mm. No período compreendido pelo funcionamento do experimento observaram-se dois anos extremos, sendo o segundo maior acumulado anual da série de 35 anos que ocorreu em 2011 com 1924 mm e o ano mais seco em 2014 com apenas 1112 mm. Já os anos de 2012 e 2013 apresentaram um valor próximo à média de 1486 mm.

A chuva e a temperatura são as variáveis meteorológicas mais facilmente medidas em estações climatológicas. Na área de estudo, a variação mensal da temperatura média, máxima e mínima durante o período de estudo pode ser visualizada na Figura 5-3.

Figura 5-3 Variação mensal da temperatura média estimada com as observações das 9,15 e 21 horas acrescida das temperaturas máxima e mínima. As temperaturas absolutas extremas, entre novembro/2010 e agosto/2015 também são mostradas.

Na Figura 5-3, observa-se que a maior temperatura ocorreu no mês de outubro/2014; 39,1°C. Junho/2011 teve a menor temperatura extrema 0,6°C e a mais baixa temperatura média 16,7°C. Os meses que tiveram a maior temperatura média (27,0°C) foram fevereiro/2014 e janeiro/2015.

5.2 Consumo de água (irrigação) e umidade nos lisímetros

A irrigação necessária para manter o nível de água constante (1,0 m abaixo da superfície) nos lisímetros variou conforme os meses do ano, as precipitações, e o tamanho da cobertura vegetal (grama). Este comportamento pode ser observado na Figura 5-3 que apresenta a irrigação subsuperficial acumulada nos lisímetros e a chuva diária.

Figura 5-4 Total mensal de precipitação no formato de barras invertidas e curvas de irrigação acumulada no *lis-arg* (vermelho) e *lis-aren* (preto) durante período de 11/2010 a 06/2015.

A chuva é o aspecto fundamental na irrigação subsuperficial dos lisímetros; meses com maiores acumulados pluviométricos apresentam menores irrigações, justamente devido ao suprimento hídrico fornecido pelas chuvas e à ausência de longos períodos (maiores que uma semana) sem chuvas. Este efeito pode ser observado na Figura 5-4, nos períodos de baixa precipitação, as curvas de irrigação apresentam maiores inclinações. Quando há maiores acumulados de chuva, as curvas se tornam retas horizontais.

Uma forma simples de caracterizar os períodos secos e úmidos é o balanço hídrico climatológico, como pode ser observado na Figura 5-5 (THORNTHWAITE; MATHER, 1955).

Figura 5-5 Balanço hídrico climatológico indicando os meses com deficiência hídrica no solo e aqueles que apresentam um excesso. Os dados foram obtidos da estação climatológica do CRHEA situada em Itirapina-SP. A evapotranspiração foi estimada com o método de Thornthwaite e a temperatura média do ar.

Verifica-se na Figura 5-5 que os meses de julho e agosto apresentam uma pequena falta de água. O mês de agosto apresenta um déficit de apenas 5 mm. Para analisar de forma mais detalhada quais meses necessitam de irrigação, faz-se o balanço hídrico climatológico sequencial.

Figura 5-6 Balanço hídrico climatológico sequencial mensal entre 2010 e 2015. A evapotranspiração foi estimada com o método de *Penman-Monteith* FAO 56

No geral, entre 2010 e 2015 os meses de julho a setembro apresentam déficit hídrico (Figura 5-6). Nesses meses, as curvas acumuladas de irrigação nos lisímetros apresentam as maiores taxas de crescimento. Na Figura 5-4 observa-se que o período com a maior ascensão das curvas acumuladas de irrigação foi entre 22 de junho a 19 de setembro de 2012. Durante

esse período, houve apenas duas chuvas diárias cujos valores não passaram de 13 mm, o que gerou uma demanda de 124 mm e 80 mm de irrigação acumulada para o *lis-aren* e *lis-arg*, respectivamente.

Assim, nesse intervalo de 90 dias sem precipitação foi atingido um pico de irrigação de 3,2 mm/dia em 18/09/2012 para o *lis-aren* e 1,7 mm/dia para o *lis-arg* em 16/09/2012, datas próximas ao equinócio de primavera. Nesses 90 dias, a irradiância solar global média foi de $18 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, um valor elevado que representa 81% do valor teórico máximo ($22 \text{ MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). A baixa nebulosidade aliada com uma umidade relativa média de 66% contribuiu para uma diferença de 238 mm entre a evapotranspiração de referência e a chuva no período.

Entre os meses de dezembro/2013 e janeiro/2014 ocorreu um veranico, que diminuiu muito as chuvas na região e iniciou a crise hídrica no Sudeste (PORTO et al., 2014). O ano de 2014 apresentou déficit hídrico em quase todos os meses, somente novembro e dezembro apresentaram excesso hídrico (Figura 5-6). Apesar dessa diminuição no total acumulado mensal, não houve períodos maiores que uma semana sem chuvas, fazendo com que grandes irrigações seguidas como aquela observada em jul/ago/set de 2012 não se repetissem.

O estado de crescimento e desenvolvimento da grama na superfície evaporante dos lisímetros influi na evapotranspiração e, conseqüentemente, na intensidade da irrigação necessária para manter o nível de água dentro dos lisímetros. A adaptabilidade da gramínea às condições do solo reflete diretamente na formação da biomassa e na obtenção de água dos poros do solo através das raízes. Este é o motivo pelo qual as duas curvas de irrigação acumulada não coincidem, tendo a grama batatais do *lis-aren* exigido uma maior reposição hídrica em relação à do *lis-arg*. O *lis-aren* apresentou em alguns períodos uma superfície evaporante mais coberta e uniforme quando comparado ao *lis-arg*. Assim, foi necessária a reconstrução do horizonte superficial do *lis-arg* com terra vegetal e areia para melhorar as condições de desenvolvimento da planta. Foram feitos dois replantios de grama e adubações no *lis-arg* e um no *lis-aren*, na tentativa de uniformizar a cobertura dos dois lisímetros. Um replantio foi feito em novembro/2011 e dois em novembro/2014 (Figura 5-7).

Figura 5-7 Replântio e adubação da grama batatais com reconstrução da camada inicial de solo *no lis-aren* e *lis-arg*, com o objetivo de igualar a condição da superfície evaporante. Procedimento efetuado em 04/11/2014.

A variação da fisionomia do gramado na superfície dos lisímetros ao longo dos 56 meses de estudo pode ser visualizada nas Figuras 5-8 a 5-11.

Figura 5-8 Superfície evaporante dos lisímetros coberta com grama batatais nos anos de 2010 e 2011. Observa-se a maior quantidade de áreas sem recobrimento com grama no *lis-arg*. Para ambos os lisímetros, o menor desenvolvimento foliar é registrado no final do inverno e início da primavera/2011.

Figura 5-9 Cobertura vegetal dos lisímetros em 2012 e 2013. O replantio da grama na superfície do *lis-arg*, realizado em novembro/2011, proporcionou um melhor desenvolvimento no verão de 2011/2012. Ao centro, imagens da grama batatais no inverno/2012.

Figura 5-10 Superfície evaporante dos lisímetros no inverno/2013 e primavera/2014. Ao centro, imagens da grama batatais no verão 2013/2014.

Figura 5-11 Cobertura vegetal dos lisímetros no verão de 2014/2015 e 2012/2013. Ao centro, imagens da grama batatais no inverno/2015.

A grama batatais não apresentou uma boa adaptação ao solo argiloso, sendo observada a existência de áreas descobertas de vegetação na superfície do lisímetro e um desenvolvimento foliar não satisfatório, resultando em uma grama rala e, às vezes, sem a necessidade de corte periódico, mesmo com irrigação subsuperficial e aquela devida às chuvas. As raízes da grama batatais apresentaram dificuldade de penetração no solo argiloso, devido à elevada agregação das partículas de argila.

O solo do *lis-arg* tem mais de 85% de argila e silte em sua composição, fazendo com que sua aplicação na agricultura seja dificultada. O solo provém de uma cava de exploração de argila para fabricação de tijolos refratários.

O fraco desenvolvimento da vegetação na superfície do *lis-arg*, resultou em baixas taxas de evapotranspiração quando comparado ao *lis-aren*. Essas baixas taxas, aliadas às características físicas do solo e ao fornecimento de água através das precipitações frequentes, regulam o estoque de água no solo. Por isso, essa demanda por água no *lis-arg* foi menor do que para o *lis-aren*, fazendo com que o total acumulado de irrigação no *lis-arg*, após os 56 meses de estudo, fosse 432 mm e do *lis-aren* 917 mm, quase 500 mm a mais.

Utilizando imagens da área superficial dos lisímetros e o *software CobCal* versão 2.1, foi identificado o percentual da superfície evaporante que estava coberto com vegetação (grama) em relação à área total de cada lisímetro que é de 2,78 m² (Figura 5-12). Gráficos de

dispersão, com a variação da evapotranspiração e a porcentagem da área coberta com grama, são mostrados na Figura 5-13.

Figura 5-12 Variação da cobertura de grama batatais na superfície dos lisímetros, valor expresso em porcentagem relativa à área evaporante que é de 2,78 m². A linha vermelha com marcadores circulares representa o *lis-arg*, a linha preta com marcadores triangulares simboliza o *lis-aren* (Dados no apêndice).

Figura 5-13 Gráfico de dispersão entre a evapotranspiração medida nos lisímetros e a porcentagem da superfície evaporante coberta com grama. O gráfico da esquerda refere-se ao *lis-arg* e o da direita ao *lis-aren*.

Os gráficos da Figura 5-13 indicam que as maiores taxas de evapotranspiração nos lisímetros são observadas com elevados valores de cobertura vegetal. A grama no *lis-aren* na maior parte do período apresentou maiores taxas de cobertura quando comparada à grama do *lis-arg*. Observando a Figura 5-12, verifica-se que os maiores valores de cobertura vegetal ocorrem no verão e os menores no final do inverno próximo ao equinócio de primavera. Durante o inverno e início da primavera, os lisímetros ficavam mais suscetíveis ao ataque de plantas invasoras e formigueiros.

O desenvolvimento do vegetal está diretamente relacionado à duração do brilho solar (insolação). Durante o verão, percebe-se a maior formação de biomassa e folhas, resultando em um recobrimento maior da superfície do lisímetro. No auge desse período, os meses de dezembro e janeiro, a duração teórica máxima do brilho solar é de aproximadamente 13 horas/dia. Nos meses de junho e julho, esse valor diminui para 11 horas/dia. Assim, o maior tempo de exposição da grama às maiores taxas de irradiância solar global, aumenta a produção do vegetal e o número de folhas e estômatos, desde que não haja deficiência hídrica, nutricional e a planta tenha um bom estado fitossanitário. Dessa maneira, as taxas de transpiração pela grama são incrementadas nesse período devido ao ganho de biomassa.

Paciullo et al. (2008) analisando o desenvolvimento da braquiária concluíram que no inverno houve uma redução das variáveis morfogenéticas e estruturais do dossel e consequentemente diminuição nas taxas de produção de forragem. O desenvolvimento vegetativo e o florescimento de espécies forrageiras são afetados pelos principais fatores climáticos: a luz (irradiância), a temperatura e a disponibilidade hídrica e somam-se a estes os fatores edáficos (MONTEIRO, 2009). Esses efeitos aplicados a gramíneas tropicais também foram descritos nos trabalhos de Cooper (1970); Cooper e Tainton, (1968).

Em 2014, foram instalados sensores de umidade no solo para analisar a quantidade de água armazenada nos lisímetros e a sua resposta no desenvolvimento da grama e, consequentemente, nas taxas de evapotranspiração, como mostra a Figura 5-14.

Figura 5-14 Umidade do solo argiloso e arenoso, expressa em base volumétrica (%), às profundidades de 10, 40 e 80 cm. As linhas pretas representam a variação do conteúdo de água no solo do *lis-aren*. Já essa variável para o *lis-arg* é mostrada na cor vermelha. As chuvas diárias que alteram a umidade no solo também são simbolizadas com as barras invertidas.

A porcentagem de umidade do solo no período de 13/05/2014 à 31/07/2015 é apresentada na Figura 5-14. O monitoramento foi realizado a 10, 40 e 80 cm de profundidade. A umidade dos solos à 10 e 40 cm é influenciada pelas chuvas. Pode-se observar que a umidade nos dois lisímetros a 10 cm tem maior sensibilidade aos eventos de precipitação, com a maior quantidade de picos. Este fato não ocorreu a 80 cm, devido a ação do nível constante de água nos lisímetros, que fica à 1,0 m abaixo da superfície. Os poros do solo em ambos os lisímetros estavam completamente saturados na profundidade de 80 cm. Sendo que nessa profundidade o solo argiloso apresentou 31% de conteúdo de água, e o solo arenoso 24%. Com essa medição de umidade verifica-se que a zona saturada avança 20 cm acima do nível de água estabelecido.

Ao comparar os lisímetros em todas as três profundidades notou-se que o solo argiloso apresentou maiores conteúdos de água. A diferença média foi de 7% nas profundidades de 10 e 80 cm. Para a profundidade de 40 cm a diferença entre os lisímetros foi menor, apenas 3%.

No gráfico da Figura 5-14, a partir de novembro, observa-se um padrão de mudança nas medições a 10 cm. Esse padrão deve-se a reconstrução do horizonte superficial de ambos os lisímetros, que aumentou a porosidade, e, portanto, a capacidade de infiltrar, conter e reter

uma lâmina maior de água no perfil. Para o *lis-arg*, antes da reconstrução, esse valor de 31% de umidade no solo argiloso na profundidade de 80 cm, era o máximo valor observado. Após, esse valor foi superado ou igualado em 5 eventos chuvosos, também por valores nessa profundidade de 10 cm. Esse horizonte de solo já havia sido reconstruído em 2011 no *lis-arg*, portanto, as medidas de umidade do solo a 10 cm no *lis-arg* não refletem uma textura com predominância argilosa.

Para o solo arenoso (medições 10, 40 e 80 cm) o mínimo foi de 6% na profundidade de 40 cm, em 22/10/2014; as causas desse mínimo valor em outubro serão discutidas mais adiante. O máximo valor obtido foi 25%, valor praticamente constante a 80 cm. Considerando a textura argilosa (medições entre 40 e 80 cm) o menor valor de umidade foi de 12% (22/01/2015) e o maior 31% a 80 cm de profundidade.

Somente entre os dias de 16 a 22 de janeiro/2015 a umidade medida no *lis-arg* à 10 cm foi menor que à 40 cm, em média 1%. Nesse lisímetro, nos demais dias do período a umidade à 10 cm foi sempre 8% maior ou igual à 40 cm.

Ao comparar as medições realizadas a 40 cm, observa-se que depois de uma chuva a curva de decaimento da quantidade de água na argila é uma reta descendente. Para o solo arenoso essa curva se aproxima a uma exponencial. Esses efeitos concordam com aqueles verificados no trabalho de Hillel (1998) e são melhores observados após 13/04/2015 devido à diminuição da frequência dos eventos chuvosos.

Ainda nas medições realizadas a 40 cm, o solo arenoso apresentou 10% como variação máxima de umidade. O solo argiloso teve uma variação de 4%. Essa pequena variação de umidade no *lis-arg* pode indicar nas proximidades dessa profundidade capilaridade ou a compactação do solo argiloso. Este fato pode ser comprovado com a queda abrupta da umidade da argila a 40 cm nos dias 10/10/2014, 20/11/2014, 08/12/2014 e 13/01/2014. Anteriormente à instalação dos sensores de umidade no solo, ao final do período seco, em agosto, tentou-se cravar uma lâmina de aço para verificar se o solo estava úmido, porém no *lis-arg* essa tarefa foi dificultada pela compactação do solo.

Com as porcentagens de umidade de solo a diferentes profundidades e por lisímetro, foi estimada a lâmina de água presente no perfil até 80 cm de profundidade, utilizando a equação 38. Os resultados são mostrados na Figura 5-15, e como já foi discutido com os valores a diferentes profundidades, o solo dos *lis-arg* tem uma maior umidade em comparação com o *lis-aren*.

Figura 5-15 Lâmina de água armazenada até 80 cm de profundidade para a argila e areia. A diferença entre o armazenamento do *lis-arg* e *lis-aren* é apresentada pela linha cinza.

Observa-se com gráfico da Figura 5-15 que o aporte de água proveniente das precipitações aumenta o armazenamento de água nos lisímetros. O *lis-arg*, em todo período, apresentou maior lâmina de água armazenada, pois a textura do solo argiloso possui maior quantidade de microporos. Após novembro, há um deslocamento das curvas de armazenamento provocado pela maior entrada de água, devido ao período chuvoso e à reestruturação da camada superficial aplicada aos solos. Essa modificação também diminui a diferença de armazenamento. Anteriormente ao replantio da grama, as diferenças atingiam picos de 60 mm, e após atingiu um pico máximo de 45 mm.

O *lis-arg* apresentou mínimo de 149 mm de água armazenada em 22/10/2014. Com o replantio da grama e o incremento nas taxas de evapotranspiração, esse valor mínimo foi diminuído para 133 mm em 21/01/2015. O valor máximo foi 201 mm no início de junho/2015. O *lis-aren* antes do replantio da grama teve um mínimo de 90 mm, considerando a mesma data do *lis-arg*. Após o plantio, o *lis-aren* apresentou um mínimo de 98 mm em 21/01/2015. O valor máximo foi 164 mm em fevereiro/2015 e também em maio/2015.

A existência da camada compactada no interior do *lis-arg* impede a exploração profunda pelas raízes da grama e o seu desenvolvimento. Com os macroporos espremidos

pela compactação, o fluxo de água é dificultado, diminuindo a frequência de irrigação no *lis-arg* e, conseqüentemente, a evapotranspiração. A diferença de armazenamento entre os lisímetros é ocasionada pela maior quantidade de microporos do solo argiloso, porém a água retida nesses poros fica absorvida fortemente, não participando ativamente dos fluxos de água e do balanço hídrico. Junto com a umidade do solo foram medidas as drenagens nos lisímetros, o que será discutido no próximo tópico.

5.3 Drenagem nos lisímetros

O sistema de drenagem na forma de “espinha de peixe” foi montado no fundo da caixa do *lis-arg* e *lis-aren* para proporcionar rapidez na drenagem da água. O sistema foi elaborado e construído conforme proposto por Machado e Mattos (2001).

Os volumes coletados nas caixas de drenagem foram divididos pela superfície evaporante dos lisímetros (2,78 m²) obtendo-se a lâmina drenada em milímetros. Esses valores, juntamente com a chuva medida no pluviômetro *Ville de Paris*, foram agrupados em períodos de quatro meses consecutivos, com início em novembro de 2010 e término em junho de 2015. Os dados de drenagem e chuvas acumuladas são apresentados no gráfico da Figura 5-16.

Figura 5-16 Chuva e drenagem dos lisímetros. No período 12 não houve drenagem no *lis-aren*. Cada período corresponde a 4 meses. A razão entre as drenagens dos lisímetros também é mostrada no gráfico através da linha com marcadores circulares.

Após o encerramento de um evento chuvoso, que foi capaz de gerar escoamento vertical, verificou-se que a percolação no solo e o fluxo de água pelo sistema de drenagem continuaram ocorrendo por algum tempo, variando em função do volume precipitado e da umidade do solo anterior à chuva.

Na Figura 5-16, a relação média entre as drenagens foi de 1,1 significando que o valor drenado pelo *lis-arg* foi em média 10% maior. Porém, no período 3, final do inverno e início da primavera de 2011, essa relação foi de 1,4. Após 82 dias sem chuvas maiores que 5,0 mm.dia⁻¹ algumas fissuras e rachaduras se formaram no solo, ficando livremente expostas, pois a cobertura de grama do *lis arg* estava rala, inferior a 25% da superfície, enquanto que o *lis-aren* apresentava 50%. Esse fato aliado com uma chuva de elevada intensidade (30 mm em 90 min) no início do dia 31/08/2011, após 82 dias sem chuvas, facilitou o acesso da água ao sistema de drenagem.

No ano seguinte 2012, período 6, mesmo com um intervalo maior sem chuvas (90 dias) e no final deste em 22/09/2012 com uma chuva mais intensa (60 mm em 90 min) não foi observada a elevada razão de drenagem (1,4). Pois em 11/2011 foi feito um replantio da grama e uma reconstrução do horizonte superficial no *lis-arg*, aumentando a cobertura de grama.

Durante os períodos 01 e 07 houve um transbordamento das caixas coletoras de drenagem (Figura 5-17).

Figura 5-17 Drenagem acumulada no tanque coletor graduado do *lis-arg* (esquerda) e *lis-aren* (direita) após as sucessivas chuvas de janeiro de 2011.

O mês de janeiro de 2011 foi o mais chuvoso desde 1974, com um acumulado mensal de 574 mm, sendo que 503 mm caíram em 17 dias e 160 mm somente em um dia (03/01/2011). O erro causado devido ao valor subestimado de drenagem nesse período 1 não influenciará na compreensão final dos resultados, pois as curvas acumuladas dos balanços hídricos serão compostas por 56 meses. Na Figura 5-18 têm-se as drenagens e a chuva expressas em valores acumulados.

Figura 5-18 Drenagem dos lisímetros e a chuva em curvas acumuladas durante o período de 30/10/2010 a 07/07/2015. Os lisímetros apresentaram valores semelhantes para a drenagem.

Na Figura 5-18 observa-se que no início do gráfico a diferença entre as curvas de precipitação e drenagem foi pequena. Isto ocorre devido ao grande aporte de água que foi de 1677 mm de chuva nos 8 primeiros meses de funcionamento dos lisímetros (nov/2010 a jun/2011). Esse valor é quase 200 mm a mais do que a precipitação anual da região (1486 mm). As curvas acumuladas de drenagem em ambos os lisímetros apresentaram o mesmo comportamento. No final dos 56 meses o *lis-arg* drenou 52% da precipitação acumulada e o *lis-aren* 50%.

A drenagem ocorrida nos lisímetros durante nov/2010 a set/2011 foi comparada com a recarga subterrânea estimada pelo método *Water Table Fluctuation* em 4 poços de monitoramento com o mesmo solo, vegetação e clima do *lis-aren*. A recarga média estimada destes poços foi de 623 mm. A drenagem para o mesmo período no *lis-aren* foi de 1146 mm. Verifica-se uma diferença de 523 mm entre os valores, próxima a metade do valor da drenagem medida nos lisímetros. A recarga se acentua em lisímetros pouco profundos por não considerarem os efeitos de retardo durante a percolação da água através da zona não saturada do solo (CABRERA et al., 2014).

Nessa condição estudada o solo argiloso em comparação com o solo arenoso favorece a recarga do aquífero. A existência da camada compactada no meio do *lis-arg*, seu reflexo nas taxas de evapotranspiração e as fraturas na argila permitiram esse fato.

5.4 Saldo de radiação e insolação

A radiação solar influencia o crescimento e desenvolvimento da grama, por ser principal componente na evaporação de água na superfície terrestre. A interação da radiação com a superfície terrestre (grama ou espelho d'água) sofre processos de atenuação (absorção,

difusão e reflexão), sendo que apenas um percentual do valor teórico estimado no limite externo da atmosfera (irradiância solar extraterrestre R_a) chega à superfície (PEREIRA et al., 2013). Esse percentual da irradiância solar extraterrestre que atinge a superfície pode ser facilmente estimado utilizando dados de insolação em uma equação linear simples, como a de *Angstrom-Prescott* [$R_s = a_s + b_s(n/N) R_a$]. Uma das desvantagens dessa equação é que não detecta variação em dias de insolação nula e também, os coeficientes de transmutância atmosférica (a_s e b_s) da equação apresentam estacionalidade.

Na estação climatológica do CRHEA, no início das medições experimentais, havia apenas dados de irradiância solar global medido com actinógrafo de *Robitzsch* e dados de insolação medidos com heliógrafo *Campbell-Stokes*. Dados de irradiância solar global, medidos com piranômetro de fotodiodo de silício, só estiveram disponíveis a partir de dezembro/2013.

O actinógrafo é um instrumento de terceira classe na classificação de sensores de irradiância e fornece valores com elevados erros (15 a 20%) (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995). Linacre (1992) recomenda que, na ausência de dados de irradiância solar global medido com piranômetro de termopilha ou fotodiodo, sejam utilizados dados de insolação e, só como última opção, deve-se utilizar dados fornecidos pelo actinógrafo. Assim, nesta pesquisa, utilizou dados de insolação para estimar os valores de irradiância solar global.

Para verificar a qualidade das medições, a insolação foi medida utilizando dois instrumentos. O *Blake Larsen sun recorder* é aparelho eletrônico, ligado ao computador com funcionamento automático. O heliógrafo *Campbell-Stokes* é constituído de uma esfera de cristal ajustada sobre um suporte no qual uma tira de papelão é fixada diariamente por um observador. Os dados gerados pelo heliograma (tira de papelão) devem ser interpretados por um observador e digitalizados. A Figura 5-19 mostra a correlação e dispersão dos pares de valores de irradiância, medida com piranômetro e estimada usando a equação de *Angstrom-Prescott* com insolação medida pelos diferentes instrumentos.

Figura 5-19 Gráfico de dispersão entres medidas de irradiância solar global e estimativas com dados de insolação. Diferentes instrumentos de registro da insolação são utilizados, *Blake Larsen sun recorder* e o heliógrafo *Campbell-Stokes*.

Na Figura 5-19 foram utilizados 377 pares de dados diários referente ao período de março/2014 a julho/2015. As estimativas de irradiância solar global com dados do heliógrafo e do *Blake Larsen sun recorder* apresentaram boa concordância com os valores medidos, sendo que em ambos os casos se obteve um coeficiente de confiança ou desempenho (c) superior a 0,80, sendo classificado como muito bom. O *Blake Larsen sun recorder* apresentou 0,85 e o heliógrafo 0,83 para esse índice de confiança. Porém o heliógrafo teve um melhor coeficiente de exatidão (d) com 0,93 (0,91 *Blake Larsen sun recorder*). Os valores de irradiância estimados com o *Blake Larsen sun recorder* tiveram uma leve melhora na estimativa da irradiância solar global quando comparado com o heliógrafo. Burt (2012) utilizando este mesmo tipo de instrumento também comprovou a qualidade dos dados de insolação.

No local de estudo, pode-se utilizar uma forma simples para estimar a irradiância solar global quando não há dados de insolação. Esta compreende a utilização da equação linear descrita na Figura 5-20, a qual possui um R^2 igual a 0,65.

Figura 5-20 Correlação linear entre a temperatura média mensal do ar e a irradiância solar global na estação climatológica do CRHEA, período novembro/2010 a agosto/2015 (Dados no apêndice).

Dados de insolação medida com o *Blake Larsen sun recorder* só estiveram disponíveis em 2013 e com a comprovação da consistência dos dados de insolação do heliógrafo, esses dados do heliógrafo foram utilizados na estimativa de evapotranspiração pois abrangeram toda a série.

Um segundo passo foi verificar a qualidade das estimativas de saldo de radiação sobre o gramado. O balanço de ondas longas e curtas sobre uma vegetação (saldo de radiação) pode ser medido ou estimado. A medição do saldo de radiação sobre superfície (saldo radiômetro) exige um instrumento de alto custo. Portanto, não é uma medição rotineira em estações meteorológicas.

Quando não há disponibilidade de dados de saldo de radiação, como nos três anos iniciais de monitoramento do lisímetro, pode-se estima-lo utilizando equações sugeridas pela metodologia da *FAO 56*. Outras equações de estimativa do saldo de radiação podem ser consultadas no trabalho de Linacre (1992).

Com o início das medições de saldo de radiação sobre a grama batatais da estação climatológica, em dezembro de 2013, foi possível testar a metodologia adotada pela *FAO 56* como padrão de estimativa do saldo de radiação (Figura 5-21).

Figura 5-21 Gráfico de dispersão entre o saldo de radiação medido sobre a grama batatais e o valor estimado com a metodologia da *FAO 56*. No gráfico A foram utilizados dados de irradiância solar global estimados com a equação de *Angstrom Prescott*. No gráfico B, esta variável foi medida com piranômetro de fotodiodo de silício. A reta 1:1 também é mostrada em ambos os gráficos.

Na elaboração dos gráficos que compõe a Figura 5-21 foram utilizados 486 pares de dados, envolvendo, ao menos, uma estação seca e uma chuvosa, referente ao período de março/2014 a julho/2015. O gráfico A representa a estimativa do saldo de radiação utilizando dados de irradiância solar global estimada com a equação de *Angstrom-Prescott* e valores de insolação (heliógrafo). O gráfico B representa a estimativa do saldo de radiação utilizando dados medidos de irradiância solar global com piranômetro de fotodiodo de silício.

A estimativa do saldo de radiação com a metodologia da *FAO 56* apresentou bons resultados quando comparada ao valor observado utilizando um saldo radiômetro (*NR Lite*) sobre a grama batatais da estação climatológica. Nos dois casos, o valor do R^2 foi superior a 0,80 comprovando a eficiência. Na Figura 5-21 (B), observa-se que a utilização das medidas diretas de irradiância solar global aumentou o R^2 (0,88) frente ao gráfico da Figura 5.22 (A), que obteve um R^2 igual a 0,84. Porém, em ambas as situações (A e B) o coeficiente de desempenho (c) foi igual a 0,83 sendo classificadas como muito bom.

O afastamento dos pontos para a direita da reta 1:1 em ambos os gráficos da Figura 5-21 indica a superestimação dos valores de saldo de radiação, calculados com a metodologia padronizada pela *FAO 56*, em relação aos observados sobre gramado.

Visando encontrar outra equação mais simples do que aquela adotada pela *FAO 56*, o saldo de radiação medido sobre a grama foi relacionado em um gráfico de dispersão com a irradiância solar global. A estimativa da irradiância solar global foi feita com equação a *Angstrom-Prescott* e dados de insolação medidos no heliógrafo (Figura 5-22).

Figura 5-22 Correlação diária entre a irradiância solar global e o saldo de radiação medido sobre a grama batatais. Com a equação de *Angstrom Prescott* estimou-se os valores de irradiância solar global.

Foram utilizados 610 pares de dados referentes ao período de dezembro/2013 a agosto/2015 na composição do gráfico da Figura 5-22. A relação obtida indica que o saldo de radiação sobre o gramado é de aproximadamente 50% da irradiância solar global. A razão $(R_n/R_s) = 0,48$ apresentou um R^2 igual a 0,78, valor próximo ao 0,84 utilizando a metodologia da *FAO 56*. Porém o valor do coeficiente de exatidão (d) foi de 0,43 e o coeficiente de confiança (c) encontrado foi de 0,38 sendo considerado péssimo. Essa nova equação apresenta a vantagem de utilizar apenas dados de irradiância solar global. Outra vantagem sobre a

equação da *FAO 56* é a de não usar dados de umidade relativa do ar, pois essa medida é problemática em estações (PEREIRA et al., 2013).

A razão $(R_n/R_s) = 0,48$ concorda com a relação descrita na literatura que foi obtida em Piracicaba por Sentelhas e Nascimento (2003). Essa relação será utilizada para avaliar a perda de água do gramado. As estimativas da irradiância solar global com dados de insolação medida, tanto com heliógrafo ou com *Blake Larsen sun recorder*, se mostraram consistentes para serem utilizadas na metodologia da *FAO 56* e para fornecer valores de saldo de radiação sobre a superfície.

5.5 Evapotranspiração

Através da equação do balanço hídrico foi determinado a evapotranspiração nos lisímetros e comparada com a aquela estimada e parametrizada segundo a metodologia da *FAO 56* (ALLEN et al., 1998). Devido à inexistência de dados diários de drenagem e medidas de umidade no solo durante o intervalo de novembro de 2011 até abril de 2014, a variação de armazenamento de água no solo foi considerada nula durante cada período composto por quatro meses.

A nulidade da variação do armazenamento de água no solo pode ser justificada através da baixa deficiência hídrica da região que proporciona pequenos intervalos sem chuvas, em geral menor que 120 dias (o maior intervalo sem chuvas superiores a 20 mm foi de 90 dias). Esse procedimento facilitou a comparação entre os períodos com a uniformização da duração e permitiu aplicar a equação do balanço quando não há informações sobre a lamina de água armazenada no lisímetro.

As taxas de evapotranspiração durante 14 períodos, com duração de 4 meses totalizando 56 meses de estudo são mostradas na Figura 5-23 e na Tabela 5-1.

Figura 5-23 Variação das taxas de evapotranspiração nos lisímetros em 14 períodos. As barras verticais são as variações da evapotranspiração nos lisímetros e também aquelas estimadas com metodologia da FAO 56. A relação adimensionalizada entre a evapotranspiração dos lisímetros é mostrada com valores nos marcadores. Cada período corresponde a quatro meses consecutivos, iniciado em nov./2010 e com término em jun./2015, totalizando 56 meses. A evapotranspiração dos lisímetros nos períodos 1 e 7 está superestimada.

Tabela 5-1 Evapotranspiração, chuva e área da superfície evaporante dos lisímetros cobertos com grama

	Período	Chuva	Evapotranspiração (mm)				Área com Grama (%)	
			FAO 56	FAO 56 Rn=0,48Rs	Lis-arg	Lis-aren	Lis-arg	Lis-aren
nov/2010 a fev/2011	1*	1178	523	392	375	425	55	77
mar/2011 a jun/2011	2	499	319	276	122	178	42	76
jul/2011 a out/2011	3	207	417	365	168	240	23	50
nov/2011 a fev/2012	4	934	553	421	383	429	70	81
mar/2012 a jun/2012	5	462	351	294	284	262	96	95
jul/2012 a out/2012	6	247	446	394	258	322	59	71
nov/2012 a fev/2013	7*	822	534	412	477	531	86	89
mar/2013 a jun/2013	8	457	325	281	219	228	65	69
jul/2013 a out/2013	9	253	405	370	163	203	44	49
nov/2013 a fev/2014	10	601	569	453	403	446	73	77
mar/2014 a jun/2014	11	268	361	320	137	165	50	70
jul/2014 a out/2014	12	154	440	408	170	246	35	49
nov/2014 a fev/2015	13	793	535	418	340	424	83	78
mar/2015 a jun/2015	14	379	341	293	265	310	87	92

*Transbordamento da caixa de drenagem

As maiores taxas de evapotranspiração ocorreram sempre nos meses de novembro a fevereiro, final da primavera e início do verão. A máxima evapotranspiração nos lisímetros ocorreu no período 7 (primavera/2012 e verão/2013) com 531 e 477 mm para o *lis-aren* e *lis-arg*, respectivamente. Porém houve um transbordamento nas caixas de drenagem nesse período 7, pois entre os dias 12 e 13 de janeiro de 2013 choveu 270 mm em 19 horas, indicando que a evapotranspiração está superestimada. Neste período a ET_o *FAO 56* foi de 534 mm. A relação entre a ET_o *FAO 56* e a ET *lis-aren* é unitária para o período 7, devido a superestimativa da ET dos lisímetros, como pode ser visto na Tabela 5-2. A ET dos lisímetros foi superior a evaporação do tanque de 20 m² (408 mm). Nessa pesquisa a ET_o *FAO 56* com o saldo de radiação modificado foi de 412 mm, valor próximo ao tanque de 20 m².

No período 1 e 7 houve um transbordamento devido ao excesso de chuvas, conforme descrito da seção de drenagem, resultando em uma superestimativa da ET dos lisímetros.

O saldo de radiação com a metodologia da *FAO 56* produz elevadas estimativas de ET_o . Esta superestimativa da ET_o *FAO 56* pode ser verificada no período 1. Nesse período, houve o transbordamento do tanque coletor de drenagem descrito anteriormente e, geração de um valor elevado de ET nos lisímetros. Ainda assim, o valor observado no *lis-aren* não foi igual ou superior a ET_o *FAO 56*.

Todas as menores taxas de ET_o *FAO 56* ocorreram nos meses de março a junho. Os valores de ET nos lisímetros não obtiveram esse padrão definido. Apenas os mínimos extremos foram observados nesses meses e, ainda, em anos diferentes; para o *lis-arg* ocorreu no período 2 com 122 mm e, para o *lis-aren* foi no período 11 com 165 mm.

Os menores valores de ET_o para a metodologia da *FAO 56* e para o *lis-arg* ocorreram no período 2. Enquanto que a ET_o *FAO 56* foi de 319 mm, no *lis-arg* foi de apenas 122 mm. Para o *lis-aren*, o menor valor ocorreu no período 11, pois a área coberta pela grama era menor 70%, enquanto no período 2 era um pouco maior com 76%. Além disso, no período 11 o gramado do *lis-aren* não estava com uma boa condição fitossanitária. Diferente do período 2 quando o gramado havia sido plantado há quatro meses, no início do experimento. O veranico ocorrido no verão 2013/2014 pode ter contribuído para esta condição. Ainda assim, o valor de ET medida no *lis-aren* no período 11 foi maior do que os 137 mm observados no *lis-arg*.

Tabela 5-2 Relação de evapotranspiração estimada (ET_o) e observada nos lisímetros. Os coeficientes utilizando a ET_o FAO 56 com R_n igual à $0,48R_s$ também é mostrada.

Período		Evapotranspiração			
		<i>Lis-arg</i> /FAO 56	<i>Lis-aren</i> /FAO 56	<i>Lis-arg</i> /FAO 56 $R_n=0,48R_s$	<i>Lis-aren</i> /FAO 56 $R_n=0,48R_s$
nov/2010 a fev/2011	1	0,72	0,81	0,96	1,08
mar/2011 a jun/2011	2	0,38	0,56	0,44	0,65
jul/2011 a out/2011	3	0,40	0,57	0,46	0,66
nov/2011 a fev/2012	4	0,69	0,78	0,91	1,02
mar/2012 a jun/2012	5	0,81	0,75	0,97	0,89
jul/2012 a out/2012	6	0,58	0,72	0,66	0,82
nov/2012 a fev/2013	7*	0,89	0,99	1,16	1,29
mar/2013 a jun/2013	8	0,67	0,70	0,78	0,81
jul/2013 a out/2013	9	0,40	0,50	0,44	0,55
nov/2013 a fev/2014	10	0,71	0,78	0,89	0,98
mar/2014 a jun/2014	11	0,38	0,46	0,43	0,52
jul/2014 a out/2014	12	0,39	0,56	0,42	0,60
nov/2014 a fev/2015	13	0,64	0,79	0,81	1,01
mar/2015 a jun/2015	14	0,78	0,91	0,91	1,06
Média		0,60	0,71	0,73	0,85

*Transbordamento da caixa de drenagem

Somente no período 5 a ET do *lis-arg* foi maior do que a medida no *lis-aren*. Isso porque a grama do *lis-arg* apresentou um melhor recobrimento no mês de março/2012 (97% *lis-arg* 87% *lis-aren*) e também havia sido replantada em novembro do ano anterior (2011). Em todos os demais períodos, o *lis-aren* apresentou uma evapotranspiração maior do que o *lis-arg*. Esse efeito pode ser visto na Figura 5-23 através da linha preta com marcadores circulares, no qual a razão entre ET do *lis-arg* e *lis-aren* é sempre menor do que 1 (exceto no período 5). Isso reflete a adaptação da grama ao solo e o recobrimento da superfície evaporante. Considerando todos os 14 períodos, o gramado do *lis-arg* apresentou um recobrimento médio de 62% e o *lis-aren* 73%.

Foram também determinadas as relações experimentais entre a ET medida nos lisímetros, estimada com a metodologia da FAO 56 e usando esse mesmo método, porém, com o saldo de radiação de 48% da irradiância solar global (Tabela 5-2).

A relação média entre a ET observada nos lisímetros e a ET_o FAO 56 foi de 0,60 para o *lis-arg* e 0,71 para o *lis-aren*. A ET_o estimada com a simples relação entre o saldo de radiação e a irradiância faz as relações médias dos lisímetros aumentar para 0,73 (*lis-arg*) e 0,85 (*lis-aren*).

O coeficiente 0,60 obtido entre a ET *lis-arg* e a ET_o *FAO 56* é o mesmo coeficiente médio adotado para pastagem (ALLEN et al., 1998). Para determinar o balanço hídrico após chuvas de inverno em um solo descoberto ou não cultivado, a literatura sugere um coeficiente com valor médio 0,56 para estimar a evaporação do solo (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Este valor é próximo aos valores obtidos no inverno de 2011 e 2014 para o *lis-arg*.

A elevação dos coeficientes obtidos nos meses de novembro a fevereiro é também ocasionada pelos cortes frequentes do gramado da estação. A grama apresenta maiores coeficientes 6 a 8 dias após o corte (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A evapotranspiração foi fortemente influenciada pelo período do ano, sendo que os menores valores são observados geralmente no final do outono e início do inverno. Este resultado concorda com aquele encontrado no trabalho de Penman que relata que no inverno, a evapotranspiração fica entre 50 e 60% da evaporação de uma superfície de água livre (aqui representada pela ET_o *FAO 56*) e 80 a 100% no verão (PENMAN, 1948).

A intensidade da ET e a ausência de chuvas influencia a irrigação nos lisímetros. Um aspecto interessante é analisar a diferença de irrigação ocorrida durante o dia e a noite (Figura 5-24).

Figura 5-24 Irrigação subsuperficial nos lisímetros durante os dias e as noites (dados no apêndice).

No gráfico da Figura 5-24, tem-se dois períodos de 2014 que apresentaram elevadas irrigações diárias (fevereiro e outubro) e nove dias de janeiro de 2015. As irrigações foram

divididas entre o dia (06:00 às 18:00) e a noite (18:00 às 06:00). As maiores irrigações ocorrem durante a noite após a evapotranspiração do dia. No *lis-arg* esse comportamento foi mais acentuado, não havendo irrigação durante o dia, com exceção de apenas cinco dias de 2014. Isso reflete o funcionamento da boia e manutenção do nível constante de água nos lisímetros. Como o fluxo de água no solo é lento, a boia é mais acionada no período noturno após a ET ocorrida durante o dia. Uma vez que a evapotranspiração do *lis-aren* foi maior, a boia teve que ser acionada durante todos os dias e as noites, diferente do *lis-arg*. Isso indicando que durante as irrigações o nível de água efetivamente não era mantido constante no *lis-arg*. A irrigação noturna em 2014 foi o dobro e, às vezes, quase o triplo daquela ocorrida durante o dia.

Em 2015, a ET dos lisímetros foi aumentada e o consumo de água também, sendo que a boia do *lis-arg* apresentou um funcionamento intermitente durante os dias e as noites. Nessa semana de janeiro/2015 a ET do *lis-aren* foi intensa e causou uma mudança de funcionamento na boia; a irrigação durante o dia foi maior quando comparada com aquela durante a noite.

5.6 ETgage e Método da Razão de Bowen

Para medir a evapotranspiração do gramado na estação climatológica foi empregado um atmômetro de cápsula porosa com lona verde (*ETgage*) e também uma torre com dois psicrômetros de ventilação forçada para o método da razão de *Bowen*. Os dados podem ser visualizados na Figura 5-25.

Figura 5-25 Variação da evapotranspiração do gramado da Estação Climatológica do CRHEA durante o período de 02/03/2015 a 31/08/2015. Os dados medidos no *ETgage* são simbolizados com marcadores triangulares (verde). As linhas com marcadores em formato de losango simbolizam a evapotranspiração medida com o método da razão de *Bowen*. A chuva diária é simbolizada pelas barras verticais invertidas.

Os dados medidos com o *ETgage* apresentaram uma superestimativa da ET durante o início de junho/2015 e no final de agosto/15 quando comparado com o MRB. Esse método estima a ET, enquanto o *ETgage* continua medindo a ET_o . Isso pode indicar que este instrumento é mais sensível em período seco com elevado poder evaporante do ar. As medidas de evapotranspiração do *ETgage* concordaram com o MRB, quando há chuvas regulares na região. O gráfico de dispersão entre o MRB e o *ETgage* mostrado na Figura 5-26 e comprova isso.

Figura 5-26 Gráfico de dispersão entre as medidas do *ETgage* e do método da razão de *Bowen*. Na figura A, não estão incluídos os pontos de agosto. Na figura B os pontos de agosto estão circulado em vermelho

Na Figura 5-26 a inclusão dos pontos de agosto na dispersão diminui a concordância de 0,80 para 0,44 indicando que no período seco o *ETgage* não fornece boas medidas de evapotranspiração real do gramado. Gleason et al. (2013) usando idêntico aparelho obteve resultados concordantes com a ET estimada pelo método da ASCE (*American Society of Civil Engineers*), entretanto quando a alfafa estava na condição de referência os autores destacam que o *ETgage* modelo eletrônico apresentou os melhores resultados. Para clima mediterrâneo e outro semiárido este tipo de atmômetro se mostrou apto para estimar ET, segundo trabalhos de Gavilán; Castillo-Llanque (2009) e Magliulo et al. (2003).

O método micrometeorológico da razão de *Bowen* (MRB) foi instalado em 20/12/2014. Os resultados das medições e da evaporação observada no tanque 20 m² são mostrados no gráfico da Figura 5-27.

Figura 5-27 Variação da evapotranspiração do gramado da Estação Climatológica do CRHEA durante o período de 20/12/2014 a 31/08/2015. As linhas com marcadores em formato de losango simbolizam a evapotranspiração medida com o método da razão de *Bowen*. A evaporação medida com o tanque 20 m² é mostrada com marcadores circulares. A chuva diária é simbolizada pelas barras verticais invertidas.

O maior valor de evapotranspiração com o MRB foi obtido próximo ao solstício de verão no dia 27/12/2014 com 6,7 mm/dia. Esse valor foi superior ao 4,8 mm de evaporação do tanque 20 m². A ET média estimada com o MRB e *FAO 56* foi de 3,0 mm/dia, enquanto que o tanque padrão foi de 3,5 mm/dia. Essas médias foram feitas utilizando 173 dias de

medidas (dez/2014 à ago/2015). A boa disponibilidade hídrica ocasionada pela chuva na região favoreceu a concordância entre os valores de evapotranspiração (MRB) e evaporação, sobretudo nos meses de abril a julho. Camargo e Camargo (2000) afirmam que em uma região úmida o tanque de 20 m² é um bom fornecedor de medidas de evapotranspiração de referência.

Ao final de agosto, devido à falta de chuvas, a evapotranspiração (MRB) foi reduzida pela falta de umidade no solo. Nos meses de janeiro a março as chuvas intensas com curta duração e grande acumulado podem ser as responsáveis pela não concordância entre as medidas de evaporação e evapotranspiração.

5.7 Evaporação nos tanques

A evaporação de uma superfície líquida foi medida com auxílio de um tanque de evaporação com estrutura idêntica ao *lis-arg* e *lis-aren*, submetido às mesmas condições meteorológicas. O acumulado mensal de evaporação observado no tanque com nível constante e tanque 20 m², a insolação medida com o heliógrafo *Campbell Stokes* e a chuva durante o período de estudo são mostrados no gráfico da Figura 5-28.

Figura 5-28 Evaporação observada no tanque com nível constante em milímetros acumulados por mês, (linha vermelha). A duração do brilho solar foi acumulada em totais mensais, em horas, (linha laranja). O acumulado de chuva mensal (mm/mensal) é representado pelas barras verticais azuis (dados no apêndice).

Na Figura 5-28, as menores taxas de evaporação mensal são observadas geralmente em junho e julho (inverno) enquanto as maiores, em dezembro e janeiro (verão). A menor evaporação média mensal observada no tanque de evaporação com nível constante foi de 49,7 mm/mês em junho/2013. Nesse mesmo mês, o valor evaporado no tanque 20 m² foi de 55,3 mm/mês.

A irradiância solar global média e o déficit de saturação de vapor em junho/2013 foram 10,8 MJ.m⁻².dia⁻¹ e 0,41 kPa respectivamente, os menores valores mensais no período de nov/2010 a dez/2015. Em junho de 2014, a irradiância foi de 13,8 MJ.m⁻².dia⁻¹, resultando em 77,8 mm/mês de evaporação para o tanque de 20 m² e 81,8 mm/mês no tanque de nível constante. Sendo que a velocidade do vento à 2,0 m se manteve com valores próximos (Figura 5-29). A evaporação nesse mês de junho/2014 foi aumentada devido a maior disponibilidade energética e o maior déficit de saturação de vapor 0,63 kPa (valor médio) quando comparado com junho/2013.

Figura 5-29 Variação da razão de insolação, umidade relativa do ar e velocidade. A linha preta representa a média mensal da velocidade do vento (2,0 m), a vermelha simboliza a razão de insolação (n/N). A umidade relativa do ar é indicada com barras verticais (dados no apêndice).

O maior valor de evaporação nos tanques foi medido em 2014 no mês de outubro, com valor de 196,4 mm para o tanque de 20 m² e 176,8 mm para o tanque de evaporação com

nível constante. Outubro/ 2014 teve apenas 38,8 mm de chuva. A umidade relativa média mensal de outubro foi a menor registrada, superando valores de agosto (Figura 5-29). A irradiância solar global foi de $23,9 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, índice que aliado à baixa umidade do ar favoreceram o surgimento do maior déficit médio mensal de saturação de vapor do período experimental 1,5 kPa. Esse valor juntamente com uma velocidade média do vento elevada (o segundo maior valor da série) resultou no máximo valor de evaporação. Janeiro de 2014 apesar de apresentar uma maior irradiância média ($25,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) teve o mesmo comportamento, porém, com menor intensidade, pois a velocidade média do vento foi menor e o déficit de saturação de vapor foi 1,2 kPa.

Na Figura 5-29 pode se observar que os meses de dezembro/2012 e janeiro/2013 apresentaram valores semelhantes de umidade relativa e razão de insolação. O mês de dezembro/2012 evaporou 141,6 mm/mês (tanque 20 m^2) e 116,8 mm/mês (tenc). Janeiro/2013 evaporou 123,0 e 99,3 mm/mês para o tanque 20 m^2 e tenc. A diferença se explica pela intensidade do vento; enquanto dezembro/2012 teve uma velocidade média próxima a 2,0 m/s, em janeiro/2013 esta não passou de 1,5 m/s.

Na Figura 5-30, têm-se as curvas acumuladas de precipitação e evaporação observada nos tanques. As curvas são compostas com valores diários dos 56 meses de estudo.

Figura 5-30 Chuva e evaporação acumulada em milímetros (linha azul). A linha preta simboliza o tanque de 20 m^2 e a linha laranja o tanque de nível constante

As taxas de evaporação do tanque com nível constante, em geral, concordaram com aquelas medidas no tanque 20 m^2 , que é utilizado como evaporímetro padrão para estimar a evaporação de lagos (GANGOPADHYAYA, 1966; HOUNAM, 1973). Porém a evaporação do tanque 20 m^2 foi 10% superior.

A curva de evaporação acumulada do tanque 20 m^2 apresentou valores maiores do que a curva do tanque de evaporação com nível constante. As diferenças podem resultar dos

métodos de medição. No tanque 20 m² foi utilizado um parafuso micrométrico em forma de gancho e no de nível constante, o sistema de válvula e boia. A válvula e boia é um sistema que pode apresentar falhas. Assim, esse sistema de flutuação pode interferir diretamente na alimentação do tanque e nas medidas de evaporação (ABOUKHALED et al., 1982; SCHWINGEL et al., 2001; VILLA NOVA et al., 2005).

Devido ao tanque ser enterrado sucessivas podas da grama na Estação Climatológica acabava por cobrir a superfície evaporante com palhas e também com a formação de filme com algas (Figura 5-31). No tanque de 20 m² não há formação de filme com algas devido a maior área de exposição e sensibilidade a ação dos ventos favorecendo a formação de ondas. A coloração da água imediatamente após o enchimento era transparente e passado alguns dias, ela se tornava escura (Figura 5-32). As diferenças de exposição entre os tanques e a sensibilidade ao vento também podem contribuir para a maior evaporação do tanque 20 m².

Figura 5-31 Palhas na superfície do tanque de evaporação enterrado com nível constante e filme de alga que dificultaram a uniformidade da condição de evaporação

Figura 5-32 Variações da cor da água do tanque de evaporação, essa variação também altera o albedo da água.

O tanque 20 m², por ser enterrado e ter grandes dimensões apresenta as mesmas dificuldades relatadas com o tanque de evaporação com nível constante. Essas dificuldades também são relatadas nos trabalhos de Gangopadhyaya (1966) e Hounam (1973).

Na Figura 5-33 (A), observa-se que os valores diários tiveram grande dispersão com R² igual a 0,23. As médias mensais diárias apresentaram uma boa correlação e um melhor agrupamento, resultando em um coeficiente de confiança (c) igual a 0,79 considerado como muito bom, como mostrado na Figura 5-33 (B).

Figura 5-33 Gráficos de dispersão entre a evaporação medida utilizando o tanque de evaporação com nível constante e aquela observada no tanque de 20 m². No gráfico A foram utilizados pares de dados diários. No gráfico B foi empregada uma média mensal.

Foi utilizada a equação de Linacre para fazer o preenchimento de falhas de dados de evaporação (LINACRE, 1992). Essas falhas podem ser devido a problemas de funcionamento no sistema de válvula e boia no transdutor de pressão acoplado ao *datalogger* dentro do reservatório alimentador e/ou à inexistência de leituras consistentes no tanque 20 m² devido às chuvas. A metodologia proposta por Linacre apresentou bons resultados quando comparados com tanques de 20 m² no Brasil (LEITÃO et al., 2007; OLIVEIRA, 2009). Durante os 1703 dias de monitoramento da evaporação obtiveram-se medidas do tanque 20 m² em 1590 dias e 1325 dias para o tanque de evaporação com nível constante.

5.8 Balanço Hídrico

Uma vez medidos todos os componentes do balanço (Equação 32) para cada lisímetro, seus valores acumulados por período foram dispostos nos gráficos da Figura 5-34 e Figura 5-35. Precipitação e irrigação apresentam-se com valores positivos, uma vez que são componentes de entrada nos lisímetros. A drenagem e a evapotranspiração são expressas como valores negativos, pois simbolizam os fluxos de saída nos diferentes solos analisados.

Figura 5-34 Balanço hídrico acumulado para o *lis-arg*. A linha preta representa a entrada total que é a soma da precipitação e da irrigação. A linha vermelha representa a saída total que é o somatório da evapotranspiração e da drenagem.

Figura 5-35 Balanço hídrico acumulado para o *lis-aren*. A linha preta representa a entrada total que é a soma da precipitação mais irrigação. A linha vermelha representa a saída total que é o somatório da evapotranspiração e da drenagem.

Além de todas as diferenças entre os solos já analisados para cada componente do balanço hídrico, destaca-se a baixa proporção que representa a irrigação subsuperficial dentro do balanço final, tanto no solo argiloso como no solo arenoso. Neste último tratamento,

destaca-se o maior valor de evapotranspiração comparado com o solo argiloso. Este fato pode ser comprovado com o cruzamento da curva de evapotranspiração (linha verde) com a curva de drenagem (linha amarela). Para valores de drenagens semelhantes, como foi mostrado anteriormente, a curva de evapotranspiração do *lis-aren* começou a cruzar a curva de drenagem no ponto médio do eixo horizontal. Enquanto que no *lis-arg* esse cruzamento só começou próximo ao fim do eixo horizontal. A irrigação recebida pelo *lis-arg* foi de apenas 432 mm, um valor menor que a metade da irrigação no *lis-aren* (917 mm).

Na Figura 5-34 e Figura 5-35 a linha pontilhada, que simboliza as diferenças entre entrada e saída dos fluxos de água, está posicionada no eixo da abscissa, indicando a conformidade do balanço hídrico.

5.9 Análise comparativa das perdas evaporativas nos lisímetros e tanques

Os valores de evaporação no tanque e evapotranspiração nos lisímetros foram acumulados junto com a estimativa *FAO 56* durante o período de novembro/2010 até julho/2015, visando avaliar as perdas hídricas das superfícies e os comportamentos hídricos dos sistemas (Figura 5-36). As curvas teóricas de evapotranspiração acumulada esperada segundo a textura do solo são apresentadas na Figura 5-37.

A família de funções lineares ajustadas às curvas acumuladas de evaporação e evapotranspiração será empregada para avaliar o impacto ambiental nas reservas hídricas subterrâneas gerado pela retirada da cobertura do solo em áreas mineradas.

Figura 5-36 Evaporação no tanque de nível constante e evapotranspiração acumuladas nos lisímetros durante o período de 11/2010 a 06/2015. A família de equações lineares que representam as perdas de água acumulada com os dias também é mostrada.

Figura 5-37 Curvas de evapotranspiração acumulada esperada conforme a textura do solo (HILLEL; BAVEL, 1976).

Na Figura 5-37 com o passar do tempo, os solos de textura grossa (areia) tendem a evaporar o mínimo, enquanto os de textura fina (solos argilosos) podem sustentar a primeira fase da secagem durante mais tempo devido à capilaridade, portanto, evapora-se mais (HILLEL; BAVEL, 1976).

A evapotranspiração acumulada estimada com a *FAO 56* e a evaporação medida no tanque com nível constante apresentou a mesma equação $y=3,54x$. A evaporação média de longo período registrada no tanque de evaporação com nível constante é igual a 3,56 mm/dia.

A perda de água acumulada no *lis-aren* apresentou um coeficiente angular menor 2,62. O *lis-arg* apresentou o mínimo coeficiente angular 2,28 dentre as três situações. Isso reflete a cobertura vegetal dos lisímetros, enquanto que o *lis-aren* teve um recobrimento médio de 73% da superfície evaporante com grama, o *lis-arg* ficou com 62%. Essa diferença de 11% na cobertura dos lisímetros resultou em um acréscimo de 0,34 no coeficiente angular do *lis-aren*.

5.10 Valoração ambiental da proteção exercida pela cobertura do solo

As reservas hídricas subterrâneas são protegidas do contato direto com o poder evaporante da atmosfera devido à existência do solo. Essa característica também confere a boa qualidade geralmente encontrada nas águas subterrâneas. Na atividade de mineração, a completa modificação da paisagem acaba por remover o solo e expor as águas ao contato direto com a atmosfera, substituindo a evapotranspiração da vegetação por evaporação de superfície de água livre.

Com os dados lisimétricos e evaporimétricos coletados no experimento, foram estabelecidas as curvas de perdas evaporativas acumuladas, representadas por equações lineares simples (Figura 5-36). Cada função dessas irá representar uma situação da atividade minerária, conforme exemplificado na revisão da literatura.

A média diária da evapotranspiração de referência ou potencial estimada com o método de *Penman-Monteith FAO-56*, no local de estudo, é de 3,3 mm/dia (série de dados 2000-2015). Na Figura 5-36 o coeficiente angular com valor de 3,5 (linha azul) simboliza uma condição potencial de desenvolvimento vegetal sem deficiência hídrica ou nutricional, fato este sustentado pela proximidade com o valor de 3,3 descrito anteriormente.

A condição potencial da superfície vegetada não ocorre durante todo o ano, mesmo mantendo uma irrigação nos meses de déficit hídrico. No Estado de São Paulo, segundo estudo de Alcântara e Bufarah (1992) o crescimento de 32 tipos de forrageiras era praticamente nulo nos locais onde a temperatura mínima do ar medida durante o mês mais frio era menor que 10°C. Isso aumenta o número de folhas seca nos períodos frios e diminui o índice de área foliar descaracterizando as condições de evapotranspiração de referência ou potencial. No geral, os meses de maio a setembro, apresentam dias com temperaturas mínima do ar inferior a 10°C. Assim esse coeficiente angular com valor de 3,5 só é possível numa situação de evapotranspiração potencial ou na evaporação de superfície de água livre. Como esta condição não é observada durante todas as estações do ano, a redução deste coeficiente angular de 3,5 se faz necessário. De acordo com a *FAO-56* para gramíneas o coeficiente de

ajuste da condição de evapotranspiração potencial ou de referência para a real é 0,60. O coeficiente angular da perda evaporativa acumulada encontrado foi de 2,6 para o *lis-aren* e de 2,3 para o *lis-arg*. O valor para o *lis-arg* ficou próximo ao 60% do valor de 3,3 sugerido pela *FAO-56*. Isso confirma que o coeficiente descrito pela *FAO-56* representa uma condição bem acentuada de restrição hídrica ou desenvolvimento foliar. Condição esta que foi apresentada pelo *lis-arg*. Já o valor 2,6 para o *lis-aren*, ficou um pouco acima do previsto 2,1 utilizando o coeficiente da *FAO-56* (60% do coeficiente angular da evaporação acumulada no tanque). Esse maior valor 2,6 para o *lis-aren* garante que não houve deficiência hídrica e somente pode ter acontecido uma restrição térmica ou fitossanitária.

Deve-se salientar que essas equações foram obtidas em uma representação experimental com boa disponibilidade hídrica, pois o nível de água subterrânea estava próximo da superfície do terreno, a 1,0 m de profundidade apenas. Essa situação é bem típica de áreas próximas aos talwegues principais de bacias hidrográficas, onde o nível de água do aquífero é pouco profundo, como em matas de galeria ou zonas ripárias. Para analisar as perdas evaporativas é necessário diferenciar a origem do suprimento hídrico nas cavas de mineração. Assim três situações hipotéticas serão descritas a seguir.

Na situação inicial para um solo arenoso coberto por um gramado e antes da instalação da cava, a evapotranspiração acumulada ou a perda de água para atmosfera pode ser estimada com a equação $ET=2,6 ND$, obtida com as medições no *lis-aren*, linha preta da Figura 5-36, sendo que ND é a contagem do número de dias. Após a formação da cava com espelho d'água, o coeficiente angular da reta passa para 3,5 e a equação adequada para avaliar a perda por evaporação a partir da data da formação da lagoa é $EV=3,5 ND$, linha azul da mesma figura.

Na situação 1, a cava se torna uma lagoa, com água proveniente apenas dos aquíferos, ou seja, aquela água considerada como azul no balanço hídrico. Assim, a perda de água para a atmosfera é representada pela equação $EV=3,5ND$. Dessa forma, o coeficiente angular da reta que simboliza a perda do aquífero (água apenas da zona saturada) passa de 0,5 para 3,5 em solos arenosos e de 0,3 para 3,5 em solos argilosos. A quantificação da função de proteção dos estoques hídricos pode ser estimada com a simples subtração dos coeficientes angulares, resultando em $Y_{lareia}=3,0ND$, (Y_{areia} água azul expressa em milímetros, representando a perda de água do aquífero para a atmosfera devido à instalação da cava e formação do lago). A expressão para solos argilosos seria $Y_{largila}=3,2ND$.

Na situação 2, a água na cava é proveniente da chuva direta na superfície da mesma e do escoamento superficial que desemboca na cava. Essa origem das águas lhe conferiria a característica de água verde, pois a tendência natural dessa água seria infiltrar no solo, ficar na zona insaturada e ser disponibilizada para evapotranspiração. Nessa situação, a profundidade do nível de água é elevada, seus efeitos não são refletidos na cava, o lençol pode ser considerado ausente ou profundo. Assim, a cava pode estar em uma região elevada perto do divisor topográfico da bacia ou não ter atingido profundidade suficiente para ser alimentada pelo fluxo subterrâneo. Dependendo do tamanho da cava e da impermeabilização do solo está só conseguirá acumular água se o regime pluviométrico da área for suficientemente grande para fazê-lo. Nessa situação, a cava pode funcionar como um reservatório de regularização ou de segurança hídrica, desde que a qualidade das águas acumuladas na cava permita. Isso aconteceu com uma cava desativada que extraía argila no município de Cordeirópolis - SP. Durante a seca de 2014, a água acumulada nas cavas tornou-se vazão disponível e foi utilizada para o abastecimento da população. Por isso, a função de proteção quantitativa do solo frente aos estoques hídricos nessa situação não se aplica, pois não haveria diminuição dos estoques nos aquíferos.

Alguns impactos ambientais nesse caso, e também nos outros seriam diminuídos ou aumentados devido à instalação da atividade mineradora como: a perda do solo agricultável, supressão da vegetação, perda da biodiversidade e regulação do microclima local.

Na situação 3, a proteção quantitativa dos volumes de água armazenados no solo pode ser expressa pela simples substitutibilidade da evapotranspiração da superfície natural pela evaporação do lago ou lagoa. Nessa condição, não é possível dissociar a origem da água na cava, se azul ou verde, se ela veio do aquífero ou do escoamento superficial ou da precipitação sobre a cava. Tampouco quando há a mistura dos dois tipos de água na cava, verde e azul. Desta forma, a quantificação do impacto pela retirada do solo pode ser feita subtraindo os coeficientes angulares das retas. Por exemplo, a superfície natural vegetada em solo arenoso perde uma lâmina acumulada de água expressa pela função $ET_{\text{areia}}=2,6 \text{ ND}$ se fosse um solo argiloso e $ET_{\text{argila}}=2,3 \text{ ND}$ se fosse arenoso (sendo ND número de dias após a conversão da superfície ou aparecimento da lagoa). Após a inserção da cava de mineração na superfície, a perda acumulada de água passa a ser expressa com a equação $EV=3,5\text{ND}$. A magnitude da conservação dos volumes de água conservados se não houvesse a transformação da superfície de um solo arenoso para um espelho d'água seria dado pela equação $Y_{3\text{areia}}=0,9\text{ND}$ para solo arenoso e por $Y_{3\text{argila}}=1,2\text{ND}$ se fosse um solo argiloso. Para obtê-las,

apenas subtraíram-se os coeficientes angulares das retas que simbolizavam a evaporação acumulada no tanque de nível constante e as evapotranspirações acumuladas nos lisímetros.

Utilizando uma abordagem experimental com lisímetros e tanques localizados em Estação Climatológica durante mais de 4 anos e equações simplificadas, foi possível estimar a perda evaporativa para realizar uma simulação do impacto devido à instalação de cavas de mineração. Essa simulação será feita utilizando a premissa: o impacto hídrico causado pela substituição de cobertura (grama para água) pode ser quantificado através do custo de reposição da água perdida para atmosfera. Na prática essa reposição não é feita em empreendimentos minerários. A estimativa do impacto gerado foi feita para um clima úmido com baixa deficiência hídrica no inverno. Como a adaptação da grama ao solo argiloso não foi plenamente satisfatória, nos exercícios comparativos a seguir será utilizada apenas a condição de solo arenoso nas cavas de mineração.

5.11 Determinação do impacto ambiental usando o método custo de reposição

Uma bacia hidrográfica amplamente impactada pela mineração em cavas é a do Paraíba do Sul. Nessa bacia, a resolução 8/2001 do Ceivap descreve a proposta metodológica para cobrança pelo uso da água dos setores de abastecimento doméstico, industrial e lançamento de efluentes. Com a interação entre o setor agrícola e pecuarista, foi adaptada uma metodologia para cobrança por dessedentação animal e irrigação (resolução 15/2002 do Ceivap) (REBOUÇAS et al., 2006). A cobrança na bacia do Paraíba do Sul iniciou-se em dezembro de 2002. A formulação matemática explicitando o cálculo da cobrança é expressa na Figura 5-38.

O diagrama apresenta a seguinte fórmula:

$$C = \underbrace{Q_{cap} \times K_0 \times PPU}_{\text{captação}} + \underbrace{Q_{cap} \times K_1 \times PPU}_{\text{consumo}} + \underbrace{Q_{cap} \times (1 - K_1) \times (1 - K_2 K_3) \times PPU}_{\text{diluição de efluentes (DBO)}}$$

Acima da fórmula, há agrupamentos de variáveis com rótulos: 'vazão' e 'preço' para Q_{cap} e PPU em cada parcela; 'vazão' para o termo $(1 - K_1)$; e 'preço' para o termo PPU na terceira parcela.

Figura 5-38 Fórmula de cobrança pelo uso da água instituída na bacia do Paraíba do Sul. A equação está desmembrada em três parcelas, referentes aos tipos de uso do recurso hídrico (REBOUÇAS et al., 2006)

Na equação da Figura 5-38, Q_{cap} é a vazão captada ($m^3/mês$); K_0 é o fator multiplicativo aplicado ao preço unitário da vazão captada (valor inicial para $K_0 = 0,50$); K_1 é o coeficiente de consumo para a atividade (fração da vazão captada que não retorna ao corpo

d'água); K_2 é a fração da vazão do efluente tratado em relação a vazão total de efluente; K_3 é a eficiência do tratamento em termos de remoção de DBO e PPU é o preço público unitário para captação e lançamentos de afluentes (R\$ 0,02/ m³).

No caso da mineração, a equação pode ser simplificada ($C=Q_{\text{evap}}*PPU$) considerando a perda de água por evaporação como consumo, com $K_1=1,0$. Q_{evap} é a diferença de evaporação entre a superfície vegetada e a evaporação de superfície de água livre.

Na Tabela 5-3 e Tabela 5-4 são mostrados os exercícios comparativos do impacto econômico nos estoques hídricos devido à retirada do solo nas cavas de mineração, em Campo Grande MS e na bacia do Paraíba do Sul. Nos dois exercícios a evapotranspiração do pasto será considerada equivalente ao gramado.

Tabela 5-3 Determinação monetária do impacto hídrico devido às perdas evaporativas nas cavas de mineração de areia em Campo Grande MS

Local: Cava de Mineração de Areia em Campo Grande MS
Tipo de solo: Arenoso
Área das Cavas: 29 hectares
Tipo de vegetação substituída: pasto
Incremento de Evapotranspiração $\Delta E = 3,5 - 2,6 = 0,9 \text{ mm}$
Coeficiente de Consumo $K_1 = 1,0$
Incremento de Captação $\Delta Q_{\text{cap}} = \Delta E * \text{Área} = 264 \text{ m}^3$
Preço Público Unitário PPU = R\$ 0,02/m ³
Valor diário do impacto gerado PPU* ΔQ_{cap} = R\$ 5,28

Tabela 5-4 Determinação monetária do impacto hídrico devido às perdas evaporativas nas cavas de mineração de areia na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul no trecho entre Taubaté e Pindamonhangaba.

Local: Cava de Mineração de Areia Paraíba do Sul
Tipo de solo: Arenoso
Área das Cavas: 2252 hectares
Tipo de vegetação substituída: pasto
Incremento de Evapotranspiração $\Delta E = 3,5 - 2,6 = 0,9 \text{ mm}$
Coeficiente de Consumo $K_1 = 1,0$
Incremento de Captação $\Delta Q_{\text{cap}} = \Delta E * \text{Área} = 20265 \text{ m}^3$
Preço Público Unitário PPU = R\$ 0,02/m ³
Valor diário do impacto gerado PPU* ΔQ_{cap} = R\$ 405,30

Como as cavas de mineração na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul se situam, em sua maioria, em áreas de preservação permanente e em locais ocupados por matas ciliares, a vegetação que foi suprimida para dar origem às lagoas foi a Mata Atlântica. Nesse caso, a comparação com a superfície inicial gramada não é adequada. Assim, para verificar o incremento de evaporação tem-se que mensurar a evapotranspiração da floresta para a situação inicial. Essa tarefa pode ser realizada utilizando coeficientes descritos na literatura.

Um coeficiente médio entre a evapotranspiração de florestas (*eucaliptus*, Mata Atlântica) e a ET_o pode ser adotado como variando entre 0,80 e 1,20 (ALMEIDA; SOARES, 2003; ALVES et al., 2013). Como esse coeficiente possui valor próximo à 1,0 não haverá incremento de evaporação. Nessa situação o impacto nas reservas hídricas subterrâneas é irrelevante.

O uso das equações lineares obtidas com dados lisimétricos e evaporimétricos aliado à equação da cobrança pelo uso dos recursos hídricos permitiram desenvolver uma metodologia simples e fácil de ser aplicada nos estudos de impacto ambiental em empreendimentos minerários.

Projeções com valores dos impactos gerados para séries de 50 anos foram feitas utilizando os dados da Tabela 5-3 e da Tabela 5-4.

5.12 Projeções utilizando séries de 50 anos para o impacto minerário

Considerando que no empreendimento minerário de Campo Grande MS a área convertida de grama para espelho d'água fosse mantida em 29 hectares, preço público unitário constante (R\$ 0,02/m³) e a projeção iniciada a partir de 2015, o impacto econômico gerado através da mudança de cobertura e perda evaporativa após 50 anos seria de quase R\$100.000,00 (Figura 5-39).

Figura 5-39 Projeção do impacto monetário gerado pelo acréscimo de perdas evaporativas ocorridas devido à substituição de 29 hectares de área gramada para superfície de água livre, em cavas de mineração de areia próxima à Campo Grande MS.

No trecho entre Taubaté e Pindamonhangaba ambos em São Paulo, a atividade de extração de areia transformou 2252 hectares de solo em superfície de água livre até o ano de 2008. Se essa área fosse mantida constante junto com o preço público unitário, em 2015 seria

necessário desembolsar uma quantia de um milhão de reais pela retirada dessa água da bacia. Ao final da projeção de 50 anos esse impacto minerário passaria de 7 milhões de reais (Figura 5-40)

Figura 5-40 Projeção do impacto monetário gerado pelo acréscimo de perdas evaporativas ocorridas devido à substituição de 2252 hectares de área vegetada para superfície de água livre, em cavas de mineração de areia na bacia do Paraíba do Sul, trecho entre Taubaté SP e Pindamonhangaba SP.

6 CONCLUSÕES

Utilizando períodos com quatro meses de duração e considerando a variação de armazenamento de água igual a zero nessa escala de tempo, conclui-se que a evapotranspiração da grama batatais nos lisímetros com nível constante foi inferior àquela estimada pelo método padrão de *Penman-Monteith FAO 56*. As causas disso são a taxa de cobertura vegetal na área dos lisímetros que no inverno atingia índices menores ou próximos a 50% da superfície evaporante e a estimativa do saldo de radiação adotada pela *FAO-56* (equação de *Brunt* e de *Angstrom-Prescott*). A metodologia da *FAO 56* superestima o saldo de radiação medido sobre a grama. O saldo de radiação sobre um gramado na região estudada pode ser estimado como 48% da irradiância solar global.

A evapotranspiração do lisímetro com solo arenoso atinge uma relação unitária com a metodologia da *FAO-56* quando se muda a forma de estimar o saldo de radiação, adotando o saldo de radiação como 48% da irradiância solar global e apenas no período de novembro a fevereiro (exceto março a junho de 2015).

As medidas de insolação obtidas com o heliógrafo eletrônico (*Blake Larsen sun recorder*) concordam com a medição do heliógrafo *Campbell-Stokes* e produzem boas estimativas de irradiância solar global. Uma forma de automatizar as medidas de insolação,

sem a necessidade de um observador diário e heliogramas, é utilizando um heliógrafo eletrônico como o modelo usado nesta pesquisa o *Blake Larsen sun recorder*.

Nas condições climáticas do experimento um evaporímetro enterrado com área de 2,78 m² e profundidade de 1,32 m proporciona resultados concordantes com o tanque padrão (20 m²) quando da utilização de médias mensais. Nessa condição de média mensal, o coeficiente de confiança foi classificado como muito bom.

A evapotranspiração do gramado medida com o atmômetro de cápsula porosa e lona verde (*ETgage*) concordou com as medidas do método micrometeorológico da razão de *Bowen*. O atmômetro pode ser utilizado como uma ferramenta simples e prática para estimar a evapotranspiração do gramado, exceto durante o período seco, quando o atmômetro superestima a evapotranspiração real do gramado. As constantes chuvas na região favoreceram a concordância entre os valores de evapotranspiração pelo método da razão de *Bowen* e evaporação do tanque de 20 m². Em uma região úmida, o tanque de 20 m² fornece boas medidas de evapotranspiração.

A drenagem dos lisímetros com solo argiloso e com solo arenoso apresentaram valores semelhantes, e foram em média 50% da precipitação.

A proteção e cobertura exercida pelo solo frente ao poder evaporante da atmosfera deve ser considerada e analisada nos estudos ambientais de licenciamento e recuperação aplicados às cavas de mineração. O impacto gerado devido à remoção da proteção pode ser estimado economicamente de forma simples utilizando como estratégia para isso o custo de reposição da água perdida da superfície para atmosfera.

No licenciamento ambiental de cavas de mineração a relação linear 0,9ND, sendo ND o número de dias após o surgimento da área alagada na cava, pode ser utilizado para prever a lamina de água perdida do armazenamento subterrâneo para a atmosfera. A relação acima foi obtida em uma superfície gramada e de água livre num clima tropical úmido, com baixa deficiência hídrica no inverno, e com uma evapotranspiração média de 3,3 mm/dia.

Essa simples abordagem pode auxiliar a previsão de impactos (perdas evaporativas) durante a fase de licenciamento das cavas de mineração. Nos programas de recuperação de áreas degradadas pela mineração o impacto no recurso hídrico subterrâneo gerado ao longo dos anos de atividade minerária pode ser quantificado. A metodologia indicada pode ser aplicada nas cavas de mineração da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul e em Campo Grande - MS. O incremento de evaporação (0,9ND) aliado com o valor cobrado de R\$0,02/m³ e a área alagada das cavas permitiram quantificar economicamente o valor do impacto, através do

custo de reposição. O método requer apenas a medição da área convertida em superfície de água livre, para isto podem ser usadas imagens de satélite e a relação acima descrita.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. Lysimeters. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 39, n. 1, p. 68, 1982.

ADAMS, C.; SEROA DA MOTTA, R.; ORTIZ, R. A.; et al. The use of contingent valuation for evaluating protected areas in the developing world: Economic valuation of Morro do Diabo State Park, Atlantic Rainforest, São Paulo State (Brazil). **Ecological Economics**, v. 66, n. 2–3, p. 359–370. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.09.008, 2008.

ALCÂNTARA, P. B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras : gramíneas & leguminosas**. 4^o ed. São Paulo - SP: Nobel, 1992.

ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTER, I. A.; JENSEN, M. E. **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. Recuperado abril 28, 2016, de <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0073358>, 1991.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO, Rome**, v. 300, 1998.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparison of water use in Eucalyptus grandis plantations and Atlantic Rainforest in eastern coast of Brazil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159–170. doi: 10.1590/S0100-67622003000200006, 2003.

ALVES, M. E. B.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Estimate of the crop coefficient for Eucalyptus cultivated under irrigation during initial growth. **CERNE**, v. 19, n. 2, p. 247–253. doi: 10.1590/S0104-77602013000200008, 2013.

AMAZONA, M. DE C. Valor ambiental em uma perspectiva heterodoxa institucional-ecológica: an institutional-ecological heterodox perspective. **Economia e Sociedade**, v. 18, n. 1, p. 183–212. doi: 10.1590/S0104-06182009000100006, 2009.

AMORIM, M. C. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998.

ANA. **Relatório de segurança de barragens**. p.150. Brasília-DF: Agência Nacional de Águas, 2014.

ANA. **Boletim de monitoramento dos reservatórios do Rio Doce**. p.22. Brasília-DF: Agência Nacional de Águas, 2015.

ANTONIAZZI, L. B. **Oferta de serviços ambientais na agricultura**. Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 2008.

ASSESSMENT, M. E. **Ecosystems and Human Well-being a framework for assessment**. Washington: Island Press, 2005.

ASSIS, F. N. **O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre evapotranspiração medida e estimada**. Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 1978.

ASSOULINE, S.; TYLER, S. W.; TANNY, J.; et al. 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. doi: 10.1016/j.advwatres.2007.07.003, 2008.

BANGERTER, P. J.; DIXON, R. E.; VILLEGAS, M. **Improving Overall Usage of Water in Mining - A Sustainable Development Approach**. . Santiago, 2010.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar**. Mestrado, Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 1981.

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. São Carlos, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual De Irrigação**. 3. ed ed. Viçosa: UFV, 2008.

BLACK, T. A. T. Hydraulic Load-Cell Lysimeter, Construction, Calibration, and Tests. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 5, p. 623. doi: 10.2136/sssaj1968.03615995003200050016x, 1968.

BOWEN, I. S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. **Physical Review**, v. 27, n. 6, p. 779–787. doi: 10.1103/PhysRev.27.779, 1926.

BROW, E. **Water for a sustainable minerals industry**. . p.3–14. Brisbane, 2003.

BRUSCHI, D. M.; PEIXOTO, M. C. D. **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios - Extração de areia, cascalho e argila - Técnicas e controle ambiental**. v. IV. Belo Horizonte, 1997.

BURT, S. **The Weather Observer's Handbook**. 1º ed. Cambridge University Press, 2012.

CABRERA, M. C. . **Quantificação da alteração no balanço hídrico devido a cavas de mineração utilizando lisímetros e tanques de evaporação**. Sao Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2011, setembro 16.

CABRERA, M.; YOULTON, C.; WENDLAND, E. Drenagem de solo argiloso e arenoso em lisímetros e estimativa de recarga subterrânea. 47º Congresso Brasileiro de Geologia Trilhando as Novas Fronteiras dos Recursos Naturais. **Anais...**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 2014.

CALIJURI, M. DO C.; CUNHA, D. G. F. C. **ENGENHARIA AMBIENTAL Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Elsevier. Recuperado dezembro 1, 2015, de <http://www.elsevier.com.br/site/produtos/Detalhe-Produto.aspx?tid=90716&seg=3&cat=277&tit=ENGENHARIA%20AMBIENTAL>, 2013.

CAMARGO, Â. P. Primórdios da agrometeorologia no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, 1993.

CAMARGO, Â. P. DE. **Contribuição para determinação da evapotranspiração potencial no estado de são paulo**. Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 1961.

CAMARGO, Â. P. DE; CAMARGO, M. B. P. DE. An analytic revision of the potential evapotranspiration. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 125–137. doi: 10.1590/S0006-87052000000200002, 2000.

CAMARGO, Â. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CARDOSO, M. DE O.; TURETTA, A. P. D.; PRADO, R. B. Manutenção do solo e água através de programas de pagamentos por serviços ambientais. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**. Bento Gonçalves, 2013.

CAVALCANTI, C. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 53–67. doi: 10.1590/S0103-40142010000100007, 2010.

CHARTRES, C.; VARMA, S. **Out of Water: From Abundance to Scarcity and How to Solve the World's Water Problems**. 1 edition ed. Upper Saddle River, N.J: FT Press, 2010.

CHAVES, H. M. L.; BRAGA, B.; DOMINGUES, A. F.; SANTOS, D. G. Quantificação dos Benefícios Ambientais e Compensações Financeiras do “Programa do Produtor de Água” (ANA): II. Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 15–21, 2004.

CIRINO, J. F.; LIMA, J. E. DE. Valoração contingente da Área de Proteção Ambiental (APA) São José - MG: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 3, p. 647–672. doi: 10.1590/S0103-20032008000300004, 2008.

COOPER, J. P. Potential production and energy conversion in temperate and tropical grasses. **Herbage Abstracts**, v. 40, n. 1, p. 1–15, 1970.

COOPER, J. P.; TAINTON, N. M. Light and temperature requirements for the growth of tropical and temperate grasses. **Herbage Abstracts**, v. 38, p. 167–179, 1968.

COSTANZA, R. **Ecological economics: The science and management of sustainability**. Nova Iorque: Columbia University Press, 1991.

COSTANZA, R.; CUMBERLAND, J.; DALY, H.; GOODLAND, R.; NORGAARD, R. **An introduction to ecological economics**. Boca Raton: St. Lucie Press, 1997.

DALY, H. E.; FARLEY, J. **Ecological economics**. Washington: Island Press, 2004.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. DE F.; et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233. doi: 10.1590/1678-4499.0363, 2015.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. 3 edition ed. Waveland Press, Inc., 2014.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**, FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: FAO, 1977.

EARY, L. E. Predicting the effects of evapoconcentration on water quality in mine pit lakes. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 64, n. 1–3, p. 223–236. doi: 10.1016/S0375-6742(98)00035-1, 1998.

ERICKSON, J. D.; MESSNER, F.; RING, I. **Ecological economics of sustainable watershed management**, Advances in the economics of environmental resources. v. 7. Oxford: Elsevier, 2007.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Soil profile water content determination: Sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. **Vadose Zone J**, p. 894–907, 2006.

FAO. **The state of food and agriculture - Paying farmers for environmental services**. Rome: Food and Agriculture of the United Nations, 2007.

FASIABEN, M. DO C. R.; ANDRADE, D. C.; REYDON, B. P.; GARCIA, J. R.; ROMEIRO, A. R. Estimativa de aporte de recursos para um sistema de Pagamento por Serviços Ambientais na floresta Amazônica Brasileira. **Ambiente & Sociedade**, v. 12, n. 2, p. 223–239. doi: 10.1590/S1414-753X2009000200002, 2009.

FAVARO, A. K. M. DO I. **Pagamento por serviços ambientais: uma contribuição para a saúde ambiental no contexto das mudanças climáticas - estudo de caso: Rio Grande da Serra (SP)**. text, Universidade de São Paulo. Recuperado dezembro 15, 2015, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-10092012-112221/>, 2012, setembro 4.

FELTRIN, R. M. **Processos hidrológicos e balanço hídrico em lisímetros de drenagem em campo e mata nativa**. Doutorado, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

FELTRIN, R. M.; DE PAIVA, J. B. D.; DE PAIVA, E. M. C. D.; BELING, F. A. Lysimeter soil water balance evaluation for an experiment developed in the Southern Brazilian Atlantic Forest region. **Hydrological Processes**. doi: 10.1002/hyp.7971, 2011.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoeletrica e fotovoltaica**. Recife: UFPE, 1995.

FRITSCHEN, L. J.; COX, L.; KINERSON, R. A 28-Meter Douglas-fir in a Weighing Lysimeter. **Forest Science**, v. 19, n. 4, p. 256–261, 1973.

GANGOPADHYAYA, M. **Measurements and estimation of evaporation and evapotranspiration**. p.121. WMO (Technical Note 83), Geneva, 1966.

GAVILÁN, P.; CASTILLO-LLANQUE, F. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 3, p. 465–472. doi: 10.1016/j.agwat.2008.09.011, 2009.

GLEASON, D. J.; ANDALES, A. A.; BAUDER, T. A.; CHÁVEZ, J. L. Performance of atmometers in estimating reference evapotranspiration in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 27–35. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.008, 2013.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada**. São Carlos, 2008.

GOSS, M. J.; EHLERS, W.; UNC, A. The role of lysimeters in the development of our understanding of processes in the vadose zone relevant to contamination of groundwater aquifers. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Studies from the History of Soil Science and Geology., v. 35, n. 15–18, p. 913–926. doi: 10.1016/j.pce.2010.06.004, 2010.

GRAY, N. F. Acid mine drainage composition and the implications for its impact on lotic systems. **Water Research**, v. 32, n. 7, p. 2122–2134. doi: 10.1016/S0043-1354(97)00449-1, 1998.

GUNSON, A. Estimating global water withdrawals due to copper mining. . Santiago: J. Wiertz, 2010.

GUPTA, R. S. **Hydrology and Hydraulic Systems**. 3 edition ed. Long Grove, Ill: Waveland Press, 2008.

HAN, X.; HE, M.; ZHANG, B. 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. doi: 10.1016/S1674-5264(09)60082-X, 2009.

HANNES, M.; WOLLSCHLÄGER, U.; SCHRADER, F.; et al. A comprehensive filtering scheme for high-resolution estimation of the water balance components from high-precision lysimeters. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 19, n. 8, p. 3405–3418. doi: 10.5194/hess-19-3405-2015, 2015.

HEALY, R. W.; WINTER, T. C.; LABAUGH, J. W.; FRANKE, O. L. **Water budgets: Foundations for effective water-resources and environmental management: U.S. Geological Survey Circular 1308**. p.90. Recuperado dezembro 16, 2015, de <http://pubs.usgs.gov/circ/2007/1308/>, 2007.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. 1 edition ed. San Diego, CA: Academic Press, 1998.

HILLEL, D.; BAVEL, VAN C. H. M. Dependence of profile water storage on soil hydraulic properties: A simulation model. **Soil Science Society of America Journal**, , n. 40, p. 807–815, 1976.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M.; MEKONNEN, M. **The water footprint assessment manual**. Earthscan, 2011.

HOUNAM, C. . **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: World Meteorological Organization, 1973.

IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação**. Brasília, 1990.

JACOBI, P. R.; SINISGALLI, P. A. DE A. Governança ambiental e economia verde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1469–1478. doi: 10.1590/S1413-81232012000600011, 2012.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**, Manuals and Reports on Engineering Practice. 70º ed. ASCE, 1990.

JOHNSON, F.; SHARMA, A. A Comparison of Australian Open Water Body Evaporation Trends for Current and Future Climates Estimated from Class A Evaporation Pans and General Circulation Models. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 1, p. 105–121. doi: 10.1175/2009JHM1158.1, 2010.

JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, v. 467, n. 7318, p. 951–954. doi: 10.1038/nature09396, 2010.

KITCHING, R.; SHEARER, T. R. Construction and operation of a large undisturbed lysimeter to measure recharge to the Chalk aquifer, England. **Journal of Hydrology**, v. 58, n. 3, p. 267–277. doi: 10.1016/0022-1694(82)90039-7, 1982.

LANTHALER, C. **Lysimeter stations and soil hydrology measuring sites in Europe—purpose, equipment, research results, future developments**. Tese de Doutorado, Austria: Universitat Graz, 2004.

LEITÃO, M. DE M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. DE; LEITÃO, T. J. V. Evaluation of performance of different methods for estimation of evaporation in two areas of Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 585–593. doi: 10.1590/S1415-43662007000600006, 2007.

LIBARDI. **Dinâmica da água no solo**. EDUSP, 2012.

LINACRE, E. **Climate Data and Resources: A Reference and Guide**. 1 edition ed. London ; New York: Routledge, 1992.

LINACRE, E. T. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, n. 3, p. 237–256. doi: 10.1016/0168-1923(93)90031-C, 1993.

MACHADO, R. E. **Desenvolvimento e utilização de um lisímetro para a determinação da evapotranspiração de referência**. Sao Carlos, 1996.

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 9, n. 1, p. 147–151, 2001.

MAGLIULO, V.; D'ANDRIA, R.; RANA, G. Use of the modified atmometer to estimate reference evapotranspiration in Mediterranean environments. **Agricultural Water Management**, v. 63, n. 1, p. 1–14. doi: 10.1016/S0378-3774(03)00098-2, 2003.

MAIA, A. G.; ROMEIRO, A. R. Validade e confiabilidade do método de custo de viagem: um estudo aplicado ao Parque Nacional da Serra Geral. **Economia Aplicada**, v. 12, n. 1, p. 103–123. doi: 10.1590/S1413-80502008000100005, 2008.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; FILHO, C.; et al. Construction and evaluation of an aspirated thermocouple psychrometer. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 839–844. doi: 10.1590/S0103-90162001000400028, 2001.

MARQUES, J. F.; COMUNE, A. E. Quanto vale o ambiente: interpretações sobre o valor econômico ambiental. . v. 2, p.633–652. Salvador, 1995.

MATTOS, K. M. DA C. **Valoração econômica dos impactos causados pela queima da cana-de-açúcar no meio ambiente**. Dissertação, Sao Carlos - SP: Universidade de São Paulo, 2002.

MAY, P. H. **ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE**. Elsevier. Recuperado dezembro 1, 2015, de <http://www.elsevier.com.br/site/produtos/Detalhe-Produto.aspx?tid=58799&seg=3&cat=276&tit=ECONOMIA%20DO%20MEIO%20AMBIENTE,%202%c2%aa%20EDI%c3%87%c3%83O>, 2010.

MAY, P. H.; NETO, F. C. V.; POZO, O. V. C. **Valoração econômica da biodiversidade estudos de caso no Brasil**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente. Recuperado de http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/valbiod.pdf, 2000.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MEDEIROS, P. V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008.

MEIRELLES, E. M.; TEIXEIRA, J. T.; MEDEIROS FILHO, C. A. Geologia preliminar do depósito de ouro de Serra Pelada. I Simpósio de Geologia da Amazônia. **Anais...** . p.74–80. Belém, 1982.

MENESCAL, R. A.; PERINI, D. A.; WARREN, M. S.; et al. Identificação de reservatórios naturais e artificiais no Brasil. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, , n. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

MENGISTU, M. G.; SAVAGE, M. J. 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.014, 2010.

MILLS, N. L.; PORRAS, I. T. **Silver Bullet or Fools' Gold: A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor**, Instruments for sustainable private sector forestry series. London: International Institute for Environmental and Development. Recuperado dezembro 15, 2015, de <http://pubs.iied.org/9066IIED.html>, 2002.

MITCHELL, V. G.; MCMAHON, T. A.; MEIN, R. G. Components of the Total Water Balance of an Urban Catchment. **Environmental Management**, v. 32, n. 6, p. 735–746. doi: 10.1007/s00267-003-2062-2, 2003.

MMA. **Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica lições aprendidas e desafios**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos o fator meteorológico na produção agrícola**. 1º ed. Brasília-DF: INMET, 2009.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics, Fourth Edition: Plants, Animals, and the Atmosphere**. 4 edition ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2013.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3º ed. Blackwell Publishing, 2005.

MOTTA, R. S. DA. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Brasília-DF: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1998.

MUNASINGHE, M. **Environmental economics and valuation in development decisionmaking**. Washington DC: The World Bank, Sector Policy and Research Staff, Environment Department, 1992.

MUNK, J.; SCHNABEL, W. E.; BARNES, D.; LEE, W. Atmospheric loading effects on free-draining lysimeters. **Water Resources Research**, v. 47, n. 5, p. W05541. doi: 10.1029/2010WR009784, 2011.

NOVION, H. DE; VALLE, R. DO. **É pagando que se preserva? subsídios para políticas de compensação por serviços ambientais**. São Paulo - SP: ISA, 2009.

OLIVEIRA, G. X. S. **Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo**. text, Universidade de São Paulo. Recuperado dezembro 22, 2015, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde-04082009-111344/>, 2009, junho 19.

OLIVEIRA, N. T. DE. **Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros**. . Dissertação, . Recuperado dezembro 20, 2011, de <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11340>, 2006.

OLIVEIRA, P. T. S. DE. **Water balance and soil erosion in the Brazilian Cerrado**. Doutorado, Universidade de São Paulo, 2014.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

ONISHI, C. M.; VAZOLLER, R. F.; REYDON, B. P. Revista DAE - Artigos - Edição - 192. **Revista DAE**, , n. 192, p. 6–19, 2013.

ONU. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. p.300. Oslo, 1987.

ONU. United Nations Millennium Declaration. , p. 9, 2000.

ORTIZ, R. A.; MOTTA, R. S. DA; FERRAZ, C. A estimacão do valor ambiental do Parque Nacional do Iguaçu através do método de custo de viagem. **Pesquisa e planejamento econômico**, v. 30, p. 355–382, 2000.

PACIULLO, D. S. C.; CAMPOS, N. R.; GOMIDE, C. A. M.; et al. Growth of signalgrass influenced by shading levels and season of the year. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 7, p. 917–923. doi: 10.1590/S0100-204X2008000700017, 2008.

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo - SP: Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, 2013.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. DE; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília-DF. Recuperado dezembro 15, 2015, de <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/5848915/livro-sobre-servicos-ambientais-traz-conceitos-e-cases>, 2015.

PENMAN, H. L. 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, 1948.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas-SP: Fundag, 2013.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, Agricultural Water Management: Priorities and Challenges., v. 147, p. 4–20. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031, 2015.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n. 3, p. 141–150. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00080-5, 1999.

PERUCHI, F. Evapotranspiração real a partir de medidas lisimétricas e sob diferentes condições de disponibilidade hídrica. . Dissertação de Mestrado, . Recuperado dezembro 20, 2011, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-12112009-152605/pt-br.php>, 2009.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. 1º ed. Porto Alegre - RS: ABRH, 2011.

PORTO, R. L.; PORTO, M. F. A.; PALERMO, M. A ressurreição do volume morto do Sistema Cantareira na Quaresma. **Revista DAE**, , n. 197, p. 18–25. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.131>, 2014.

PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. DE. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2010.

PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. , p. 13–15, 1960.

QUAGLIA, L. **Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal**. text, Universidade de São Paulo. Recuperado abril 28, 2016, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde-24052005-145355/>, 2005, abril 14.

REBOUÇAS, A. DA C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil - Capital ecológico uso e conservação**. São Paulo - SP, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera conceitos, processos e aplicações**. 2º ed. Manole, 2012.

RIVAS, A.; CASEY, J. F.; KAHN, J. R. A preservação ambiental é um bem de luxo? Um estudo sobre o valor de ecossistemas de várzea na Amazônia. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 0, n. 29. Recuperado dezembro 14, 2015, de <http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/42>, 2009.

ROMEIRO, A. R. **Avaliação e contabilização de impactos ambientais**. Campinas-SP: Unicamp, 2004.

ROMERO, C. **Economía de los recursos ambientales y naturales**. 2º ed. Madrid: Alianza, 1997.

RUI FERREIRA DOS SANTOS; VIVIAN, J. L. V. **Pagamentos por serviços ecossistêmicos em perspectiva comparada: recomendações para tomada de decisão.** Brasília: Projeto Apoio aos Diálogos Setoriais UE-Brasil, 2012.

SALOMONS, W. Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. **Journal of Geochemical Exploration**, Heavy Metal Aspects of Mining Pollution and Its Remediation., v. 52, n. 1–2, p. 5–23. doi: 10.1016/0375-6742(94)00039-E, 1995.

SANTIAGO, A. V. **Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal.** Dissertação de Mestrado, Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 2001.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C.; YANG, H.; SRINIVASAN, R.; ZEHNDER, A. J. . Modeling blue and green water availability in Africa. **Water Resour. Res**, v. 44, p. 1–18, 2008.

SCHWINGEL, F.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Comparação de medidas de evaporação do tanque Classe A com parafuso micrométrico e com sistema automático. *Água e Agrometeorologia no Novo Milênio. Anais...* . Fortaleza - CE, 2001.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. , v. 4, n. 1, 1996.

SENTELHAS, P. . **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 1998.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A. L. C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, p. 71–77, 2003.

SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 1996, maio.

SILVA, M. H. DA. **Modelo de procedimentos para elaboração de metodologia de valoração econômica de impactos ambientais em bacia hidrográfica Estudo de caso - Guarapiranga - aplicação da função dose-resposta.** São Paulo - SP: Universidade de São Paulo, 2008.

VON SPERLING, E.; JARIDIM, F. A.; GRANDCHAMP, C. A. P. Water quality during the filling of deep mining lakes: case study of Aguas Claras pit lake - MG. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 250–259. doi: 10.1590/S1413-41522004000300011, 2004.

STUMPP, C.; STICHLER, W.; MALOSZEWSKI, P. Application of the environmental isotope $\delta^{18}\text{O}$ to study water flow in unsaturated soils planted with different crops: Case study of a weighable lysimeter from the research field in Neuherberg, Germany. **Journal of Hydrology**, v. 368, n. 1–4, p. 68–78. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.01.027, 2009.

TANNER, C. B. L. Radiant Energy Utilized in Evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 54, n. 3, p. 207. doi: 10.2134/agronj1962.00021962005400030008x, 1962.

TAVARES, V. E. Q.; RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. L. Valoração monetária de bens e serviços ambientais: revisão do estado da arte sob a ótica da gestão das águas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, p. 97–116, 1999.

THORNTHWAITE, C. .; MATHER, J. . The water balance. , p. 104, 1955.

TITO, M. R.; ORTIZ, R. A. **Projeto apoio aos diálogos setoriais EU-Brasil. Pagamentos por serviços ambientais: desafios para estimular a demanda**. Brasília: MMA, 2013.

TOSETTI, L. L. T. **Valoração arbórea em bacia hidrográfica urbana**. Dissertação, Piracicaba - SP: Universidade de São Paulo, 2012.

VENKATACHALAM, L. The contingent valuation method: a review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 24, n. 1, p. 89–124. doi: 10.1016/S0195-9255(03)00138-0, 2004.

VIANA, S. M.; TOSETTI, L. L.; ROLLO, L. C. P.; FILHO, D. F. DA S. Valoração monetária: pesquisas em floresta urbana. **Revista Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 7, p. 76–88, 2012.

VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B. Evapopluviômetro: Novo sistema de medida da evaporação em tanque Classe A. **Irriga**, v. 10, p. 76–81, 2005.

VIVIAN, J. L. V.; SANTOS, R. F. DOS S. **Experiências Brasileiras de Pagamentos de serviços ambientais em perspectiva comparada às Estratégias Internacionais**, Diálogo Setorial. Brasília: Projeto Apoio aos Diálogos Setoriais UE-Brasil, 2012.

WANG, E.; YU, Q.; WU, D.; XIA, J. Climate, agricultural production and hydrological balance in the North China Plain. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 14, p. 1959–1970. doi: 10.1002/joc.1677, 2008.

WANG, J.; BRAS, R. L. A model of evapotranspiration based on the theory of maximum entropy production. **Water Resources Research**, v. 47, p. 10 PP. doi: 201110.1029/2010WR009392, 2011.

WANG, K.; DICKINSON, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. **Reviews of Geophysics**, v. 50, n. 2, p. RG2005. doi: 10.1029/2011RG000373, 2012.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005. doi: 10.1029/JC090iC05p08995, 1985.

WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; et al. The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 9, p. 655–662. doi: 10.1038/nclimate1556, 2012.

WUNDER, S. **Payments for environmental services: some nuts and bolts**. Recuperado dezembro 15, 2015, de <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/19193>, 2005.

WUNDER, S.; BORNER, J.; TITO, M. R.; PEREIRA, L. **Pagamentos por serviços ambientais perspectivas para a Amazônia legal**, Estudos. Brasília-DF, 2009.

YOKO, S.; AXLER, R.; MCDONALD, M.; WILCOX, D. Recovery of a mine pit lake from aquacultural phosphorus enrichment: model predictions and mechanisms. **Ecological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 195–218. doi: 10.1016/S0925-8574(97)00010-4, 1997.

YOULTON, C. **Quantificação experimental da alteração no balanço hídrico e erosão em um neossolo quartzarênico devido à substituição de pastagem por cana-de-açúcar**. text, Universidade de São Paulo. Recuperado dezembro 16, 2015, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-08112013-103401/>, 2013, julho 24.

YOUNGER, P. L.; WOLKERSDORFER, C. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. **Mine Water and the Environment**, v. 23, n. 1, p. s2–s80. doi: 10.1007/s10230-004-0028-0, 2004.

ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; et al. Vegetation Greening and Climate Change Promote Multidecadal Rises of Global Land Evapotranspiration. **Scientific Reports**, v. 5, p. 15956. doi: 10.1038/srep15956, 2015.

8 APÊNDICES

8.1 Detalhes dos lisímetros, tanque de evaporação e montagem.

A abertura da vala na Estação Climatológica do CRHEA para instalação dos lisímetros, tanque de evaporação e abrigo subterrâneo foi a primeira etapa a ser realizada e após a sua concretização deu-se início aos trabalhos de implantação das fundações em seguida a confecção das paredes de alvenaria do abrigo e na sequência a instalação do telhado sobre o abrigo subterrâneo (Figura 8-1 e Figura 8-2). A colocação das caixas principais na vala ocorreu após o adensamento da região de contato com a área da base das caixas e disposição de uma camada de areia grossa sobre essa região (Figura 8-3).

Figura 8-1 Início das escavações e abertura da vala

Figura 8-2 Construção do abrigo subterrâneo e montagem do telhado

Figura 8-3 Preparação da base e colocação das caixas principais dos lisímetros e tanque de evaporação

Após a disposição das caixas principais no local adequado foi preenchido os vazios entre as caixas e o abrigo subterrâneo além de coberto com grama batatais as superfícies dos lisímetros e as regiões circunvizinhas (Figura 8-4).

Figura 8-4 Preenchimento dos espaços entre as caixas principais e a parede do abrigo subterrâneo e revestimento com grama batatais

8.2 TABELAS COM DADOS UTILIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS GRÁFICOS

Tabela 8-1 Dados para construção do gráfico de variação da cobertura de grama batatais na superfície dos lisímetros referente à Figura 5-12

Data	lis-arg	lis-aren	Data	lis-arg	lis-aren
nov/10	52	70	abr/13	70	78
dez/10	65	90	mai/13	59	75
jan/11	61	73	jun/13	58	53
fev/11	41	76	jul/13	45	50
mar/11	45	88	ago/13	35	45
abr/11	52	80	set/13	30	31
mai/11	42	78	out/13	68	70
jun/11	30	57	nov/13	82	80
jul/11	25	43	dez/13	82	80
ago/11	26	40	jan/14	66	73
set/11	24	51	fev/14	61	73
out/11	17	66	mar/14	70	75
nov/11	14	80	abr/14	44	78
dez/11	88	87	mai/14	44	60
jan/12	93	90	jun/14	43	68
fev/12	85	67	jul/14	35	49
mar/12	97	87	ago/14	31	42
abr/12	96	99	set/14	31	44
mai/12	98	98	out/14	44	62
jun/12	93	95	nov/14	66	48
jul/12	74	78	dez/14	90	87
ago/12	43	60	jan/15	94	97
set/12	37	55	fev/15	83	79
out/12	82	91	mar/15	89	92
nov/12	80	83	abr/15	92	96
dez/12	88	96	mai/15	90	96
jan/13	89	90	jun/15	79	85
fev/13	88	90	jul/15	64	82
mar/13	74	72			

Tabela 8-2 Dados para construção do gráfico de correlação linear entre a temperatura média diária do ar e a irradiância solar global na estação climatológica do CRHEA referente à Figura 5-20 e Figura 5-29

Mês	n/N	Tmed (°C)	R _s (MJ/m²/dia)	U ₂ (m/s)	URmed (%)
nov/10	0,57	23,0	21,87	1,28	72
dez/10	0,53	24,2	21,52	1,35	78
jan/11	0,48	24,1	20,33	0,68	80
fev/11	0,55	24,2	20,70	0,68	78
mar/11	0,29	22,4	13,94	1,21	84
abr/11	0,60	22,7	16,43	0,83	80
mai/11	0,77	19,0	15,90	1,08	77
jun/11	0,78	16,9	14,45	0,72	76
jul/11	0,75	19,3	14,76	0,79	69
ago/11	0,68	20,3	16,26	1,19	67
set/11	0,80	21,8	21,36	1,37	63
out/11	0,52	22,3	19,37	1,43	73
nov/11	0,62	23,0	22,88	1,30	73
dez/11	0,64	24,3	23,79	1,12	71
jan/12	0,41	23,0	18,96	0,92	76
fev/12	0,64	25,7	22,50	0,72	73
mar/12	0,64	24,1	20,16	0,81	70
abr/12	0,61	23,5	16,64	0,79	80
mai/12	0,70	19,8	15,03	0,96	81
jun/12	0,51	19,2	11,45	0,63	83
jul/12	0,79	18,4	15,28	0,81	74
ago/12	0,89	21,7	19,29	1,23	60
set/12	0,73	22,3	20,38	1,28	59
out/12	0,64	25,1	21,63	1,18	65
nov/12	0,61	25,8	22,62	1,38	69
dez/12	0,48	26,4	20,60	1,92	76
jan/13	0,45	24,5	19,68	1,36	77
fev/13	0,49	24,6	19,41	0,77	76
mar/13	0,49	23,8	17,54	0,98	78
abr/13	0,65	22,2	17,03	0,75	77
mai/13	0,62	20,2	14,10	0,78	77
jun/13	0,45	19,5	10,80	0,58	82
jul/13	0,70	18,2	14,10	1,03	76
ago/13	0,77	19,9	17,47	1,26	63
set/13	0,65	22,2	18,96	1,31	63
out/13	0,57	23,0	20,31	1,56	69
nov/13	0,49	24,0	20,18	1,39	73
dez/13	0,51	25,2	21,15	1,07	75
jan/14	0,74	26,8	25,66	0,77	66
fev/14	0,64	27,0	22,53	0,98	63
mar/14	0,62	25,3	19,83	0,87	75
abr/14	0,69	23,5	17,83	0,83	75

Tabela 8 2 (continuação) Dados para construção do gráfico de correlação linear entre a temperatura média diária do ar e a irradiância solar global na estação climatológica do CRHEA referente à Figura 5.22

Mês	n/N	Tmed (°C)	Rs (MJ/m²/dia)	U ₂ (m/s)	URmed (%)
mai/14	0,62	21,3	14,09	0,84	74
jun/14	0,73	19,8	13,83	0,85	73
jul/14	0,65	18,5	13,49	0,94	72
ago/14	0,81	20,8	18,03	1,18	61
set/14	0,65	23,7	18,97	1,30	61
out/14	0,76	25,0	23,86	1,62	54
nov/14	0,38	24,5	18,03	1,16	71
dez/14	0,47	24,8	20,33	1,17	74
jan/15	0,56	27,0	21,96	0,86	69
fev/15	0,54	25,0	20,57	0,72	79
mar/15	0,43	24,3	16,44	0,60	83
abr/15	0,70	23,6	17,94	0,89	78
mai/15	0,55	20,1	13,19	0,74	81
jun/15	0,74	19,6	13,88	0,90	78
jul/15	0,55	19,7	12,52	0,81	81
ago/15	0,84	21,1	18,43	1,11	64

Tabela 8-3 Dados para construção do gráfico de irrigação subsuperficial nos lisímetros durante os dias e as noites referente à Figura 5-24.

	Lis-Arg NOITE (mm/12horas)	Lis-Arg DIA (mm/12horas)	Lis-Aren NOITE (mm/12horas)	Lis-Aren DIA (mm/12horas)
04/02/2014	1,26	0,00	1,46	0,36
05/02/2014	1,49	0,02	1,42	0,32
06/02/2014	1,72	0,00	1,50	0,47
07/02/2014	1,80	0,24	1,60	0,58
08/02/2014	1,84	0,10	1,61	0,25
09/02/2014	1,13	0,00	1,40	0,35
10/02/2014	1,06	0,00	1,40	0,55
11/02/2014	1,05	0,00	1,45	0,58
12/02/2014	1,18	0,14	1,52	0,14
15/10/2014	1,41	0,00	1,61	0,46
16/10/2014	1,55	0,00	1,61	0,00
17/10/2014	1,67	0,00	1,71	0,57
18/10/2014	1,55	0,00	1,35	0,36
19/10/2014	1,61	0,00	1,45	0,59
20/10/2014	1,77	0,31	1,56	0,27
21/10/2014	1,15	0,00	0,94	0,12
22/10/2014	1,29	0,00	1,12	0,49
23/10/2014	1,55	0,14	1,26	0,57
24/10/2014	0,79	0,00	1,00	0,00
25/10/2014	0,55	0,00	0,68	0,00
13/01/2015	0,26	0,00	0,76	0,40
14/01/2015	0,55	0,00	1,27	0,55
15/01/2015	0,37	0,00	0,90	0,61
16/01/2015	1,38	0,18	1,46	1,40
17/01/2015	1,88	0,54	1,43	1,85
18/01/2015	2,13	0,65	1,62	1,98
19/01/2015	2,21	0,66	1,80	2,49
20/01/2015	2,33	0,99	1,70	2,67
21/01/2015	2,11	0,61	1,40	0,90

Tabela 8-4 Dados para construção do gráfico de evaporação, chuva e insolação observados no tanque com nível referente à Figura 5-28

Mês	Tenc (mm/mês)	Chuva (mm/mês)	Insolação (horas/mês)	20 m² (mm/mês)	Mês	Tenc	Chuva	Insolação	Tanque 20 m²
nov/10	128,3	142,2	218	155,2	abr/13	97,1	95,5	214	113,9
dez/10	144,5	234,8	212	152,7	mai/13	86,9	155,2	202	87,5
jan/11	102,6	573,8	190	120,0	jun/13	49,7	71,6	140	55,3
fev/11	93,6	208,4	190	130,5	jul/13	75,8	13,1	226	78,6
mar/11	79,0	282,5	104	85,3	ago/13	116,1	2,2	260	106,0
abr/11	87,6	163,6	199	100,7	set/13	116,1	70,2	225	113,0
mai/11	101,5	4,8	253	96,7	out/13	132,3	167,9	216	135,6
jun/11	84,7	48,3	241	78,9	nov/13	115,6	199,2	187	128,9
jul/11	90,5	0,3	244	78,3	dez/13	126,9	129,2	204	140,3
ago/11	115,3	55,8	229	112,0	jan/14	173,2	105,6	294	184,2
set/11	141,5	0,4	276	152,6	fev/14	144,2	166,5	222	155,4
out/11	122,4	150,4	198	125,5	mar/14	120,6	148,6	226	137,1
nov/11	139,4	119,1	238	140,6	abr/14	104,9	56,4	230	117,0
dez/11	138,8	316,5	256	151,7	mai/14	89,7	61,5	204	91,8
jan/12	97,7	345,5	164	117,1	jun/14	81,8	1,5	224	77,8
fev/12	119,0	152,9	230	139,3	jul/14	72,6	24,4	209	87,5
mar/12	128,7	61,9	234	148,6	ago/14	118,0	6,1	273	113,2
abr/12	101,0	166,4	203	102,1	set/14	126,4	84,7	226	144,4
mai/12	84,1	75,5	231	77,3	out/14	176,8	38,8	289	196,4
jun/12	58,0	166,4	159	56,0	nov/14	136,2	165,5	146	132,6
jul/12	83,4	23,4	257	76,8	dez/14	120,4	252,4	188	144,3
ago/12	126,4	0,0	302	127,2	jan/15	143,4	147,1	222	186,2
set/12	115,7	95,3	254	137,1	fev/15	93,7	228,4	188	158,7
out/12	108,2	128,5	242	135,4	mar/15	92,7	204,1	155	108,1
nov/12	124,9	77,9	232	151,1	abr/15	103,2	61,9	232	112,4
dez/12	116,8	295,3	194	141,6	mai/15	64,8	108,6	180	82,5
jan/13	99,3	286,3	178	123,0	jun/15	81,7	4,8	229	76,5
fev/13	67,2	162,2	168	110,8	jul/15	67,2	48,5	179	71,6
mar/13	95,0	134,2	178	114,4					