

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO

Evapotranspiração real pelo método do balanço de energia - razão de Bowen em área de pastagem na região metropolitana do Rio de Janeiro

Suelen da Costa Faria Martins

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO MÉTODO DO BALANÇO DE
ENERGIA - RAZÃO DE BOWEN EM ÁREA DE PASTAGEM NA
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

SUELEN DA COSTA FARIA MARTINS

Sob a Orientação do Professor

Gustavo Bastos Lyra

e Coorientação do Professor

Leonardo Duarte Batista da Silva

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ
Março de 2019.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379e Martins, Suelen da Costa Faria, 1990-
Evapotranspiração real pelo método do balanço de
energia - razão de Bowen em área de pastagem na
região metropolitana do Rio de Janeiro / Suelen da
Costa Faria Martins. - Seropédica, 2019.
63 f.: il.

Orientador: Gustavo Bastos Lyra.
Coorientador: Leonardo Duarte Batista da Silva.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental, 2019.

1. Fluxos de energia. 2. FAO-56. 3. Sazonalidade.
4. Pastagem. 5. Micrometeorologia. I. Lyra, Gustavo
Bastos, 1975-, orient. II. Silva, Leonardo Duarte
Batista da, 1971-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

SUELEN DA COSTA FARIA MARTINS

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências,
no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de concentração em
Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/03/2019.


Gustavo Bastos Lyra. Dr. UFRRJ
(Orientador)


Luis Marcelo de Mattos Zeri. Dr. CEMADEN


Marcel Carvalho Abreu. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

A Deus, aos meus pais, à minha irmã e ao meu esposo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por ter conseguido chegar até aqui.

Aos meus pais, Isabel Cristina e José Carlos, à minha irmã, Rosária Martins e ao meu esposo, Olímpio dos Anjos, por todo amor, paciência, ajuda, confiança e por sempre estarem perto de mim. Amo muito vocês, obrigada por tudo!

A toda minha família de modo geral, por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador Gustavo Lyra, por todo aprendizado, paciência e amizade, sempre disposto a ajudar nos momentos em que precisei. Admiro muito o conhecimento que tem e sua vontade de sempre buscar novas pesquisas e descobertas.

Ao meu coorientador, Leonardo Duarte, por todo aprendizado e apoio, e também por me sugerir que eu entrasse neste projeto na REGUA. Sou muito grata até hoje por esta sugestão!

Aos meus amigos e colegas de longa data, e também aos que conheci no PGEAAmb, na UFRRJ e na UFF de maneira geral, que contribuíram diretamente ou indiretamente nesta minha caminhada do mestrado, em especial à Mariane Pessanha e à Cátia Azevedo pela parceria. E ao secretário do programa, Thiago, por ser muito solícito sempre que necessitamos.

Aos professores do DCA/IF/UFRRJ envolvidos neste projeto, do PGEAAmb e das disciplinas cursadas, por todo conhecimento transmitido.

Aos membros da banca de minha qualificação e da defesa desta dissertação, por contribuírem significativamente para este estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – UFRRJ e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade de cursar o mestrado e de dar mais um grande passo na minha vida acadêmica.

À Reserva Ecológica de Guapiaçu – REGUA e em especial ao Nicholas Locke e à Raquel Locke, por ceder parte de seu espaço e viabilizar toda a estrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos aqueles que estiveram envolvidos neste trabalho de alguma forma ou no meu período de mestrado, muito obrigada!

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

RESUMO

MARTINS, S. C. F. **Evapotranspiração real pelo método do balanço de energia - Razão de Bowen em área de pastagem na região metropolitana do Rio de Janeiro.** 2019. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

A evapotranspiração (ET) é o processo da evaporação de água do solo e de superfícies de água livre mais a transpiração da superfície vegetada. A estimativa de ET é de extrema importância para diversas práticas agrícolas, como para o adequado manejo da irrigação. Existem alguns tipos de evapotranspiração (referência, cultura, real, entre outras), e para o presente estudo, foi avaliada a evapotranspiração real (ETR) de uma superfície cultivada por pastagem. Na estimativa de ETR, consideram-se as condições reais do sistema solo-planta-atmosfera, como se a planta se encontra em condição de estresse ou não. ETR foi estimada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (BERB). Este pode ser aplicado em diversos tipos de superfícies, como em corpos hídricos e evapotranspiração de florestas, pastagens e culturas agrícolas. Também foi estimada a evapotranspiração de referência (ET_o) por Penman-Monteith (PM), parametrizada no boletim da *Food and Agriculture Organization* No 56 (FAO56). ET_o por PM-FAO-56 pode ser aplicada para diversos tipos de vegetação e o método possui simples aplicação. Os principais objetivos do estudo foram estimar e avaliar a variação de ETR de uma área de pastagem pelo BERB e a relação entre ETR e ET_o , além de avaliar as partições dos fluxos de energia. O trabalho foi desenvolvido em uma área experimental na Reserva Ecológica de Guapiaçu (22° 27' 49" S; 42° 45' 56" W, 21 m), localizada em Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro. Para a utilização de tais métodos, foi instalado um mastro micrometeorológico na área, onde foram realizadas medidas do perfil de temperatura e umidade do ar em três níveis acima da superfície (1,15, 1,58 e 2,33 m), do perfil da velocidade do vento em quatro níveis (1,23, 1,68, 2,34 e 3,00 m) acima da superfície e do balanço de radiação (R_n) (1,5 m acima do dossel). Além disso, foram realizadas medidas do fluxo de calor no solo (G) (0,05 m de profundidade). Os instrumentos utilizados para tais medidas foram conectados a um *datalogger*, que realizou as coletas e o armazenamento dos dados a cada 10 min. Nas estimativas pelo BERB foram utilizadas médias de 30 min dos elementos micrometeorológicos. O método BERB produz erros devido às simplificações feitas para a aplicação do mesmo, e para o nível 2-3 verificou-se alta frequência do erro gerado por baixos gradientes de temperatura e umidade do ar. Assim, esse nível foi desconsiderado em outras análises. Foram realizadas análises das partições dos fluxos de energia (calor latente ou sensível) em relação à energia disponível ($R_n - G$), que alcançaram altos coeficientes de determinação (r^2 de até 0,9947 para o fluxo de calor latente e 0,9832 para o de calor sensível). Verificou-se o fechamento do balanço de energia e, ademais, confirmou-se que as medidas necessárias ao método de BERB foram realizadas dentro da camada limite interna. Concluiu-se que a partição do fluxo de calor latente apresentou aumento na primavera e no verão, assim como ETR e ET_o , época do ano em que há maior disponibilidade de água e energia solar no ambiente.

Palavras-chave: fluxos de energia, FAO-56, sazonalidade

ABSTRACT

MARTINS, S. C. F. **Actual evapotranspiration by the Bowen Ratio - energy balance method in a pasture area in the metropolitan region of Rio de Janeiro.** 2019. 63f. Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

Evapotranspiration (ET) is the process of soil water evaporation added to the vegetation transpiration. ET estimation is extremely important in various agricultural practices, such as for having a suitable irrigation management. There are some types of evapotranspiration (reference, crop, actual ET and so on), and for the current study, the actual evapotranspiration (ET_a) for a surface which was covered by pasture was chosen to work with, due to the fact that in the ET_a it is taken into consideration the real conditions of the soil-plant-atmosphere system, whether the plant is under stress or not, for instance. ET_a was estimated by the Bowen ratio - energy balance (BREB) method. It may be applied for different types of surfaces, such as lakes, lagoons and in forest, pasture and crop evapotranspiration. The reference evapotranspiration (ET_o) was also estimated, using the method by Penman-Monteith (PM), the standardized method by the Food and Agriculture Organization No 56 bulletin (FAO56). ET_o by PM-FAO-56 may also be applied to different types of vegetation and it has simple application. The main objectives of this study were to estimate and to evaluate the actual evapotranspiration variation of a pasture area by the Bowen Ratio method and the relation between ET_a and ET_o estimated by Penman-Monteith, and to evaluate the energy fluxes estimated through the energy balance. The work was developed in an experimental area in “Reserva Ecológica de Guapiaçu” (22° 27' 49" S; 2° 45' 56" W, 21 m), located in Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro. To make use of these methods, a micrometeorological mast was installed in the area, where measures of temperature and relative humidity profiles were made in three different high levels on the surface (1.15, 1.58 and 2.33 m), wind speed profile in four different levels (1.23, 1.68, 2.34 and 3.00 m) on the surface and measures of the net radiation (1.5 m above the crop), too. Moreover, soil heat flux measures were made (depth of 0.05 m). The instruments used for these measures were connected to a datalogger, which collected and recorded the data. In the estimations by the BREB, the averages of the micrometeorological elements at each 30 minutes were used. The Bowen Ratio method generates errors due to the simplifications made to apply it, and in the level 2-3 it was verified high frequency of the error generated by the lack of temperature and relative humidity gradient, not being considered in other analyses. Energy fluxes partitions analyses were made and high valued determination coefficients were found (r^2 equal to 0.9947 to the latent heat flux and 0.9832 to the sensible heat). The energy balance closing was verified and besides that, it was confirmed that the needed measures to apply the BREB method were made inside the inner boundary layer. It was concluded that the latent heat flux increased in spring and in the summer, as well as the actual evapotranspiration and the reference evapotranspiration, periods of the year when the water and solar energy availabilities are higher in the environment.

Key-words: energy fluxes, FAO-56, seasonality

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição morfológica da análise do perfil do solo da área de estudo.	10
Tabela 2. Análise granulométrica.	11
Tabela 3. Condições para que o método da razão de Bowen forneça dados consistentes. R_n é o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo, Δe o gradiente de pressão de vapor, β é a razão de Bowen, LE o fluxo de calor latente e H o fluxo de calor sensível (adaptado de Perez et al., 1999).	17
Tabela 4. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 1-2.	22
Tabela 5. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 1-3.	23
Tabela 6. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 2-3.	23
Tabela 7. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da manhã (6 às 12 h).	24
Tabela 8. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da tarde (12 às 18 h).	25
Tabela 9. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da noite (18 às 24 h).	26
Tabela 10. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da madrugada (0h às 6h).	27
Tabela 11. Relação fluxo de calor latente x Energia disponível [$LE/(R_n-G)$], relação fluxo de calor sensível x Energia disponível [$H/(R_n-G)$] e seus respectivos coeficientes de determinação (r^2), de acordo com o mês e nível estudados.	29
Tabela 12. Diferença relativa (DR) entre níveis, nas partições de LE e H em relação à energia disponível (R_n-G).	33
Tabela 13. Valores médios da evapotranspiração real ($mm\ d^{-1}$) para cada mês avaliado, estimada pelo método da Razão de Bowen para os dois níveis estudados, da evapotranspiração de referência ($mm\ d^{-1}$) pelo método de Penman-Monteith e seus respectivos valores de desvio padrão (valores entre parêntesis) e coeficiente de variação (CV).	36
Tabela 14. Valores da evapotranspiração real acumulada mensal (mm) estimada pelo método da Razão de Bowen para os dois níveis estudados, da evapotranspiração de referência	

acumulada mensal (mm) pelo método de Penman-Monteith e da precipitação acumulada (Chuva, mm), número de dias com chuva e a magnitude (chuva acumulada/número de dias com chuva, mm d⁻¹). 36

Tabela 15. Razão evapotranspiração real/ evapotranspiração de referência ($K_s \times K_c$) para os dois níveis avaliados no BERB. 38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental, localizada na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), estado do Rio de Janeiro.	9
Figura 2. Coleta de amostras indeformadas de solo na área experimental para realização das análises físico-hídricas do solo.	10
Figura 3. Perfil do solo da área de estudo.	11
Figura 4. Mastro micrometeorológico com os seguintes instrumentos instalados: saldo radiômetro, anemômetros sônicos, termohigrômetros, painel solar e caixa ambiental com <i>datalogger</i>	12
Figura 5. Saldo Radiômetro sobre do dossel da vegetação.	12
Figura 6. Termohigrômetro (a) e anemômetro (b).	13
Figura 7. Placa de fluxo de calor no solo, instalada a aproximadamente 0,05 m de profundidade.	13
Figura 8. Reflectômetros de conteúdo de água, instalados a 0,10 m, 0,30 m e 0,60 m de profundidade.	14
Figura 9. Gráficos representando o fechamento do balanço de energia para os níveis 1-2 (a) e 1-3 (b), em que se tem os fluxos de energia ($LE + H$) <i>versus</i> a energia disponível ($R_n - G$). ..	28
Figura 10. Representação gráfica da relação fluxo de calor latente x Energia disponível [$LE/(R_n - G)$] e da relação fluxo de calor sensível <i>versus</i> energia disponível [$H/(R_n - G)$], nos meses de junho a dezembro, numerados de 1 a 7, respectivamente, para os níveis 1-2 (a) e 1-3 (b).	32
Figura 11. Componentes do balanço de energia, nos dias 15 de julho (a) e 15 de outubro (b).	34
Figura 12. Evapotranspiração real da pastagem, para os níveis 1-2 (ETR12) e 1-3 (ETR13), em relação ao dia de ordem do ano.	34
Figura 13. Evapotranspiração real para os níveis 1-2 (ETR12) e 1-3 (ETR13), evapotranspiração de referência (ET_o) e a precipitação, em relação ao dia de ordem do ano.	35
Figura 14. Evapotranspiração real (ETR), evapotranspiração de referência (ET_o) e magnitude em escala mensal.	37
Figura 15. Variação mensal da relação entre evapotranspiração real e de referência para os dois níveis de medida considerados (1-2 e 1-3).	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Pastagem – Gênero <i>Brachiaria</i> (<i>Brachiaria spp.</i>)	3
2.2	Balanço de Energia – Razão de Bowen	3
2.2.1	Características do BERB	5
2.3	Evapotranspiração - ET	5
2.3.1	Evapotranspiração de referência – ET _o	6
2.3.2	Evapotranspiração da cultura - ET _c	8
2.3.3	Evapotranspiração real – ETR	8
3	MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1	Área de Estudo	9
3.2	Propriedades Físico-Hídricas do Solo	10
3.3	Medidas Micrometeorológicas	11
3.4	Balanço de Energia - Razão de Bowen	14
3.4.1	Critérios de seleção das observações - BERB	16
3.5	Evapotranspiração Pelo Método de Penman-Monteith – FAO56	17
3.6	Análise Estatística	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1	Seleção de Dados	22
4.2	Componentes do Balanço de Energia – Razão de Bowen	28
4.3	Evapotranspiração Real pelo BERB e Evapotranspiração de Referência por Penman-Monteith	34
5	CONCLUSÕES	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
7	ANEXOS	45

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui extensas áreas de pastagem, e estas apresentam importância econômica para o País, pois são a principal fonte de alimento para diversas espécies de animais, e assim, viabilizam a competitividade na produção de carne e leite com outros países (RIBEIRO et al., 2016). Dada tamanha importância, é necessário conhecer os fatores ambientais, as características ecológicas e fenológicas das plantas e suas interações com o meio (CRUZ, 2010). Além disso, se a pastagem for cultivada com o manejo adequado, pode-se ter aumento em sua produtividade.

Uma prática de manejo em pastagens, que tem se tornado comum e, apresentou crescimento na década de 90 para este tipo de vegetação, é a irrigação. Porém, se for realizada sem o manejo adequado ou de maneira incorreta, pode trazer prejuízos à pastagem, como estresse hídrico, por falta ou excesso de água para as plantas, lixiviação dos nutrientes e compactação do solo (SILVA, 2003), além de onerar os custos do produtor.

Para o adequado manejo da irrigação de qualquer cultura, é essencial que se determine a evapotranspiração (ET). Este processo pode ser descrito como a ocorrência simultânea da evaporação de água do solo e de superfícies livres e da transpiração da planta e, pode ser determinado por métodos diretos e indiretos. Entre os métodos diretos de determinação da ET, destacam-se os diversos tipos de lisímetro, e por métodos indiretos, micrometeorológicos (correlação de vórtices turbulentos, balanço de energia - razão de Bowen, aerodinâmico), métodos baseados no balanço de água do solo (e.g. Thornthwaite e Mather) e modelos matemáticos (e.g. Penman-Monteith).

Dentre os métodos possíveis de se estimar a evapotranspiração, o balanço de energia – razão de Bowen (BERB) vem sendo utilizado com frequência para a determinação de ET (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). O BERB permite também avaliar as trocas de energia de uma superfície vegetada, caracterizar o microclima e os impactos nele resultantes de mudanças no uso e ocupação da Terra, de práticas agrícolas e do crescimento e desenvolvimento da cultura (SANTOS, 2010).

Conhecer as trocas de energia entre a superfície e a atmosfera também possibilita identificar interações entre as variáveis ambientais e a vegetação do local, identificar variações do tempo e do clima da região e auxiliam na identificação de efeitos de atividades antrópicas, como o desmatamento e queimadas (BIUDES et al., 2009).

O BERB depende basicamente das medidas da temperatura do ar e da pressão atual de vapor d'água do ar, em pelo menos dois níveis acima da superfície (SANTOS, 2010). Por meio da razão de Bowen, do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo, ainda se pode determinar os fluxos de calor latente e sensível. Destaca-se em relação a outros métodos micrometeorológicos, como o de correlação de vórtices turbulentos, pois apresenta algumas vantagens, entre elas a sua simplicidade e praticidade de implementação, e seu menor custo (SILVA et al., 2016).

Outro método de aplicação simples, porém para estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) é o de Penman-Monteith, parametrizado pelo boletim FAO-56 (ALLEN et al, 1998). Depende de algumas variáveis meteorológicas, como saldo de radiação, velocidade do vento a 2 m de altura, temperatura e umidade relativa do ar. Largamente utilizado em diversos estudos com finalidades distintas e para inúmeras espécies vegetadas. Como também é um método de estimativa, possui a vantagem de não alterar as características físicas do meio estudado.

Além desses motivos apresentados em relação aos métodos, o que fez com que os mesmos fossem escolhidos para a estimativa da evapotranspiração neste trabalho, estudos deste tipo realizados no estado do Rio de Janeiro são escassos, o que reforça a importância de se realizar as pesquisas na região. A agropecuária não é a principal atividade geradora de capital do estado do RJ, conseqüentemente não são realizados muitos estudos sobre evapotranspiração e balanço de energia na região, principalmente no que diz respeito ao uso de métodos micrometeorológicos para tais estimativas.

Os objetivos deste trabalho foram estimar a evapotranspiração real (ETR) de pastagem pelo método do Balanço de Energia - Razão de Bowen e a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith FAO-56, avaliar a relação entre ETR e ET_o , e as partições do balanço de energia, além da sazonalidade de ETR e ET_o e dos fluxos de calor latente e sensível no município de Cachoeiras de Macacu, RJ.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pastagem – Gênero *Brachiaria* (*Brachiaria spp.*)

No Brasil, grandes áreas são semeadas a fim de se formar pastagens, cultivadas com gramíneas forrageiras. Estas, por sua vez, representam culturas de grande importância econômica para o País, visto que são a principal fonte de alimento para ruminantes (RIBEIRO et al., 2016).

As gramíneas forrageiras que formam as pastagens no Brasil, em sua maioria, pertencem aos gêneros *Brachiaria*, *Panicum* e *Andropogon* (RIBEIRO et al., 2016). As braquiárias são originárias principalmente do leste da África (CRUZ, 2010), e se apresentam como uma das principais fontes de nutrientes aos animais (SILVA & FERRARI, 2012). Além disso, este tipo de forrageira se disseminou no Brasil, dentre outros motivos, devido à boa produção de forragem e à germinação de sementes (RIBEIRO et al., 2016).

Ainda de acordo com Ribeiro et al. (2016), as plantas do gênero *Brachiaria* são pouco exigentes às condições edafoclimáticas, porém são pouco tolerantes às baixas temperaturas, não sendo indicadas para regiões onde ocorrem fortes geadas. Temperaturas do ar abaixo de 25 °C reduzem sua taxa de crescimento. Contudo, se adaptam a diversas condições de solo (incluindo solos de baixa fertilidade) e clima. Duas cultivares que se destacam no País em área plantada são a *Brachiaria decumbens* e a *Brachiaria brizantha*, sendo esta última também resistente à cigarrinha-das pastagens (RODRIGUES, 2010).

Segundo Crispim & Branco (2002), estas duas braquiárias apresentam ciclo perene, e se desenvolvem de maneiras distintas. A *Brachiaria brizantha* cresce na forma de touceira, apresenta grande porte e exige solo que tenha fertilidade de média a alta. A melhor época para plantio é durante a estação das chuvas, porém é pouco resistente a áreas úmidas. Apresenta 10 % de proteína bruta na matéria seca.

A *Brachiaria decumbens*, cresce na forma decumbente. A melhor época de plantio é na estação das chuvas e também possui baixa resistência a áreas úmidas. Exige solo de fertilidade baixa a média e possui de 7 a 9 % de proteína bruta na matéria seca. Este tipo de braquiária possui baixa resistência à cigarrinha-das-pastagens, mas é uma planta agressiva, que colabora para conter a erosão (CRISPIM & BRANCO, 2002).

2.2 Balanço de Energia – Razão de Bowen

De acordo com PEREIRA, SEDIYAMA & VILLA NOVA (2013), durante o dia, uma superfície vegetada recebe energia solar, porém somente cerca de 3 % dessa quantidade de energia recebida é absorvida pela planta para fins de fotossíntese (F), isto é, a energia que será utilizada para promover o crescimento e o desenvolvimento da cultura.

Se o solo estiver suprido de água, a evapotranspiração irá consumir a maior parte desta energia absorvida. Assim, parte da energia solar será transformada em calor latente (λLE), devido à mudança de fase da água líquida para vapor.

Ainda segundo PEREIRA, SEDIYAMA & VILLA NOVA (2013), outra parte da energia absorvida é utilizada no aquecimento da superfície de folhas, tronco e solos, ou seja, há o aumento da temperatura, a energia é transformada em calor sensível (H). O calor da superfície se dividirá em dois processos: uma parte da energia será dissipada como energia radiativa emitida e a outra, que é utilizada tanto no aquecimento do ar (que está em contato

com a biomassa - A), quanto no aquecimento da parte interna do solo, o fluxo de calor no solo (G).

Logo, o balanço de energia de uma superfície vegetada pode ser descrito da seguinte maneira:

$$R_n = \lambda LE + H + G + A + F \quad (1)$$

Contudo, o balanço pode ser simplificado ao se descartar alguns termos desta equação, devido às suas pequenas contribuições de energia absorvida, sendo reescrito como:

$$R_n = \lambda LE + H + G \quad (2)$$

Para quantificar o balanço de energia de uma região, pode-se fazer uso de métodos micrometeorológicos, destacando-se o Balanço de Energia - Razão de Bowen (BERB). Estudos utilizando este método para a quantificação do balanço de energia vêm sendo realizados por pesquisadores em diversas regiões do mundo, com tipos de enfoque ou vegetação distintos.

O método da razão de Bowen foi proposto por Bowen (1926) originalmente para grandes corpos d'água, sendo posteriormente adaptado para superfícies vegetadas. É descrito como sendo a razão entre o fluxo de calor sensível e latente, razão esta denominada - Razão de Bowen (β). β pode ser obtida pelos gradientes verticais de temperatura e umidade do ar (SANTOS, 2010), medições estas coletadas diretamente no campo, por meio de sensores instalados em pelo menos dois níveis acima da superfície.

O BERB foi implementado como ferramenta para a estimativa da evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar no estado da Paraíba (SILVA et al., 2015), para superfície coberta por gramado na África do Sul (SAVAGE; EVERSON; METELERKAMP, 2008), em área arbustiva alagável no Pantanal, Mato Grosso (MACHADO et al., 2016), grama alagável na Inglaterra (HARDING; LLOYD, 2008), entre outros.

Em área de pastagem, Silva, Folegatti & Villa Nova (2005) utilizaram o BERB para estimar a evapotranspiração do Capim Tanzânia e compararam com os resultados da evapotranspiração mensurada por um lisímetro de pesagem. A evapotranspiração média da cultura estimada pelo BERB foi de 4,13 mm d⁻¹, e o valor médio obtido pelo lisímetro foi de 4,34 mm d⁻¹, para o período estudado (de 21 de julho de 2000 a 15 de julho de 2001). Porém, o método da Razão de Bowen se mostrou influenciado pelas condições atmosféricas, como diminuto ou mesmo ausência de gradiente vertical de temperatura e umidade em períodos chuvosos, e pelo desenvolvimento vegetativo da cultura. Apesar da influência, os autores concluíram que o BERB apresentou desempenho satisfatório na estimativa da ET.

Em estudo desenvolvido por Biudes et al. (2009) em duas áreas distintas, uma com superfície vegetada com cambazal e a outra com pastagem, foi avaliada a variação sazonal do balanço de energia utilizando o método da Razão de Bowen. Concluíram que os componentes do balanço de energia apresentaram sazonalidade, com médias mais elevadas na estação chuvosa nas duas áreas. O fluxo de calor latente foi maior no cambazal, enquanto os fluxos de calor sensível e no solo foram maiores na pastagem durante o ano. Verificaram também que a maior porcentagem do saldo de radiação foi destinada ao fluxo de calor latente, que teve uma relação de 80 % no cambazal e 56,6 % na pastagem, seguido pelo fluxo de calor sensível, 19,1 e 42,9 %, e pelo fluxo de calor no solo, 0,3 e 7,2 %, respectivamente.

Em estudo comparativo utilizando método da Razão de Bowen para a determinação do balanço de energia e da evapotranspiração, com o método de Penman-Monteith para a

estimativa da evapotranspiração de referência, Biudes et al. (2008) desenvolveram um trabalho em área de pastagem mista composta de três tipos de gramíneas: capim tanzânia (*Panicum maximum*), capim carona (*Elyonurus muticus*) e *Brachiaria humidicola*, em condições de cerrado. Durante a pesquisa, verificaram que a estimativa da ET pelo BERB foi influenciada pela altura dos instrumentos utilizados. Os três psicrômetros utilizados para a obtenção da pressão do vapor d'água foram separados por níveis para se obter os gradientes, instalados a 0,55 m, 1,00 m e 1,55 m acima da superfície vegetada. Nos níveis 2-3, os instrumentos não apresentaram gradiente de temperatura e pressão de vapor d'água suficiente para o cálculo da razão de Bowen. Os métodos escolhidos obtiveram boa correlação linear para o cálculo de ET para os níveis 1-2 e 1-3.

2.2.1 Características do BERB

De acordo com Santos (2010), o método é de aparente simples aplicação, porém requer que algumas condições sejam satisfeitas. Por exemplo, o transporte dos fluxos é considerado somente na direção vertical, com ausência de advecção (transporte de fluxos na horizontal), os instrumentos que medem as variáveis atmosféricas devem estar posicionados dentro da camada limite interna, e as medições dos fluxos devem ser realizadas, em média, em escala subhorária (entre 30 e 60 minutos) (MONTEITH & UNSWORTH, 1990).

A espessura da camada limite aumenta com o aumento da área de bordadura, então uma área de bordadura adequada é necessária para atestar que as medidas estejam dentro da camada limite. Recomenda-se que a razão entre a área de bordadura e a altura das medidas da razão de Bowen seja de 100:1 (ROSEMBERG et al., 1983).

Outra particularidade do método, que pode ser considerada uma possível desvantagem de acordo com Ohmura (1982), é que para situações de estimativa de fluxos abaixo da superfície, a aplicabilidade do BERB se torna difícil, como em superfície aquática (apesar do método ter sido criado a princípio para superfícies aquáticas), derretimento de neve e ambientes porosos (florestas).

2.3 Evapotranspiração - ET

Entende-se por evapotranspiração (ET) a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água do solo (E) e de transpiração (T) das plantas numa superfície vegetada, ou seja, $ET = E + T$, termo este que foi introduzido por C.W. Thornthwaite, em meados de 1930 (PEREIRA, SEDIYAMA & VILLA NOVA, 2013).

A evaporação da água no solo se dá quando a água em seu estado líquido é convertida em vapor d'água e esta é evaporada da superfície. Para que a evaporação ocorra, uma determinada quantidade de energia é requerida. Esta energia é provida pela radiação solar direta e também, porém em menor escala, pela temperatura do ar (ALLEN et al., 1998).

A transpiração consiste na vaporização da água líquida nos tecidos da planta e a transferência desta água em forma de vapor para a atmosfera. A planta perde água predominantemente por seus estômatos. O processo de transpiração, assim como o de evaporação direta, depende de energia, do gradiente de pressão de vapor d'água e do vento. Logo, radiação, temperatura e umidade relativa do ar e o vento devem ser considerados no processo. A água no solo, a habilidade que o solo tem de conduzir água para as raízes, as características da cultura, fatores ambientais e práticas de cultivo são fatores que determinam a taxa de transpiração (ALLEN et al., 1998).

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), muitos fatores influenciam na evapotranspiração e estes podem ser divididos em fatores atmosféricos, da vegetação e de manejo e do solo. Os fatores atmosféricos são a radiação, a temperatura do ar, umidade relativa do ar e vento (advecção). A radiação é a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração. Em dias que a radiação solar é mais abundante, as taxas evapotranspirométricas se elevam, como nos casos dos dias de verão. A temperatura e a umidade relativa do ar atuam em conjunto: o aumento da temperatura gera aumento no déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar, tornando maior a demanda evaporativa do ar. E no caso da umidade relativa do ar, quanto maior ela for, menor a demanda evaporativa. Portanto, menor a ET. A advecção é o transporte horizontal de energia de uma área mais seca para outra mais úmida, energia esta utilizada no processo da evapotranspiração (PEREIRA, ANGELOCCI & SENTELHAS, 2007). O vento também modifica a camada de ar próxima à superfície e, pode substituir uma camada saturada por uma com menos vapor d'água (CARVALHO & SILVA, 2006).

Ainda de acordo com Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), os fatores da planta são a espécie vegetal, o albedo, o índice de área foliar, a altura da planta e a profundidade do sistema radicular. A espécie está relacionada à arquitetura da folha, à resistência interna da planta ao transporte de água, ao número, tamanho, e distribuição de estômatos, entre outros. A reflexão (albedo) influencia diretamente na disponibilidade da radiação para o processo da evapotranspiração. Quanto mais escura a vegetação, menor a reflexão dos raios solares incidentes, isto é, maior será a radiação para a planta. Sobre o índice de área foliar (IAF), quanto maior for a área foliar, maior será a superfície transpirante, e maior será o potencial para o uso de água. As plantas mais altas interagem mais eficientemente com a atmosfera em movimento, e assim extraem mais energia do ar e, dessa forma, elevam ET. A profundidade do sistema radicular está relacionada ao volume de solo explorado pelas raízes. Um sistema radicular superficial, por explorar volume menor de solo, deixa a planta mais suscetível em períodos de estiagem.

Alguns dos fatores de manejo e do solo são o espaçamento de plantio, o tipo de solo (capacidade de armazenamento de água no solo) e os impedimentos físicos e químicos. Com relação ao espaçamento, quando se realiza o plantio com espaçamento menor, há competição intensa das plantas pela água o, que gera o aprofundamento do sistema radicular para aumentar o volume de água disponível. O espaçamento maior permite um sistema radicular mais superficial, que também permite maior aquecimento do solo e da vegetação, além da maior circulação de vento entre as plantas, que aumenta a evapotranspiração. Sobre o tipo de solo, solos argilosos retém mais água que solos arenosos, sendo assim capazes de manter determinada taxa evapotranspirométrica por mais tempo. Os impedimentos físicos, por exemplo, limitam o desenvolvimento do sistema radicular e, assim levam às plantas a explorarem menor volume do solo. Em épocas de chuva, o solo pode ficar encharcado, asfixiando as raízes. Em épocas de seca, o volume de água disponível para as raízes fica reduzido, não permitindo o aprofundamento das raízes em busca de água (PEREIRA, ANGELOCCI & SENTELHAS, 2007).

2.3.1 Evapotranspiração de referência – ET_o

Segundo Allen et al. (1998), a taxa evapotranspirométrica de uma superfície de referência sem restrição de água é denominada evapotranspiração de referência (ET_o). Este conceito de ET_o foi introduzido no intuito de estudar a demanda evaporativa, independentemente da cultura, desenvolvimento da cultura e de práticas de manejo.

Além disso, diversos métodos empíricos têm sido desenvolvidos nos últimos anos para estimar a evapotranspiração com diferentes variáveis climáticas, como os métodos de Thornthwaite (1948), Makkink (1957), Camargo (1971), Priestley-Taylor (1972) e Hargreaves-Samani (1985) (PEREIRA, SEDIYAMA & VILLA NOVA, 2013). Muito tempo e custo foram demandados em tentativas de calibração e validação destes métodos (ALLEN et al., 1998).

Dada esta necessidade, quatro métodos foram desenvolvidos e publicados no boletim FAO-24: o método de Blaney-Criddle, o método da radiação, o de Penman modificado e o do Tanque Classe A. O que apresentou melhores resultados e com menor possibilidade de erros foi o método de Penman modificado, dada uma cultura de grama em crescimento. Foi verificado que os métodos propostos no boletim FAO-24 apresentavam algum tipo de inconsistência, o método de Penman modificado, por exemplo, frequentemente superestimava ET_0 . Portanto, este método foi ajustado e posteriormente foi o único método para a estimativa de ET_0 recomendado pela FAO, o método de Penman-Monteith, considerado padrão pelo boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

Adotou-se como referência uma cultura hipotética, similar à grama, com as seguintes características: altura da cultura de 0,12 m, albedo de 0,23, índice de área foliar (IAF) de 2,88 e resistência ao transporte de vapor d'água constante de 70 s m^{-1} (ALLEN et al., 1998).

Alguns trabalhos utilizando ET_0 FAO-56 foram realizados no estado do Rio de Janeiro, como no estudo de Vallory et al. (2016), em que os métodos de Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Thornthwaite e Camargo foram comparados ao parametrizado pela FAO, em três municípios do estado do RJ (Paraty, Petrópolis e Campos dos Goytacazes). Coeficientes estatísticos foram utilizados para analisar os dados da ET_0 diária e mensal estimadas pelos métodos em questão. Foram utilizados o índice de confiança de Camargo, coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação, entre outros, e assim os métodos foram classificados em categorias de acordo com seu desempenho (ótimo, muito bom, bom, mediano, sofrível, mau e péssimo). Com estas análises, verificaram que a utilização do método de Priestley-Taylor apresentou boa confiabilidade na estimativa de ET_0 nas escalas mensal e diária para Paraty e Campos dos Goytacazes. Para Petrópolis, o método mais indicado pelos autores foi o de Hargreaves-Samani. Não foi recomendada a utilização dos métodos de Thornthwaite na escala mensal no inverno, e de Camargo na escala diária no verão nos três municípios em estudo.

Carvalho et al. (2015) desenvolveram um trabalho no qual se estimou ET_0 a partir de dados meteorológicos limitados para a região Sudeste do Brasil. Para isso, fixaram o método de Penman-Monteith FAO-56 como referência, e fizeram uso dos seguintes métodos para comparação com o do FAO-56: método padrão de Penman-Monteith com uso da radiação solar estimada pelo balanço entre ondas curtas e longas, método padrão com uso da pressão de vapor d'água do ar estimada pelas temperaturas máxima e mínima, e pela umidade relativa do ar e método padrão com uso da velocidade de vento constante. ET_0 também foi estimada pelos métodos de Hargreaves-Samani (HS) e de Turc. Concluíram que o método padrão com uso da pressão de vapor estimada pelas temperaturas do ar máxima e mínima, e pela umidade relativa do ar foi a alternativa mais satisfatória para estimar a ET_0 , seguido pelos métodos com uso da velocidade de vento constante, para Espírito Santo e Rio de Janeiro, e com uso da radiação solar estimada pelo balanço entre ondas curtas e longas, para São Paulo e Minas Gerais. Os maiores erros foram obtidos com Hargreaves-Samani, que superestimou a ET_0 em comparação ao método de Penman-Monteith padrão, para a maioria das estações avaliadas.

2.3.2 Evapotranspiração da cultura - ET_c

De acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração da cultura sob condições padrões (ET_c) é aquela em que a planta se encontra livre de doenças, as plantações são fertilizadas, desenvolvidas em extensas áreas, sob ótimas condições de oferta de água e com máxima produtividade.

ET_c pode ser obtida como o produto de ET_o por um coeficiente da cultura empírico, denominado K_c . Há um K_c tabelado no boletim FAO-56 para cada cultura, e o mesmo também pode ser calculado em função dos comprimentos dos estádios da cultura em questão.

Existem duas maneiras de se determinar ET_c com base no FAO-56: com o K_c “simples” ou “único”, em que se considera solo e planta de maneira única, e com o K_c “dual”, em que a transpiração e a evaporação são tratados separadamente, por meio do K_{cb} , coeficiente basal da cultura e do K_e , que é o coeficiente de evaporação da água no solo (LYRA et al., 2007).

Estudos realizados por Lyra et al. (2007) e Silva et al. (2015) estimaram a evapotranspiração da cultura para a cana-de-açúcar, o primeiro para o estado de Alagoas e o segundo para a Paraíba. Em ambos os casos, a cultura se encontrava em regime de sequeiro, isto é, não há irrigação. Silva, Folegatti & Villa Nova (2005) também desenvolveram um trabalho em que se estimou a evapotranspiração do capim tanzânia, comparando ET_c estimada pelo método da razão de Bowen com as medidas de um lisímetro de pesagem.

2.3.3 Evapotranspiração real – ETR

A evapotranspiração real (ETR) é definida como aquela que ocorre em uma extensa área, completamente coberta por vegetação com seu crescimento ativo, porém com condições hídricas restritas no solo (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013), ou seja, ocorre em períodos sem chuvas ou irrigação. Além disso, ETR pode ser limitada tanto pela falta de umidade no solo em um dia ensolarado, por exemplo, quanto em um dia com baixa radiação solar, como em um dia nublado.

Alguns estudos para estimar a evapotranspiração real vêm sendo realizados no Brasil, como o trabalho de Bezerra, Silva e Ferreira (2008) e o de Anjos et al. (2016), que utilizaram imagens de satélite para determinar ETR, e o estudo realizado por Furtado (2017), que ETR foi estimada pelo modelos do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (adaptado para culturas agrícolas) e o do FAO-56.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em uma área experimental na Reserva Ecológica de Guapiaçu – REGUA (Figura 1), uma Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), no município de Cachoeiras de Macacu, região metropolitana do estado do Rio de Janeiro (22° 27' 49" S; 42° 45' 56" W, 21 m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Af – clima tropical úmido, com estação seca no inverno. O solo da área foi classificado como Gleissolo Melânico Tb Distrófico típico, o relevo era plano, com declividade inferior a 3 %. O estudo foi conduzido em uma região de pastagem, com vegetação composta predominantemente por *Brachiaria* e com 30 hectares de área, que foi ocupada a cada 15 dias por gado por, em média, 160 animais de raça predominantemente nelore (*Bos taurus indicus*).

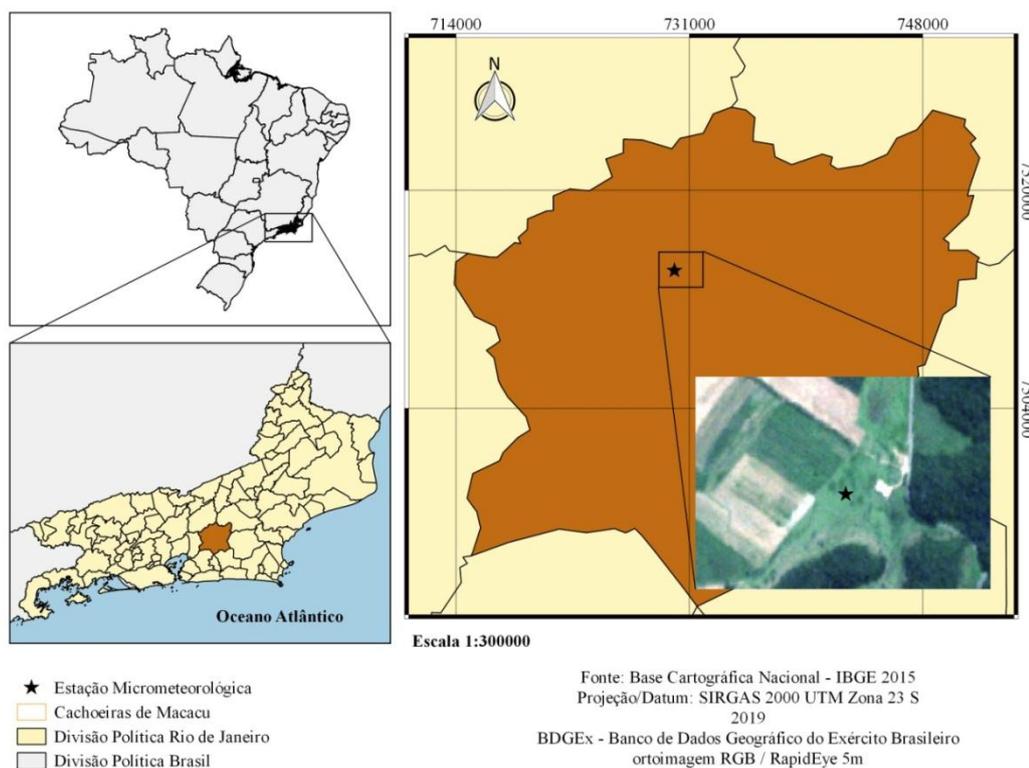


Figura 1. Localização da área experimental, localizada na Reserva Ecológica de Guapiaçu (REGUA), estado do Rio de Janeiro.
Figura por: Mariane Pessanha.

3.2 Propriedades Físico-Hídricas do Solo

As propriedades físico-hídricas do solo analisadas foram a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a curva de retenção de água no solo, a velocidade de infiltração, condutividade hidráulica, granulometria e classificação pedológica. As amostras de solo foram realizadas em três pontos ao acaso no local, ao redor da estação micrometeorológica. Em cada ponto foram coletadas três amostras indeformadas a profundidades diferentes – 0,10, 0,30 e 0,60 m (Figura 2) - e foram enviadas para análise no Laboratório de Solos e Qualidade de Água, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.



Figura 2. Coleta de amostras indeformadas de solo na área experimental para realização das análises físico-hídricas do solo.

Após as análises, obteve-se a descrição morfológica do solo da área. Nas Tabelas 1 e 2, tem-se a descrição de cada horizonte do perfil de solo analisado e os resultados da análise granulométrica.

Tabela 1. Descrição morfológica da análise do perfil do solo da área de estudo.

Horizonte	Descrição
A	0-15 cm, franco; fraca médio a pequena; blocos subangulares e granular; macio, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e abrupta.
Bg	15-50 cm, franco-arenosa; moderada a fraca médio a pequena; blocos subangulares; macio, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
B/C	50-55 cm, franco; moderada médio a pequena; blocos subangulares; macio, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
Cg	55-65+ cm, areia franca; maciça; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso.

Tabela 2. Análise granulométrica.

Horizonte	Argila (dag/Kg)	Silte (dag/Kg)	Areia (dag/Kg)	Classe textural
A	26	37	37	Franco
Bg	17	31	52	Franco-arenosa
B/C	27	28	45	Franco
Cg	8	19	73	Areia-franca



Figura 3. Perfil do solo da área de estudo.

3.3 Medidas Micrometeorológicas

Foi instalado um mastro micrometeorológico de 4,0 m de altura na área de estudo para servir de base aos instrumentos meteorológicos (Figura 4). A área possuía aproximadamente 300 m de bordadura na direção predominante do vento. As medições do saldo de radiação foram obtidas por um saldo radiômetro (Modelo LP-NET-14, Delta Ohm, Itália) (Figura 5), instalado a 1,80 m acima do solo (orientado para Norte) e aproximadamente a 1,50 - 1,55 m acima da vegetação. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos por três termohigrômetros (DB-TH1-SDI, dualBASE, EUA) (Figura 6), sendo estes instalados a 1,15 m, 1,58 m e 2,33 m acima da superfície do solo, o que permitiu determinar a razão de Bowen

em três níveis para análise: níveis 1-2, 2-3 e 1-3. A velocidade do vento foi obtida por quatro anemômetros sônicos (GILL-1405, Gill Instruments, Reino Unido) (Figura 6), instalados a 1,23 m, 1,68 m, 2,34 m e 3,00 m de altura.

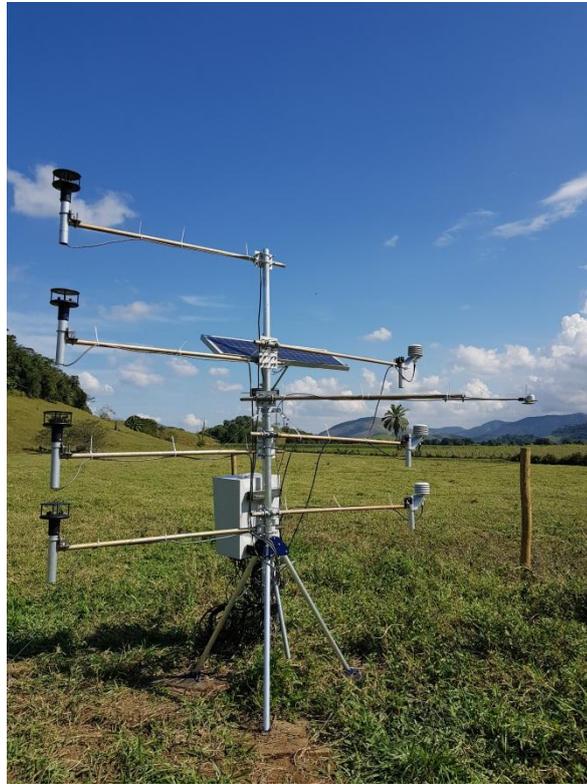


Figura 4. Mastro micrometeorológico com os seguintes instrumentos instalados: saldo radiômetro, anemômetros sônicos, termohigrômetros, painel solar e caixa ambiental com *datalogger*.



Figura 5. Saldo Radiômetro sobre do dossel da vegetação.



Figura 6. Termohigrômetro (a) e anemômetro (b).

As medições do fluxo de calor no solo foram realizadas por duas placas de fluxo de calor no solo (HFP01, Hulkseflux Termal Sensors, Netherlands), a aproximadamente 0,05 m de profundidade (Figura 7). O sistema ainda contava com três reflectômetros de conteúdo de água, instalados a 0,10, 0,30 e 0,60 m de profundidade (Figura 8). As médias das medidas foram armazenadas a cada 10 minutos, com auxílio de um *datalogger* (CR3000, Campbell Scientific Inc, EUA). Nas determinações do BERB utilizaram-se médias de 30 min dos elementos micrometeorológicos medidos.



Figura 7. Placa de fluxo de calor no solo, instalada a aproximadamente 0,05 m de profundidade.



Figura 8. Reflectômetros de conteúdo de água, instalados a 0,10 m, 0,30 m e 0,60 m de profundidade.

Os dados de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar global desta estação micrometeorológica também foram utilizados para estimar a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith FAO-56.

3.4 Balanço de Energia - Razão de Bowen

O método do Balanço de energia - razão de Bowen (em inglês *Bowen Ratio - Energy Balance* – BREB) é baseada na lei de conservação de energia no sistema solo-planta-atmosfera (CALLEJAS et al., 2016). A partir das medições realizadas do balanço de radiação, dos fluxos de calor no solo, dos gradientes verticais de temperatura e da pressão de vapor do ar entre pelo menos dois níveis, tem-se o balanço de energia, representado pela Eq. 03 (SILVA et al., 2016):

$$R_n - G - H - LE = 0 \quad (3)$$

em que:

R_n = saldo de radiação ($W m^{-2}$);
 G = fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$);
 H = fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) e
 LE = fluxo de calor latente de evaporação ($W m^{-2}$).

A razão de Bowen (β) é uma relação entre os fluxos de calor sensível e latente, conforme a equação abaixo (Eq. 04):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (4)$$

A Equação 04 pode ser reescrita da seguinte maneira (Eq. 05):

$$\beta = \gamma \left(\frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad (5)$$

em que:

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

ΔT = gradiente de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$); e

Δe = gradiente de pressão atual de vapor d'água do ar (kPa).

O coeficiente psicrométrico pode se dar pela seguinte equação:

$$\gamma = \frac{(C_p P_{\text{atm}})}{(0,622 \lambda)} \quad (6)$$

em que:

C_p = calor específico do ar seco à pressão constante ($1,013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

λ = calor latente de evaporação ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$); e

P_{atm} é a pressão atmosférica local (kPa), dada pela seguinte equação:

$$P_{\text{atm}} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

em que: Z é a altitude do local (m). Neste estudo, $Z = 21\text{m}$.

Após determinada a razão de Bowen, pode-se estimar o fluxo de calor latente pela equação abaixo (Eq. 08), em função do balanço de energia:

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

Com os valores do balanço de energia e do fluxo de calor latente, pode-se retornar à Eq. 04 e estimar o fluxo de calor sensível, ou pela equação abaixo (Eq. 09):

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (9)$$

No presente estudo, os componentes do BERB foram avaliados entre 28/06/2018 e 31/12/2018, compreendendo as estações do inverno, primavera e início do verão.

As partições dos fluxos foram analisadas, a fim de se verificar se lei da conservação de energia no sistema solo-planta-atmosfera e o balanço de energia (representado pela Eq. 3) foram satisfeitos. Os fluxos de calor latente e sensível também foram analisados

individualmente, para avaliar a representatividade (em porcentagem) de cada fluxo no balanço e a sazonalidade desses fluxos, seguindo a abordagem para seleção e descarte de dados proposta por Perez et al. (1999), conforme a Eq. 11, sintetizada na Tabela 3.

Para este método foram utilizadas as médias dos dados a cada 30 minutos. Os valores da evapotranspiração nessa escala de tempo pelo BERB foram obtidos dividindo-se LE por λ ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$), e multiplicando-se esta razão por 1800 segundos. Para a estimativa da evapotranspiração real, os valores foram integrados ao longo do dia.

3.4.1 Critérios de seleção das observações - BERB

Como visto anteriormente, o método da Razão de Bowen possui uma série de particularidades, e estas podem resultar em estimativas inconsistentes de fluxos. Segundo Ohmura (1982), os principais problemas do BERB estão relacionados à resolução dos instrumentos utilizados para o cálculo dos gradientes de temperatura e umidade. Para evitar estes possíveis erros, o autor sugere o descarte destes dados inconsistentes. Dados coletados durante o período da noite também são descartados, devido aos problemas de estabilidade atmosférica; período em que resulta em gradientes pequenos (UNLAND et al., 1996).

Outra restrição do método é quando o valor da razão de Bowen se aproxima de -1,0, apresentando fluxos de magnitudes inadequados (BUIDES et al., 2009). Se o valor de β for próximo ou igual a -1, ao voltar-se na Eq. 08, o valor do fluxo de calor latente tende ao infinito. Tais problemas ocorrem geralmente no início da manhã e no final da tarde e durante precipitação. Algumas opções de descarte de dados foram propostas, como por exemplo, valores de β menores que -0,75 ou no intervalo entre $-1,3 < \beta < -0,7$ (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996). No entanto, a faixa a ser descartada escolhida depende da acurácia da medida dos sensores utilizados.

No presente trabalho, foi utilizado o critério proposto por Perez et al. (1999), em função da precisão dos sensores, em que se descarta os dados de β que estejam dentro do intervalo $-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$, no qual ε é dado pela seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\delta\Delta e + \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad (10)$$

em que:

$\delta\Delta e$ e $\delta\Delta T$ são as precisões dos sensores em medir o gradiente de pressão do vapor d'água temperatura, respectivamente. Para os sensores utilizados neste trabalho, $\delta\Delta e$ foi considerado 0,04 kPa e $\delta\Delta T$ igual a 0,2 °C.

Para estabelecer as condições nas quais o método BERB produza resultados consistentes, foram utilizados os critérios utilizados sugeridos por Perez et al. (1999), baseados na relação fluxo-gradiente, utilizando-se a seguinte equação:

$$\frac{\Delta e}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{H} = \frac{\Delta e + \gamma \Delta T}{R_n - G} > 0 \quad (11)$$

Com base na equação acima, Perez et al. (1999) propuseram as condições para a produção de dados consistentes, que seguem na Tabela 3:

Tabela 3. Condições para que o método da razão de Bowen forneça dados consistentes. R_n é o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo, Δe o gradiente de pressão de vapor, β é a razão de Bowen, LE o fluxo de calor latente e H o fluxo de calor sensível (adaptado de Perez et al., 1999).

Energia disponível	Δe	β	Fluxos de calor
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$ $\Delta e < 0$	$\beta > -1$ $\beta < -1$	$LE > 0$ ou $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$ $LE < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$ $\Delta e < 0$	$\beta < -1$ $\beta > -1$	$LE > 0$ e $H < 0$ $LE < 0$ ou $H > 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Cada condição da Tabela 3 foi considerada um tipo de erro nas análises, os quais todos eles estavam relacionados à inconsistência no sinal dos fluxos e dos gradientes. Convencionou-se a que primeira condição (primeira linha da Tabela 3) é o erro tipo 1, a segunda condição o erro tipo 2 e assim por diante. Além desses erros, foi convencionado o erro do tipo 5, que está relacionado à precisão dos instrumentos para medir o gradiente de pressão de vapor d'água.

Para o cálculo do Balanço de Energia – Razão de Bowen, assim como para a análise dos erros e para a exclusão dos dados inconsistentes baseados nas condições sugeridas por Perez et al. (1999), utilizou-se o software de modelagem OpenModel, versão 2.4.1 (rotina de implementação de equações e condições no Anexo).

3.5 Evapotranspiração Pelo Método de Penman-Monteith – FAO56

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o , mm) pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim de irrigação e drenagem No 56 da *Food and Agriculture Organization* (FAO56), é baseada em variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento a 2 m e radiação solar, como se pode observar na equação abaixo (Eq. 12):

$$ET_o = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (12)$$

em que:

- s = declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura do ar média ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$);
- R_n = saldo de radiação diário ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
- G = fluxo total diário de calor no solo ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), considerado nulo na escala diária (ALLEN et al., 1998);
- γ = coeficiente psicrométrico ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$);
- u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura ($m \text{ s}^{-1}$);
- e_s = pressão de saturação de vapor (kPa);
- e_a = pressão atual de vapor (kPa); e
- T = temperatura do ar média diária ($^\circ C$).

A temperatura e a umidade do ar foram obtidas diretamente pelos instrumentos em campo. A velocidade do vento também foi obtida em campo, porém o anemômetro não estava posicionado a 2 m de altura, logo se elegeu utilizar o anemômetro posicionado a 2,34 m da superfície do solo. A velocidade do vento foi, então, reduzida para 2 m pela equação abaixo:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (13)$$

em que:

u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1}); e

u_z é a velocidade do vento medida a altura z (m) acima da superfície (m s^{-1}). Neste trabalho, $z = 2,34$ m.

Os valores da temperatura do ar média no método de Penman-Monteith FAO56 são dados pela média entre as temperaturas máxima (T_x) e mínima (T_n) do dia, em °C. O fluxo total de calor no solo é considerado zero na escala diária. Os valores de Δ , γ , e_s e e_a foram calculados pelas equações abaixo.

Declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura do ar média:

$$s = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right) \right]}{(T+237,3)^2} \quad (14)$$

Coeficiente psicrométrico:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \text{ Patm} \quad (15)$$

em que:

Patm = pressão atmosférica local (kPa), em que Patm é calculada pela Eq. 07.

Médias das pressões de saturação (e_s) e parcial (e_a) do vapor d'água no ar:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \quad (16)$$

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\max}) \text{ UR}_{\min} + e^\circ(T_{\min}) \text{ UR}_{\max}}{200} \quad (17)$$

em que:

T_{\max} e T_{\min} são as temperaturas máxima e mínima do ar (°C), respectivamente;

UR_{\max} e UR_{\min} são as umidades relativas do ar máxima e mínima (%), respectivamente; e

e° é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa), que é definida como:

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T}{T+237,3} \right) \quad (18)$$

Para obter-se o saldo de radiação, faz-se necessário cálculo do termo radiativo. Para tal, segue a seguinte sequência de equações:

Saldo de radiação (R_n - MJ m⁻² d⁻¹):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

em que:

R_{ns} é o balanço de ondas curtas e R_{nl} é o balanço de ondas longas, ambos em [MJ m⁻² d⁻¹], e são dados pelas equações abaixo.

Balanço de ondas curtas:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (20)$$

em que α é o albedo, que no caso da cultura hipotética é igual a 0,23 e R_s é a radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹).

Balanço de ondas longas (R_{nl}):

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_x^4 + T_n^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (21)$$

em que:

σ é a constante de Stefan-Boltzmann (4,903 10⁻⁹ MJ K⁻⁴ m⁻² d⁻¹) e R_{so} é a radiação solar para céu limpo, ou seja, sem nebulosidade (MJ m⁻² d⁻¹), dada pela relação:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad (22)$$

Radiação solar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre - MJ m⁻² d⁻¹):

$$R_a = 37,568 dr [\omega s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega s)] \quad (23)$$

Distância Terra-Sol (dr):

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi DOY}{365}\right) \quad (24)$$

em que: DOY é o dia de ordem do ano (d).

Declinação solar (δ - rad):

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi DOY}{365} - 1,39\right) \quad (25)$$

Ângulo que a Terra deve girar do nascer até a culminação do Sol (ωs – rad):

$$\omega s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (26)$$

em que φ é a latitude do local (rad).

3.6 Análise Estatística

Para verificar a frequência dos erros por nível e mês, avaliou-se a distribuição de frequência dos dados que foram caracterizados com erros e dos que não foram e, posteriormente, fez-se a frequência relativa desses dados por mês. Com relação à frequência dos erros por horário, aplicou-se a distribuição de frequência dos dados com e sem erro no determinado intervalo de tempo do dia (manhã: 6 – 12 h, tarde: 12 – 18 h, noite: 18 – 00 h e madrugada: 00 – 6 h), fazendo-se depois a porcentagem em relação ao total de dados do mês.

Para o fechamento do balanço de energia, assim como para as partições dos fluxos de calor latente e sensível foi utilizada regressão linear simples.

$$y = a + b x \quad (27)$$

em que:

y = variável dependente;

x = variável independente;

a = coeficiente linear da reta (intercepto); e

b = coeficiente angular da reta (inclinação).

O coeficiente de determinação (r^2), obtido pelo quadrado do coeficiente de correlação, indica (em porcentagem) a qualidade do ajustamento de uma linha de regressão entre as variáveis dependente e independente, podendo variar de 0 a 1, sendo $r^2 = 1$ considerada a correlação perfeita. O coeficiente de determinação é definido por:

$$r^2 = \left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \right)^2 \quad (28)$$

em que:

\bar{x}_i = média dos valores da variável independente

\bar{y}_i = média dos valores da variável dependente

Nas estimativas dos valores médios da evapotranspiração real para cada mês avaliado, estimada pelo método da Razão de Bowen para os níveis estudados e da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, foram calculados seus respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação. O desvio padrão (σ) expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão, mais homogêneos são os dados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{M}_a)^2}{n}} \quad (29)$$

em que:

x_i = valor na posição i no conjunto de dados;

Ma = média aritmética dos dados; e

n = quantidade de dados.

O coeficiente de variação (CV, %) é uma medida relativa de variabilidade, independente da unidade de medida utilizada e é dado pela equação abaixo.

$$CV = 100 \left(\frac{\sigma}{Ma} \right) \quad (30)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Seleção de Dados

Uma média de 39,42 % dos dados analisados de junho a dezembro de 2018, dos níveis 1-2 (30,14 % - novembro à 64,86 % - junho) e 1-3 (30,14 % - novembro à 44,14 % junho), foram classificados como inconsistentes (Tabelas 2 e 3) e, conseqüentemente, desconsiderados das análises. No nível 2-3, 96,45 % dos dados foram desconsiderados, sendo observados meses (outubro e dezembro) em que 100 % dos dados foram considerados inconsistentes (Tabela 4). A maior parte das observações desconsideradas ocorreu no período noturno (36,29 % para o nível 1-2, 31,77 % para o 1-3 e 47,95 % para o nível 2-3) e nos horários próximos ao nascer e pôr do Sol. Para a análise de ETR pelo balanço de energia – Razão de Bowen, os dados no período noturno e madrugada, entre os horários de 18 e 6 h, também foram descartados, devido ao problema de estabilidade atmosférica, que gera pequenos gradientes.

No próprio estudo realizado em Perez et al. (1999) na região nordeste da Espanha, para o cultivo de Azevém, de 30 (em Montejulia) a 44 % (em Raimat) das observações tiveram algum tipo de erro ao utilizar o critério de seleção de dados e erros sugeridos pelos autores. Santos (2010) também utilizou o critério de seleção de dados proposto por Perez et al. (1999) para o balanço de energia com medidas realizadas em um cultivo de cana-de-açúcar, e verificou que 42 % do total das 618 observações de 30 min foram classificados como inconsistentes. A maior proporção das rejeições também foi observada no período noturno.

Tabela 4. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 1-2.

	N	%	TIPO DE ERRO E SUA FREQUÊNCIA (%)					
			Dados não descartados (%)	1	2	3	4	5
JUN	111	64,86	35,14	0	0	7,21	0	57,65
JUL	1488	55,31	44,69	0	0	7,80	0	47,51
AGO	1488	38,17	61,83	0	0	16,26	0	21,99
SET	1440	42,29	57,71	0	0	28,19	0	14,10
OUT	1488	33,06	66,94	0	0	31,32	0	1,74
NOV	1440	30,14	69,86	0	0	29,65	0	0,49
DEZ	1488	37,90	62,10	0	0	36,89	0	1,01

Tabela 5. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 1-3.

	N	%	TIPO DE ERRO E SUA FREQUÊNCIA (%)					
			Dados não descartados (%)	1	2	3	4	5
JUN	111	44,14	55,86	0	0	44,14	0	0
JUL	1488	32,12	67,88	0	0	29,90	0	2,22
AGO	1488	33,60	66,40	0	0	28,29	0	5,31
SET	1440	39,58	60,42	0	0	35,34	0	4,24
OUT	1488	32,80	67,20	0	0	32,80	0	0
NOV	1440	30,14	69,86	0	0	30,14	0	0
DEZ	1488	37,77	62,23	0	0	37,77	0	0

Tabela 6. Dados totais gerados (N), porcentagem de dados descartados em relação ao número de dados total (%) e os tipos de erro gerados pelo modelo, para o nível 2-3.

	N	%	TIPO DE ERRO E SUA FREQUÊNCIA (%)					
			Dados não descartados (%)	1	2	3	4	5
JUN	111	90,09	9,91	0	0	35,14	0	54,95
JUL	1488	88,51	11,49	0	0,07	18,21	0	70,23
AGO	1488	96,84	3,16	0	0,87	9,74	0	86,23
SET	1440	99,79	0,21	0	7,15	1,25	0	91,39
OUT	1488	100	0	0	10,48	0	0	89,52
NOV	1440	99,93	0,07	0	16,53	0	0	83,40
DEZ	1488	100	0	0	16,06	0,20	0	83,74

No caso do nível 2-3, em todos os meses avaliados, o tipo de erro mais frequente foi o erro tipo 5, que no modelo foi convencionado estar relacionado à precisão dos instrumentos em medir o gradiente de pressão de vapor d'água. Este resultado indicou que não houve gradiente suficiente para gerar dados consistentes em tal nível. Assim, o nível 2-3 foi desconsiderado nas demais análises. Biudes et al. (2008) também constataram baixos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água em um dos níveis avaliados – o nível 2-3 (havia três psicrômetros para a obtenção da pressão do vapor d'água, separados por níveis, instalados a 0,55 m, 1,00 m e 1,55 m acima da superfície vegetada) - para o cálculo da razão de Bowen em área de pastagem mista, em condições de cerrado.

No período de inverno, há menor disponibilidade de radiação solar e baixas velocidades do vento e, assim, espera-se baixa energia térmica e mecânica turbulenta. Isso resulta em baixos gradientes de temperatura e umidade, principalmente no período noturno (18 – 24 h) e na madrugada (24 – 6 h). Por isso, houve grande frequência do erro tipo 5, mesmo nos níveis 1-2 e 1-3. Com a chegada da primavera, o erro 5 passou a ser menos frequente nestes níveis. Os erros dos tipos 1, 2 e 4, que estavam relacionados à inconsistência no sinal dos fluxos e dos gradientes, não foram constatados no modelo para esses níveis.

Os erros também foram avaliados por horário. Os dias observados foram divididos em quatro partes: manhã (6 às 12 h), tarde (12 às 18 h), noite (18 às 24 h), e madrugada (0 às 6 h). Na parte da manhã (Tabela 7), no nível 2-3, o erro mais comum foi do tipo 5, o que reitera mais uma vez a problemática de baixos gradiente de pressão do vapor d'água neste nível.

Tabela 7. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da manhã (6 às 12 h).

	NÍVEL	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2	ERRO TIPO 3	ERRO TIPO 4	ERRO TIPO 5
JUNHO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	5,40
	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	20,72
	1-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
JULHO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	5,24
	2-3	0,00	0,07	0,00	0,00	22,92
	1-3	0,00	0,00	0,07	0,00	0,40
AGOSTO	1-2	0,00	0,00	0,54	0,00	1,68
	2-3	0,00	0,34	0,13	0,00	23,79
	1-3	0,00	0,00	0,67	0,00	0,34
SETEMBRO	1-2	0,00	0,00	0,14	0,00	0,83
	2-3	0,00	2,15	0,00	0,00	22,71
	1-3	0,00	0,00	0,21	0,00	0,35
OUTUBRO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-3	0,00	4,97	0,00	0,00	20,03
	1-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOVEMBRO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-3	0,00	7,78	0,00	0,00	17,22
	1-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DEZEMBRO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-3	0,00	7,12	0,00	0,00	17,88
	1-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Na parte da tarde (Tabela 8), a maior frequência de erros foi a do tipo 3 nos níveis 1-2 e 1-3, que passou a ser observado com menor frequência à tarde no mês de setembro até dezembro, período da primavera, e no nível 2-3 o tipo 5 foi mais comum.

Tabela 8. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da tarde (12 às 18 h).

	NÍVEL	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2	ERRO TIPO 3	ERRO TIPO 4	ERRO TIPO 5
JUNHO	1-2	0,00	0,00	5,40	0,00	0,00
	2-3	0,00	0,00	1,80	0,00	22,52
	1-3	0,00	0,00	5,40	0,00	0,00
JULHO	1-2	0,00	0,00	2,15	0,00	0,94
	2-3	0,00	0,00	1,01	0,00	23,59
	1-3	0,00	0,00	2,62	0,00	0,00
AGOSTO	1-2	0,00	0,00	2,08	0,00	0,00
	2-3	0,00	0,54	0,6	0,00	23,25
	1-3	0,00	0,00	2,08	0,00	0,00
SETEMBRO	1-2	0,00	0,00	1,32	0,00	0,00
	2-3	0,00	5,00	0,00	0,00	20,00
	1-3	0,00	0,00	1,32	0,00	0,00
OUTUBRO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2-3	0,00	5,51	0,00	0,00	19,49
	1-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOVEMBRO	1-2	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
	2-3	0,00	8,75	0,00	0,00	16,25
	1-3	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
DEZEMBRO	1-2	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00
	2-3	0,00	8,94	0,00	0,00	16,06
	1-3	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00

Tabela 9. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da noite (18 às 24 h).

	NÍVEL	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2	ERRO TIPO 3	ERRO TIPO 4	ERRO TIPO 5
JUNHO	1-2	0,00	0,00	1,8	0,00	30,63
	2-3	0,00	0,00	27,93	0,00	4,50
	1-3	0,00	0,00	32,43	0,00	0,00
JULHO	1-2	0,00	0,00	3,90	0,00	20,03
	2-3	0,00	0,00	15,12	0,00	9,27
	1-3	0,00	0,00	21,91	0,00	0,20
AGOSTO	1-2	0,00	0,00	9,54	0,00	10,22
	2-3	0,00	0,00	6,52	0,00	18,21
	1-3	0,00	0,00	17,67	0,00	1,88
SETEMBRO	1-2	0,00	0,00	17,71	0,00	5,21
	2-3	0,00	0,00	0,42	0,00	24,58
	1-3	0,00	0,00	21,46	0,00	1,39
OUTUBRO	1-2	0,00	0,00	19,29	0,00	0,40
	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00
	1-3	0,00	0,00	19,69	0,00	0,00
NOVEMBRO	1-2	0,00	0,00	15,97	0,00	0,21
	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	24,93
	1-3	0,00	0,00	16,18	0,00	0,00
DEZEMBRO	1-2	0,00	0,00	18,55	0,00	0,13
	2-3	0,00	0,00	0,13	0,00	24,87
	1-3	0,00	0,00	18,68	0,00	0,00

Na parte da noite (Tabela 9) e de madrugada (Tabela 10) o erro do tipo 3 passou a ser mais frequente nos níveis 1-2 e 1-3. O erro do tipo 3 ocorre quando a energia disponível ($R_n - G$) é menor que zero, ou seja, na parte do pôr do Sol e noturna do dia, quando os gradientes de temperatura e umidade relativa do ar apresentam menores valores. Os erros tipos 1, 2 e 4, que estão relacionados à inconsistência no sinal dos fluxos e dos gradientes, não foram observados em nenhuma análise destes dois períodos do dia.

Tabela 10. Frequência dos erros (%) em relação ao nível e ao mês analisado, na parte da madrugada (0h às 6h).

	NÍVEL	ERRO TIPO 1	ERRO TIPO 2	ERRO TIPO 3	ERRO TIPO 4	ERRO TIPO 5
JUNHO	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	21,62
	2-3	0,00	0,00	5,40	0,00	7,21
	1-3	0,00	0,00	6,31	0,00	0,00
JULHO	1-2	0,00	0,00	1,75	0,00	21,30
	2-3	0,00	0,00	2,08	0,00	14,45
	1-3	0,00	0,00	5,31	0,00	1,61
AGOSTO	1-2	0,00	0,00	4,10	0,00	10,01
	2-3	0,00	0,00	2,49	0,00	20,97
	1-3	0,00	0,00	7,86	0,00	3,09
SETEMBRO	1-2	0,00	0,00	9,03	0,00	8,06
	2-3	0,00	0,00	0,83	0,00	24,10
	1-3	0,00	0,00	12,36	0,00	2,50
OUTUBRO	1-2	0,00	0,00	12,03	0,00	1,34
	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	25
	1-3	0,00	0,00	13,10	0,00	0,00
NOVEMBRO	1-2	0,00	0,00	13,61	0,00	0,28
	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00
	1-3	0,00	0,00	13,89	0,00	0,00
DEZEMBRO	1-2	0,00	0,00	18,08	0,00	0,87
	2-3	0,00	0,00	0,07	0,00	24,93
	1-3	0,00	0,00	18,82	0,00	0,00

De maneira geral, observando-se todas as tabelas de frequência de erro acima, o nível mais recomendado para aplicar no método da Razão de Bowen, caso houvesse a necessidade de utilizar somente um nível, seria o 1-3, pois este apresentou menores frequências de erro tipo 5, ou seja, o gradiente de temperatura do ar e pressão de vapor d'água neste nível foi suficiente e o mais adequado dos três níveis avaliados.

Carmo et al. (2017) também desenvolveram um trabalho em que foi estimado o balanço de energia pelo método da Razão de Bowen e também pelo método das correlações turbulentas, e os erros gerados pela aplicação do BERB foram avaliados para um campo de produção de cultura da cana-de-açúcar da Usina Agroindústrias do Vale do São Francisco (AGROVALE). Para a análise de consistência dos dados, foram utilizados os critérios propostos por Perez et al. (1999). Depois de realizada a análise, verificou-se que para todo o ciclo da cana, 56,8 % dos dados foram considerados consistentes.

Os autores observaram que a fase F1 (fase de brotação e estabelecimento da cultura) não apresentou dias inválidos, enquanto a F4 (maturação fisiológica) foi a fase mais afetada, tendo 50 % dos dias sido considerados inválidos. A fase F3 (crescimento máximo) apresentou os menores valores de β , assim como maior número de dias considerados inválidos (50 dias), o que representou 68,5 % do total de dias desconsiderados. Isso se deve ao tombamento característico da cana, que pode ocorrer nessa fase fenológica, o que implica no aumento da distância entre o dossel da cultura e os psicrômetros instalados para o sistema BERB,

reduzindo o gradiente de temperatura do ar e, em menor expressão, o gradiente da temperatura de bulbo úmido. O tipo de erro mais comum na análise dos dados foi o do tipo “C” (“C” = $(R_n - G) < 0; \Delta e > 0; \beta > -1 - |\epsilon|$), que totalizou 25,6 % da frequência no ciclo. 19,2 % dos dados analisados do ciclo da cana se encaixaram na problemática da precisão dos instrumentos no estudo.

4.2 Componentes do Balanço de Energia – Razão de Bowen

O balanço de energia foi satisfeito para os níveis 1-2 e 1-3, em todos os meses avaliados (desde final de junho a dezembro), como se pode observar na Figura abaixo (Figura 9) e conforme o método demanda que seja realizado. Na Figura 9, tem-se a soma dos fluxos de calor (latente e sensível – $LE + H$) em relação à energia disponível no ambiente (saldo de radiação menos o fluxo de calor no solo – $R_n - G$). O método de correlações de vórtices turbulentos, que também é um método micrometeorológico, geralmente não tem o fechamento do balanço satisfeito, por exemplo. O nível 2-3 teve poucas observações válidas e não pode se encaixar nesta afirmação, sendo assim desconsiderado nas análises.

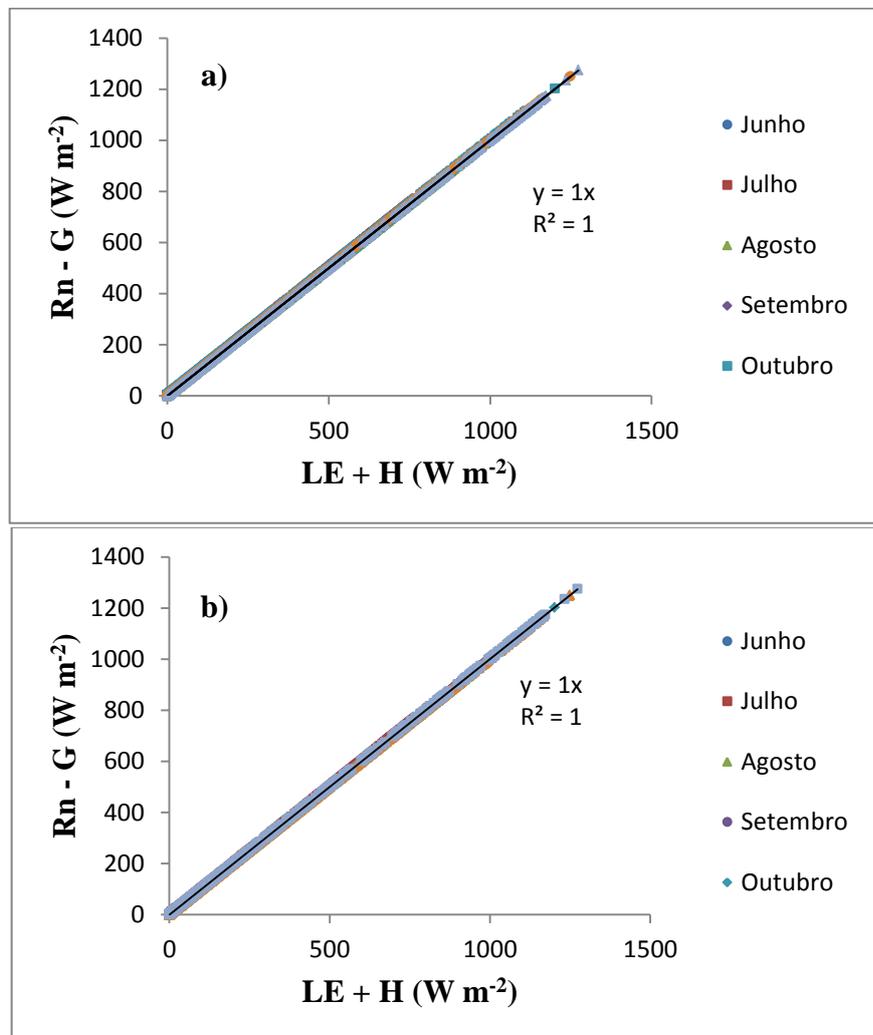


Figura 9. Gráficos representando o fechamento do balanço de energia para os níveis 1-2 (a) e 1-3 (b), em que se tem os fluxos de energia ($LE + H$) versus a energia disponível ($R_n - G$).

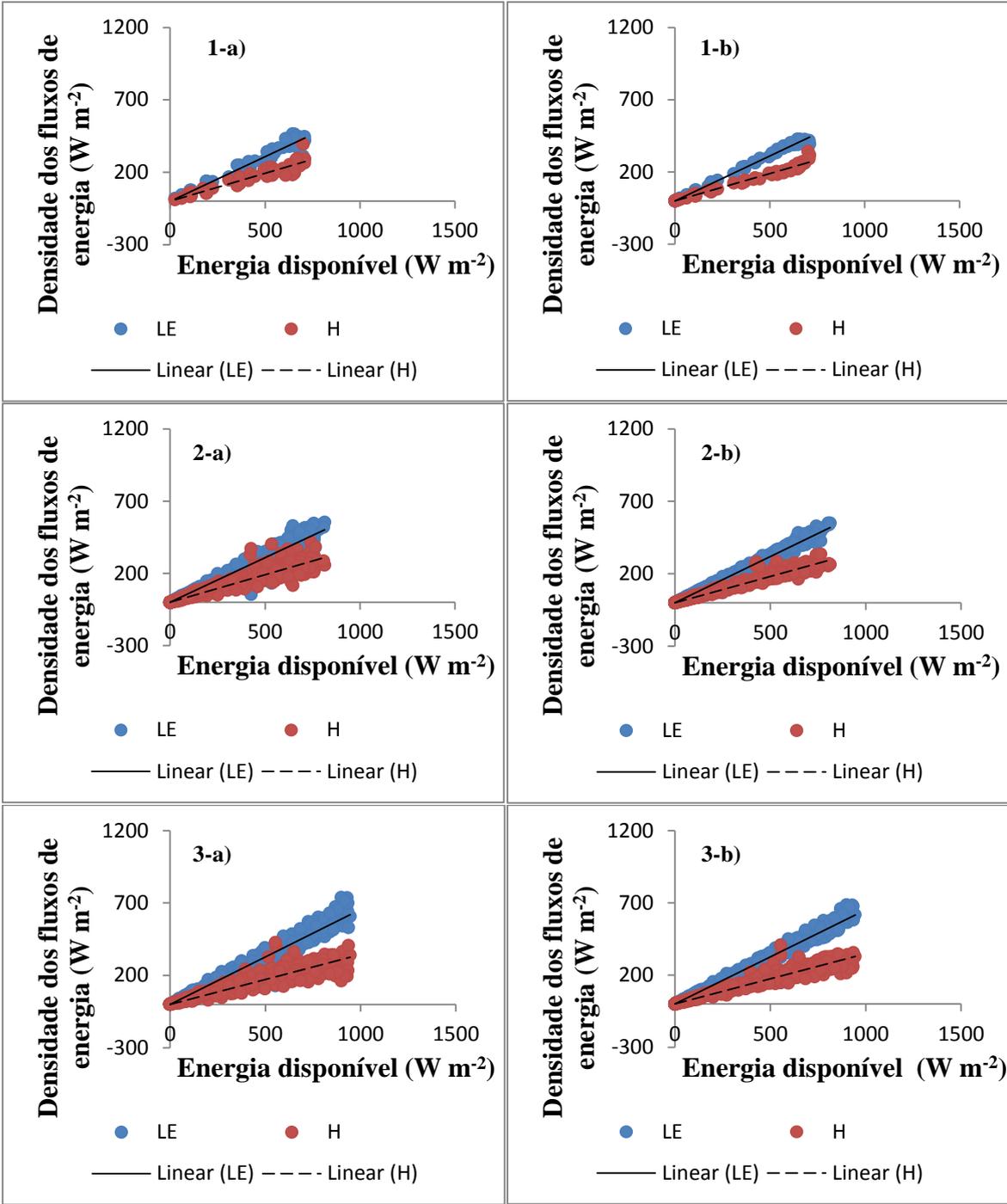
A partição do fluxo de calor latente foi maior em todos os meses e níveis avaliados apresentou mais de 60 % da energia disponível ($ED = R_n - G$) no ambiente em todos os meses nos níveis 1-2 e 1-3, enquanto o fluxo de calor sensível apresentou partições de aproximadamente 30 % da ED, como é possível verificar na Tabela 11, ou também na Figura 10. Portanto, notou-se que a maior parte da energia disponível em todos os meses destinou-se a evapotranspiração e à menor parte foi destinada ao aquecimento do ar (calor sensível).

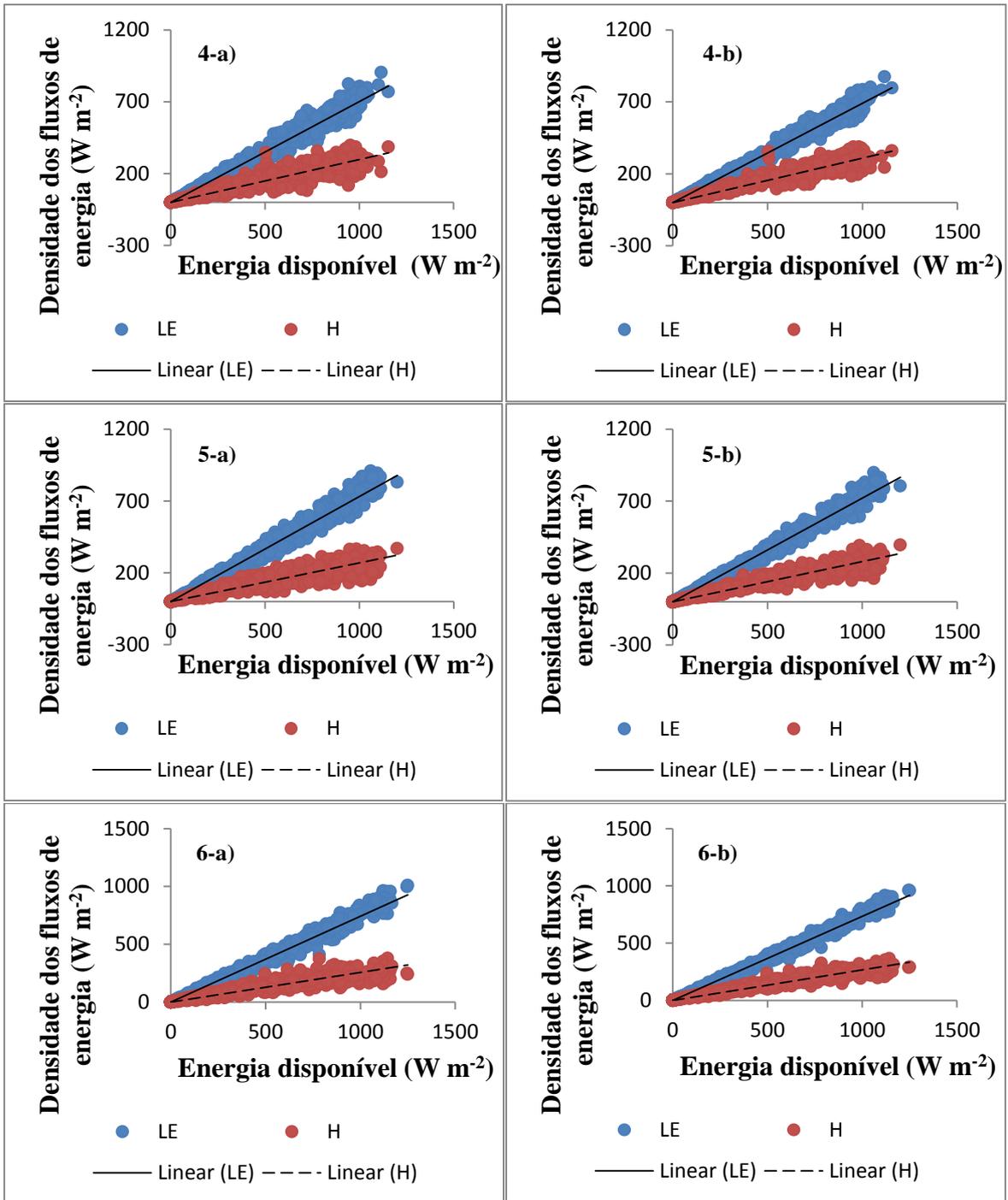
Santos (2010) também verificou em seu trabalho para a estimativa do balanço de energia para a cultura da cana-de-açúcar em Alagoas no período chuvoso da região, que a maior parte da energia disponível foi utilizada para o processo de evapotranspiração (75 %), enquanto que 25 % da ED foi utilizada no processo de aquecimento do ar.

Tabela 11. Relação fluxo de calor latente x Energia disponível [$LE/(R_n-G)$], relação fluxo de calor sensível x Energia disponível [$H/(R_n-G)$] e seus respectivos coeficientes de determinação (r^2), de acordo com o mês e nível estudados.

	NÍVEL	LE/(R _n -G)	r ²	H/(R _n -G)	r ²
JUNHO	1-2	61,39	0,9419	38,61	0,8672
	1-3	62,11	0,9924	37,89	0,9803
JULHO	1-2	61,80	0,9676	38,20	0,9125
	1-3	63,81	0,9947	36,19	0,9832
AGOSTO	1-2	65,59	0,9782	34,41	0,9178
	1-3	65,25	0,9902	34,75	0,9649
SETEMBRO	1-2	70,20	0,9802	29,80	0,8897
	1-3	69,08	0,9872	30,92	0,9349
OUTUBRO	1-2	73,12	0,9847	26,88	0,8843
	1-3	71,97	0,9900	28,03	0,9323
NOVEMBRO	1-2	74,31	0,9881	25,69	0,8981
	1-3	73,41	0,9937	26,59	0,9500
DEZEMBRO	1-2	76,32	0,9891	23,68	0,8811
	1-3	74,83	0,9929	25,17	0,9340

Os coeficientes de determinação para as relações fluxo de calor latente *versus* energia disponível [$LE/(R_n-G)$] e relação fluxo de calor sensível x energia disponível [$H/(R_n-G)$] apresentaram valores altos (Tabela 11). Quanto mais próximo de 1,00 o r^2 for, mais preciso e exato é o modelo. Para o nível 1-3 no mês de julho, o r^2 de [$LE/(R_n-G)$] chegou a 0,9947, e para [$H/(R_n-G)$], chegou-se a obter r^2 igual a 0,9832 também para o mês de julho, nível 1-3.





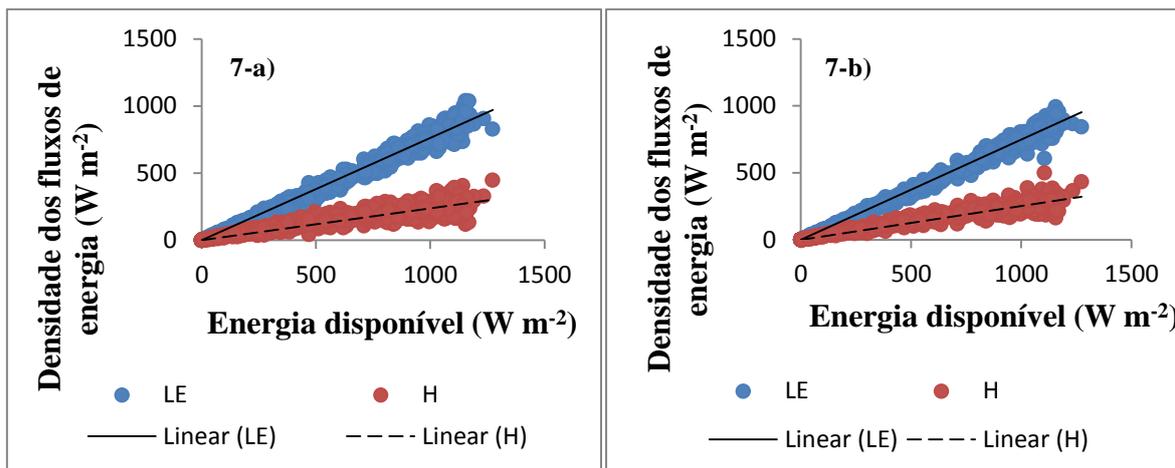


Figura 10. Representação gráfica da relação fluxo de calor latente x Energia disponível [$LE/(R_n-G)$] e da relação fluxo de calor sensível *versus* energia disponível [$H/(R_n-G)$], nos meses de junho a dezembro, numerados de 1 a 7, respectivamente, para os níveis 1-2 (a) e 1-3 (b).

Verificou-se que na primavera (setembro - novembro) a partição do fluxo de calor latente apresentou aumento significativo. Isto ocorre porque há maior disponibilidade de radiação solar nesta época do ano em relação ao inverno e também pela maior disponibilidade de água, o que faz com o o solo e a planta percam mais água em sua forma de vapor, em que esta mudança de fase da água líquida para vapor é o fluxo de calor latente. Logo, com o aumento da disponibilidade de água e radiação solar, maior será LE.

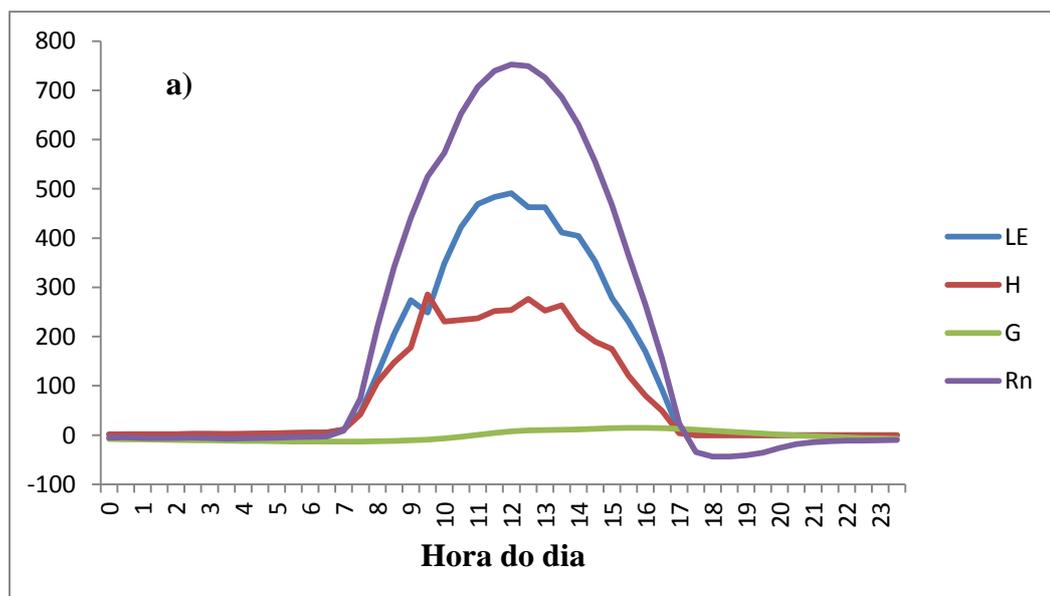
Machado et al. (2016) e Souza et al. (2007) também encontraram valores maiores de LE nas estações chuvosas, para área arbustiva alagável composta por *Combretum lanceolatum Pohl* no Pantanal Mato-grossense e na cultura da soja (*Glycine Max (L.) Merryl*), variedade Candeias, em áreas de avanço de fronteira agrícola na Amazônia, respectivamente, utilizando o método da Razão de Bowen para a estimativa dos fluxos de calor.

Foi verificada também a diferença relativa (DR) entre níveis nas partições em relação à energia disponível. Os valores de DR foram considerados baixos, variando de 0,52 a 3,15 % para $LE/(R_n-G)$ e de 0,98 a 5,92 % para $H/(R_n-G)$ (Tabela 12), o que indicou que as medições foram realizadas dentro da camada limite de equilíbrio.

Tabela 12. Diferença relativa (DR) entre níveis, nas partições de LE e H em relação à energia disponível (R_n-G).

	NÍVEL	LE/ (R_n-G)	DR (%)	H/ (R_n-G)	DR (%)
JUNHO	1-2	61,39	1,16	38,61	1,86
	1-3	62,11		37,89	
JULHO	1-2	61,80	3,15	38,20	5,26
	1-3	63,81		36,19	
AGOSTO	1-2	65,59	0,52	34,41	0,98
	1-3	65,25		34,75	
SETEMBRO	1-2	70,20	1,60	29,80	3,62
	1-3	69,08		30,92	
OUTUBRO	1-2	73,12	1,57	26,88	4,10
	1-3	71,97		28,03	
NOVEMBRO	1-2	74,31	1,21	25,69	3,38
	1-3	73,41		26,59	
DEZEMBRO	1-2	76,32	1,95	23,68	5,92
	1-3	74,83		25,17	

A Figura 11 mostra o padrão de variação das outras componentes do balanço de energia em dois dias distintos, a primeira (a) no período do inverno, no dia 15 de julho, e a segunda (b) na primavera, no dia 15 de outubro. Independente do mês, pode-se observar que as partições dos fluxos de calor latente e sensível são diretamente dependentes da radiação solar global (R_n). À medida que esta aumenta, LE e H também aumentam. A componente que possui menor participação no balanço de energia é o fluxo de calor no solo (G).



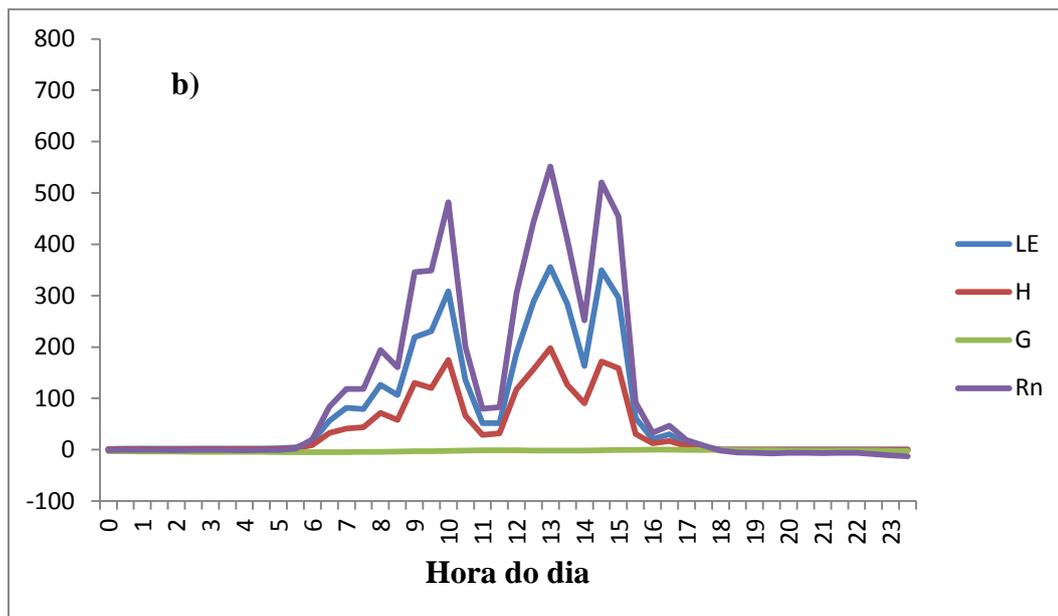


Figura 11. Componentes do balanço de energia, nos dias 15 de julho (a) e 15 de outubro (b).

Verificou-se também que na Figura 11 (a) as componentes do balanço de energia apresentaram comportamento esperado, com aumento na parte diurna e diminuição na parte noturna. Porém na Figura 11 (b), há uma queda brusca nas componentes Rn, LE e H por volta de meio-dia. De acordo com dados coletados no pluviômetro instalado em uma estação meteorológica automática na REGUA, houve a ocorrência de precipitação neste horário para este dia. Com o céu com nebulosidade, menor a Rn e, conseqüentemente, menor LE e H.

4.3 Evapotranspiração Real pelo BERB e Evapotranspiração de Referência por Penman-Monteith

As estimativas de ETR na escala diária para os níveis 1-2 e 1-3 resultaram em valores muito próximos entre os níveis, como se pode observar na Figura 12, o que corrobora que as medidas para a estimativa de ETR foram realizadas no interior da camada limite.

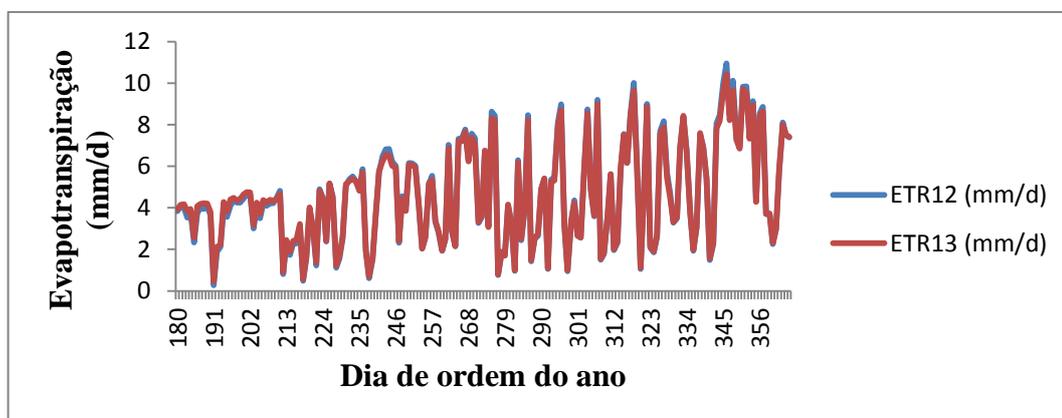


Figura 12. Evapotranspiração real da pastagem, para os níveis 1-2 (ETR12) e 1-3 (ETR13), em relação ao dia de ordem do ano.

Analisando ETR e ET_o , que foi estimada pelo método padronizado do boletim FAO-56, verificou-se que as estimativas de ETR pelo BERB apresentam valores superiores em relação à ET_o (Figura 13).

Em Silva et al. (2016), ET_o estimada pelo método da Razão de Bowen foi comparada à ET_o por Penman-Monteith e às medidas realizadas por um lisímetro de pesagem, em uma área cultivada por grama batatais, em Piracicaba, SP. De maneira geral, a tendência dos métodos foi de superestimar as medidas do lisímetro, entre 1 e 5 % em relação a Penman-Monteith e ao BERB. No caso de ET_o por FAO-56 em relação a ET_o pelo BERB, houve subestimativa de ET_o por FAO-56 de aproximadamente 3,4 %.

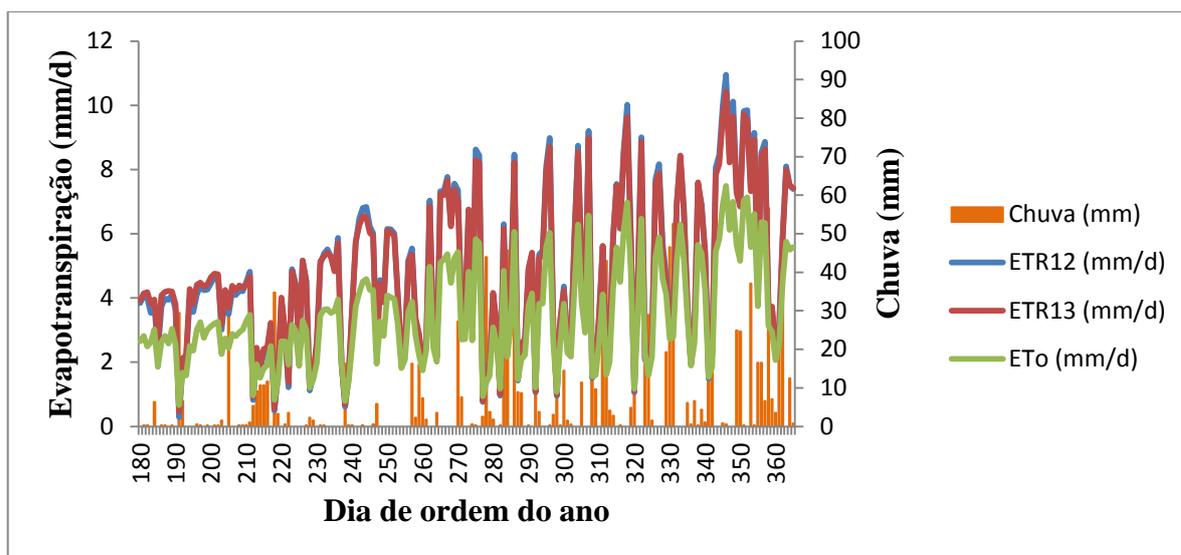


Figura 13. Evapotranspiração real para os níveis 1-2 (ETR12) e 1-3 (ETR13), evapotranspiração de referência (ET_o) e a precipitação, em relação ao dia de ordem do ano.

Conforme nota-se na Figura 13 e também nas Tabelas 13 e 14, os valores de ETR e ET_o apresentaram tendência de aumento nos meses da primavera e do verão (dezembro). Como a evapotranspiração é influenciada, dentre outros fatores, pela disponibilidade de água no ambiente e de energia solar, ET apresentou sazonalidade, isto é, com a chegada da primavera e do verão, que são estações que dispõem de maior radiação solar e com presença de taxas pluviométricas também mais elevadas (Figura 14), tanto as estimativas de ETR quanto de ET_o resultaram em valores mais altos nesta época do ano. Duffková, Zajíček & Nováková (2011) e Minderlein & Menzel (2014) também obtiveram maiores valores de ETR obtidos pelo método da Razão de Bowen no verão em seus estudos, o primeiro realizado para uma área predominantemente agrícola na República Tcheca, e o segundo em área coberta por estepe e arbustos na Mongólia. Mendonça & Dantas (2010) também verificaram valores mais elevados de ET_o nesta estação, para o município de Capim, no estado da Paraíba, Brasil, região que possui grande potencial para o cultivo da cana-de-açúcar.

Na Tabela 13 também foram calculados o desvio padrão dos valores médios da ETR e ET_o e o coeficiente de variação (CV) para cada mês avaliado. Notou-se que os valores de CV para o mês de junho foram baixos em relação aos outros meses, devido a pouca quantidade de dados observados neste mês.

Tabela 13. Valores médios da evapotranspiração real (mm d^{-1}) para cada mês avaliado, estimada pelo método da Razão de Bowen para os dois níveis estudados, da evapotranspiração de referência (mm d^{-1}) pelo método de Penman-Monteith e seus respectivos valores de desvio padrão (valores entre parêntesis) e coeficiente de variação (CV).

Mês	ETR12 (mm d^{-1})	CV (%)	ETR13 (mm d^{-1})	CV (%)	ET _o (mm d^{-1})	CV (%)
JUN	3,96 ($\pm 0,16$)	4,02	4,03 ($\pm 0,15$)	3,81	2,73 ($\pm 0,12$)	4,31
JUL	3,65 ($\pm 1,08$)	29,72	3,81 ($\pm 1,07$)	28,10	2,61 ($\pm 0,66$)	25,25
AGO	3,46 ($\pm 1,87$)	53,93	3,49 ($\pm 1,78$)	51,14	2,55 ($\pm 1,04$)	40,66
SET	4,91 ($\pm 1,99$)	40,44	4,85 ($\pm 1,91$)	39,30	3,58 ($\pm 1,21$)	33,81
OUT	4,23 ($\pm 2,62$)	61,93	4,20 ($\pm 2,52$)	60,13	3,25 ($\pm 1,67$)	51,54
NOV	5,16 ($\pm 2,66$)	51,55	5,12 ($\pm 2,58$)	50,37	3,95 ($\pm 1,77$)	44,77
DEZ	6,52 ($\pm 2,81$)	43,18	6,42 ($\pm 2,69$)	41,84	4,87 ($\pm 1,80$)	37,02

Tabela 14. Valores da evapotranspiração real acumulada mensal (mm) estimada pelo método da Razão de Bowen para os dois níveis estudados, da evapotranspiração de referência acumulada mensal (mm) pelo método de Penman-Monteith e da precipitação acumulada (Chuva, mm), número de dias com chuva e a magnitude (chuva acumulada/número de dias com chuva, mm d^{-1}).

Mês	ETR12 (mm)	ETR13 (mm)	ET _o (mm)	Chuva acumulada (mm)	Dias com chuva	Magnitude (mm d^{-1})
JUNHO	7,91	8,06	5,47	0,3	1	0,3
JULHO	113,08	118,13	80,77	85,1	19	4,5
AGOSTO	107,27	108,10	78,97	105,9	17	6,2
SETEMBRO	147,31	145,49	107,38	88,4	10	8,8
OUTUBRO	131,28	130,07	100,63	244,6	22	11,1
NOVEMBRO	154,83	153,57	118,43	324,6	16	20,3
DEZEMBRO	202,01	199,01	150,97	339,3	25	13,6

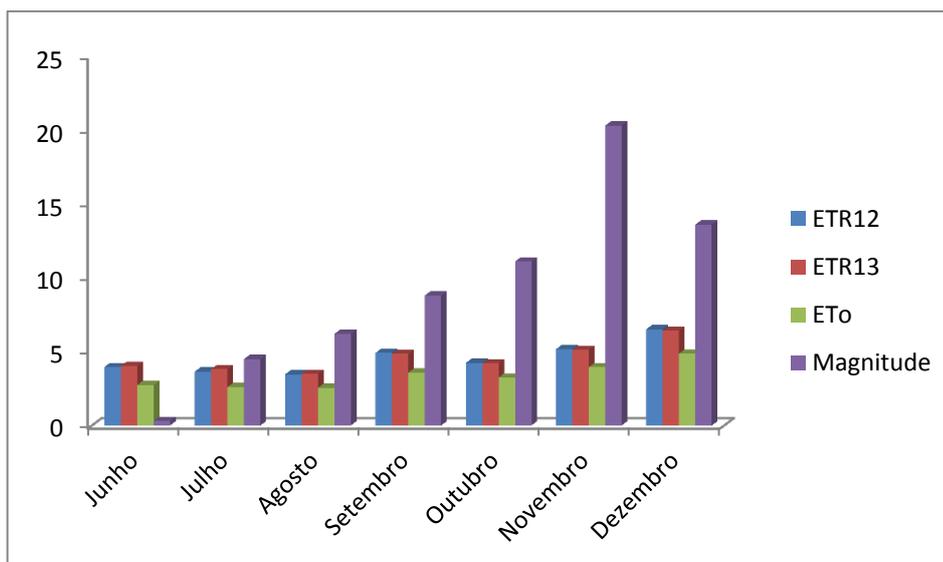


Figura 14. Evapotranspiração real (ETR), evapotranspiração de referência (ET_o) e magnitude em escala mensal.

Também foi avaliada a relação ETR/ET_o para a pastagem, valor este que representa $K_s \times K_c$ da cultura. Não houve grande divergência nos valores entre ETR_{12}/ET_o e ETR_{13}/ET_o , conforme mostra a Figura 15. Os resultados desta relação em escala mensal não ultrapassaram 1,5, conforme recomenda o boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), o que também confirma que as medidas realizadas para as estimativas da evapotranspiração real foram realizadas dentro da camada limite interna (Tabela 15). Portanto, os dois métodos apresentaram desempenho significativo para a estimativa da evapotranspiração da pastagem.

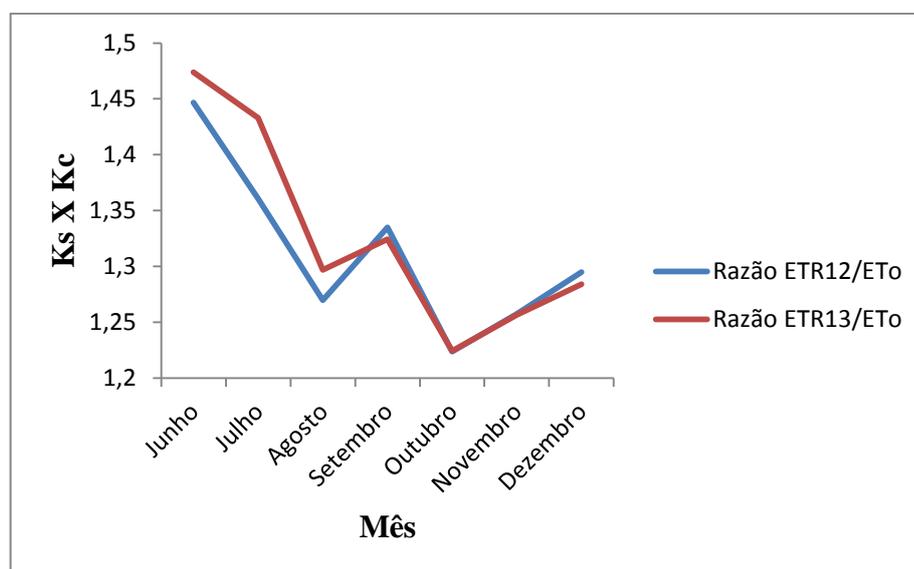


Figura 15. Variação mensal da relação entre evapotranspiração real e de referência para os dois níveis de medida considerados (1-2 e 1-3).

Tabela 15. Razão evapotranspiração real/ evapotranspiração de referência ($K_s \times K_c$) para os dois níveis avaliados no BERB.

Mês	Razão ETR12/ET_o	Razão ETR13/ET_o
JUNHO	1,45	1,45
JULHO	1,36	1,43
AGOSTO	1,27	1,30
SETEMBRO	1,34	1,32
OUTUBRO	1,22	1,22
NOVEMBRO	1,26	1,26
DEZEMBRO	1,30	1,28

Houve diminuição dos valores da relação $K_s \times K_c$ de junho/julho para os meses seguintes, conforme pode-se notar na Figura 15 e na Tabela 15. K_s é o coeficiente de redução por estresse hídrico, portanto este decréscimo pode ocorrer devido às taxas pluviométricas mais elevadas com a chegada da primavera e do verão (estações chuvosas), somado ao fato do lençol freático da área de estudo ser elevado.

5 CONCLUSÕES

Com base nos critérios de seleção das observações válidas para aplicação do método do balanço de energia – razão de Bowen, verifica-se que a maior parte dos dados que foram desconsiderados no método do Balanço de Energia - Razão de Bowen foram dados do período noturno, e nos horários próximos ao nascer e pôr do Sol.

Com relação aos erros, o tipo de erro mais comum de maneira geral para os níveis 1-2 e 1-3 foi o tipo 3. Para o nível 2-3, o erro mais comum foi o do tipo 5, o que resultou na desconsideração deste nível para outras análises, já que este apresenta baixos gradientes de pressão de vapor d'água suficiente para gerar dados consistentes.

A partição do fluxo de calor latente em relação à energia disponível apresenta aumento na primavera e no verão, devido a maior disponibilidade de radiação solar nesta época do ano. Isto faz com que o solo e a planta transfiram mais água em forma de vapor para a atmosfera, e esta mudança de fase da água líquida para vapor representa o fluxo de calor latente. Por isso, com o aumento da disponibilidade da energia solar, maior o fluxo de calor latente.

Concluiu-se que a evapotranspiração real estimada pela Razão de Bowen e a evapotranspiração de referência estimada por Penman-Monteith também resultaram em maiores valores na época da primavera e verão, devido à maior disponibilidade de energia solar e água no solo e no ambiente, o que condiciona os resultados da evapotranspiração. Além disso, os dois métodos apresentaram desempenho satisfatório quando aplicados à pastagem, para a região de Cachoeira de Macacu, estado do Rio de Janeiro, sendo atestado que o balanço de energia – Razão de Bowen aplicado à área de estudo atende às particularidades do método, com os instrumentos instalados e suas medidas realizadas dentro da camada limite interna.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANJOS, A. W. dos; DELGADO, R. C.; LYRA, G. B.; SOUZA, L. P. de; SUHETT, E. R. Evapotranspiração a partir de produtos orbitais para o estado do Rio de Janeiro. **Irriga, Botucatu**, v. 1, n. 01, p.126-140, 2016.
- BEZERRA, B. D.; SILVA, B. D.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BIUDES, M. S.; VALENTINI, C. M. A.; JÚNIOR, J. H. C.; NOGUEIRA, J. S. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de Bowen e Penman-Monteith. **Ciência e Natura**, v. 30, n. 1, p. 71-86, 2008.
- BIUDES, M. S.; JÚNIOR, J. H. C.; NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 135-143, 2009.
- BOWEN, I.S. The rate of heat losses by conduction and by evaporation from any water surfaces. **Physical Review**, New York, v. 27, p. 779 – 787, 1926.
- CALLEJAS, I. J. A.; NOGUEIRA, M. C. de J. A.; BIUDES, M. S.; DURANTE, L. C. Variação sazonal do balanço de energia em cidade localizada na região central do Brasil. **Mercator**, Ceará, v. 15, n. 3, p.85-106, 2016.
- CARMO, J. F. A. do; MOURA, M. S. B. de; SILVA, T. G. F. da; SOUZA, L. S. B. de; LEITÃO, M. de M. V. B. R. Balanço de energia e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar por dois métodos micrometeorológicos. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.25, n.1, p.101-111, 2017.
- CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p.1-11, 2015.
- CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. **Hidrologia**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006. 115 p.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. **Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 8 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/541867/roteiro-de-calculo-da-evapotranspiracao-de-referencia-pelo-metodo-de-penman--monteith-fao>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

CRISPIM, S. M. A.; BRANCO, O. D. Aspectos gerais das braquiárias e suas características na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, MS. **Embrapa Pantanal-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2002.

CRUZ, P. G. da. **Produção de forragem em *Brachiaria brizantha*: adaptação, geração e avaliação de modelos empíricos e mecanicistas para estimativa do acúmulo de forragem**. 2010. 103 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

CUNHA, A. P. M. do A.; ALVALÁ, R. C. dos S.; OLIVEIRA, G. S. de. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p.139-152, 2013.

DUFFKOVÁ, R.; ZAJÍČEK, A.; NOVÁKOVÁ, E. Actual Evapotranspiration from Partially Tile-drained Fields as Influenced by Soil Properties, Terrain and Crop. **Soil and Water Research**, Prague-zbraslav, v. 6, n. 3, p.131-146, 2011.

EMBRAPA. CLIMA. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

FURTADO, T. F. **Comparação de modelos para estimativa do conteúdo de água no solo em cultivo de milho no município de Arapiraca, AL**. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biosistemas, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

HARDING, R. J.; LLOYD, C. R. Evaporation and energy balance of a wet grassland at Tadhams Moor on the Somerset Levels. **Hydrological Processes**, United Kingdom, v. 22, n. 13, p.2346-2357, 2008.

IRMAK, S.; SKAGGS, K. E.; CHATTERJEE, S. A Review of the Bowen Ratio Surface Energy Balance Method for Quantifying Evapotranspiration and other Energy Fluxes. **Transactions of The Asabe**, [s.l.], v. 57, n. 6, p.1657-1674, 2014.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura “dual” padrão boletim FAO-56. **STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, Piracicaba, v. 25, p.40 – 43, 2007b.

LYRA, G.B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. de.; SANTOS, M. A. dos. Balanço Sequencial de Água no Solo para o Manejo da Irrigação de Baixa Frequência e Alta Intensidade na Cana-de-Açúcar. **STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, v. 28, p. 30-33, 2010.

LYRA, G.B.; SEDIYAMA, G. C.; LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SOUZA, E. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura "único" padrão boletim FAO-56. **STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil**, v. 25, p. 40-43, 2007.

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; ANGELINI, L. P.; MÜTZENBERG, D. M. de S.; NASSARDEN, D. C. S.; BILIO, R. de S.; SILVA, T. J. A. da; NEVES, G. A. R.; ARRUDA, P. H. Z. de; NOGUEIRA, J. de S. Sazonalidade do Balanço de Energia e Evapotranspiração em Área Arbustiva Alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p.82-91, 2016.

MELLO, G. J.; BIUDES, M. S.; GOMES, R. S. R.; MACHADO, N. G.; PEREIRA, O. A.; NOGUEIRA, J. de S. Fractal dimension of micrometeorological variables series in a floodplain forest in the Pantanal of Mato Grosso. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.38 n.1, p. 125 – 136, 2016.

MENDONÇA, E. A., DANTAS R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p.196-202, 2010.

MINDERLEIN, S.; MENZEL, L. Evapotranspiration and energy balance dynamics of a semi-arid mountainous steppe and shrubland site in Northern Mongolia. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 73, n. 2, p.593-609, 2014.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. **Principles of Environmental Physics**. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Oxford. 1990.

Natural Resources Management and Environment Department. **Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, 595 – 598, 1982.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, n. 1-2, p. 131-143, 1996.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2007. 192p.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G.C.; VILLA NOVA, N.A. **Evapotranspiração**. 1a ed. Campinas: Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola, v.500, p.323, 2013.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBANEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.

RIBEIRO, T. B.; LIMA, W. M. de; RIBEIRO, F. M.; BUSO, W. H. D. Características forrageiras de algumas gramíneas do gênero *Brachiaria* - revisão de literatura. **Nutritime**, Viçosa, v. 13, n. 4, p.4773-4780, 2016.

RODRIGUES, D. de C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex. A. Rich) Stapf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas.** 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment.** 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.

SANTOS, M. A. **Balanco de radiação, energia e água em cana-de-açúcar na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.** 2010. 57p. Trabalho de Conclusão de Curso – UFAL - CECA, Rio Largo, 2010.

SAVAGE, M. J.; EVERSON, C. S.; METELERKAMP, B. R. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. **Journal Of Hydrology**, South Africa, v. 376, n. 1-2, p.249-260, 2009.

SILVA, L. D. B. **Evapotranspiração do capim tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem.** 2003. 104 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.

SILVA, L. D. B. da; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F. de, NASCENTES, A. L.; ALMEIDA, G. V. de; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia – razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 516-529, 2016.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola** (Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering), Jaboticabal, v.25, n.3, p.705-712, 2005.

SILVA, S. F. & FERRARI, J.L. Descrição botânica, distribuição geográfica e potencialidades de uso da *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex. A. Rich) Stapf. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, N.14; p.302. 2012.

SILVA, V. P. R. da; GARCÊZ, S. L. A.; SILVA, B. B. da; ALBUQUERQUE, M. F. de; ALMEIDA, R. S. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p.411-417, 2015.

SOUZA, P. J. O. P. de; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. da; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C.; SOUSA, A. M. L. Balanço de energia na soja em área de fronteira agrícola na Amazônia. **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Sergipe, 2007.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance.** Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. 8, n.1).

UNLAND, H. E.; HOUSER, P.R.; SHUTTLEWORTH, W.J.; YANG, Z. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119 – 153, 1996.

VALLORY, N. D.; DOHLER, R. E.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 2, p.576-585, 2016.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, 2006. 463 p.

7 ANEXOS

A - Rotina de cálculos utilizada para estimar ETR no *software* OpenModel, versão 2.4.1

B - Rotina de cálculos utilizada para estimar ET_o no *software* OpenModel, versão 2.4.1

Anexo A - Rotina de cálculos utilizada para estimar ETR no *software* OpenModel, versão 2.4.1

```
// Balanço de ondas curtas
Month = Data1.Month(t)
Day = Data1.Day(t)
Year = Data1.Year(t)
Hour = Data1.Hour(t)
Tar1 = Data1.Tar1(t)
Tar2 = Data1.Tar2(t)
UR1 = Data1.UR1(t)
UR2 = Data1.UR2(t)
G1 = Data1.G1(t)
G2 = Data1.G2(t)
Qn = Data1.Qn(t)

// Dia de ordem do ano - DJ
if Month > 2
  if Year-4*trunc(Year/4) = 0
    DJ = trunc(275*Month/9-30+Day)-2+1
  else
    DJ = trunc(275*Month/9-30+Day)-2
  endif
else
  if Year-4*trunc(Year/4) = 0
    DJ = trunc(275*Month/9-30+Day)+1
  else
    DJ = trunc(275*Month/9-30+Day)
  endif
endif

// Fluxo de calor no solo
G = (G1 + G2)/2

// Razão de Bowen
Patm = 101.3*((293-0.0065*Alt)/293)^5.26

lamb = 2.45

CPsi = (Cp*Patm)/(0.622*lamb)
```

```
// Pressão de saturação e parcial do vapor d'água do ar
```

```
es_v1 = 0.6108*exp(17.27*Tar1/(237.3+Tar1))
```

```
ea1 = UR1*es_v1/100
```

```
es_v2 = 0.6108*exp(17.27*Tar2/(237.3+Tar2))
```

```
ea2 = UR2*es_v2/100
```

```
if (ea1-ea2) = 0
```

```
    Bowen = -1
```

```
    epron = 0.5
```

```
    else
```

```
    Bowen = CPsi*(Tar1-Tar2)/(ea1-ea2)
```

```
    RBowen = 1/(1+Bowen)
```

```
    epron = (deltae + CPsi * deltat)/(ea1-ea2)
```

```
endif
```

```
CrBowen = ((ea1-ea2)+CPsi*(Tar1-Tar2))/(Qn-G)
```

```
Li = -1 - abs (epson)
```

```
Ls = -1 + abs (epson)
```

```
if Bowen < Ls
```

```
    if Bowen > Li
```

```
        TypErr = 5
```

```
        Cond = 0
```

```
    else
```

```
        if (Qn - G) > 0
```

```
            if (ea1-ea2) > 0
```

```
                if Bowen > -1
```

```
                    Cond = 1
```

```
                    TypErr = 0
```

```
                    LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
```

```
                    H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
```

```
                else
```

```
                    TypErr = 1
```

```
                    Cond = 0
```

```
                endif
```

```
            else
```

```
                if Bowen < -1
```

```
                    Cond = 2
```

```
                    TypErr = 0
```

```
                    LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
```

```
                    H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
```

```
                else
```

```
                    TypErr = 2
```

```
                    Cond = 0
```

```

    endif
endif
else
if (ea1-ea2) > 0
    if Bowen < -1
        Cond = 3
        TypErr = 0
        LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
        H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
    else
        TypErr = 3
        Cond = 0
    endif
else
    if Bowen > -1
        Cond = 4
        TypErr = 0
        LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
        H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
    else
        TypErr = 4
        Cond = 0
    endif
endif
endif
endif
else
if (Qn - G) > 0
    if (ea1-ea2) > 0
        if Bowen > -1
            Cond = 1
            TypErr = 0
            LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
            H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
        else
            TypErr = 1
            Cond = 0
        endif
    else
        if Bowen < -1
            Cond = 2
            TypErr = 0
            LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
            H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
        else
            TypErr = 2
            Cond = 0
        endif
    endif
endif
endif
endif

```

```

endif
else
if (ea1-ea2) > 0
if Bowen < -1
Cond = 3
TypErr = 0
LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
else
TypErr = 3
Cond = 0
endif
else
if Bowen > -1
Cond = 4
TypErr = 0
LE = (Qn-G)/(1+Bowen)
H = (Bowen/(1+Bowen))*(Qn-G)
else
Cond = 0
TypErr = 4
endif
endif
endif
endif

if Cond = 2
if LE < 0
if H > 0
LE = LE
H = H
else
TypErr = 2
Cond = 0
endif
else
TypErr = 2
Cond = 0
endif
endif

if Cond = 3
if LE > 0
if H < 0
LE = LE
H = H
else

```

```

        Cond = 0
        Typerr = 3
    endif
else
    Cond = 0
    Typerr = 3
endif
endif

if Cond = 0
    H = 0
    LE = 0
endif

if RBowen < -1.5
    LE = 0
    H = 0
else
    if RBowen > 1.5
        LE = 0
        H = 0
    else
        LE = LE
        H = H
    endif
endif

// Evapotranspiração

ET = (LE/lamb*1E-6)*1800

if Hour > 6.0
    if Hour < 18.0
        if ET > 0
            ET = ET
        else
            ET = 0
        endif
    else
        ET = 0
    endif
else
    ET = 0
endif

ED = Qn-G

```

Anexo B - Rotina de cálculos utilizada para estimar ET_0 no *software* OpenModel, versão 2.4.1

// ET_0 para pastagem - REGUA/RJ

// Chamar os dados no Data Sheets

Month = Meteoro.Month(t)

Day = Meteoro.Day(t)

Year = Meteoro.Year(t)

tx = Meteoro.TX(t)

tn = Meteoro.TN(t)

Urx = Meteoro.URX(t)

Urn = Meteoro.URN(t)

uz = Meteoro.u2(t)

Rs = Meteoro.Rs(t)

// Dia de ordem do ano - doy

if Month > 2

if Year-4*trunc(Year/4) = 0

doy = trunc(275*Month/9-30+Day)-2+1

else

doy = trunc(275*Month/9-30+Day)-2

endif

else

if Year-4*trunc(Year/4) = 0

doy = trunc(275*Month/9-30+Day)+1

else

doy = trunc(275*Month/9-30+Day)

endif

endif

// TERMO AERODINÂMICO

tm = (tx + tn)/2

es = (0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/2

ea = (Urn * 0.6108* EXP (17.27*tx/(237.3+tx))+ Urx * 0.6108* EXP (17.27*tn/(237.3+tn)))/
200

S = 4098 * 0.6108* EXP (17.27*tm/(237.3+tm))/((237.3 + tm)^2)

Patm = 101.3*((293-0.0065*Z)/(293))^5.26

gama = 0.665E-3*Patm

$$u2 = uz * (4.87 / (\ln(67.8 * zz - 5.42)))$$

// TERMO RADIATIVO

// Radiação solar extraterrestre

$$dr = 1 + 0.033 * \cos(2 * \pi * \text{doy} / 365)$$

$$\text{decl} = 0.409 * \sin((2 * \pi * \text{doy} / 365) - 1.39)$$

$$ws = \arccos(-\tan(\text{fi} * \pi / 180) * \tan(\text{decl}))$$

$$Ra = 37.568 * dr * ((ws * \sin(\text{fi} * \pi / 180) * \sin(\text{decl})) + (\cos(\text{fi} * \pi / 180) * \cos(\text{decl}) * \sin(ws)))$$

// Balanço de radiação

$$Rso = (0.75 + 2E-5 * Z) * Ra$$

$$Rns = 0.77 * Rs$$

$$Rnl = 4.903E-9 * (((tx + 273.16)^4 + ((tn + 273.16)^4) / 2) * (0.34 - 0.14 * ea^{0.5}) * (1.35 * (Rs / Rso) - 0.35))$$

$$Rn = Rns - Rnl$$

// Evapotranspiração de referência

$$ETo_PM = (0.408 * S * Rn + \gamma * (900 / (tm + 273)) * u2 * (es - ea)) / (S + \gamma * (1 + 0.34 * u2))$$