

Equações simplificadas para evapotranspiração de referência diárias e subhorárias no sul do Brasil

Simplified equations for daily and subhourly reference evapotranspiration in southern Brazil

Gabrielly Cristhine Zwang Baptista¹ , Vander Kaufmann¹ , Heinz Borg² , Adilson Pinheiro¹ 

¹Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. E-mails: gabriellyzwangbaptista@gmail.com, vanderkaufmann@gmail.com

²Faculty of Natural Sciences III, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany. E-mails: lkkt@landw.uni-halle.de, pinheiro@furb.br

Como citar: Baptista, G. C. Z., Kaufmann, V., Borg, H., & Pinheiro, A. (2022). Equações simplificadas para evapotranspiração de referência diárias e subhorárias no sul do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e6. <https://doi.org/10.21168/REGA.V19E6>

Resumo: A evapotranspiração é um importante componente do ciclo hidrológico, consistindo na transferência do vapor de água em determinada área condicionada por suas características climatológicas e físicas. Processos hidrológicos em pequenas bacias ocorrem em escalas temporais reduzida, sendo necessária a utilização de dados em intervalos horários ou sub-horários. Os equipamentos de monitoramento são sensíveis, e com ausência ou deficiência de manutenção, podem ocasionar falhas nas séries temporais ou invalidar resultados. Assim, simplificações na equação de Penman-Monteith (PM, equação 1) na estimativa da evapotranspiração torna-se necessária. As simplificações adotadas foram: 1) dispensa dos dados de umidade, excluindo o termo aerodinâmico da equação PM (equação 2); 2) substituição da radiação líquida pela radiação global, de modo que a radiação de onda longa líquida não é calculada (equação 3); 3) omissão da velocidade do vento (equação 4). A equação 4 foi modificada, considerando o termo $s / (s + \gamma)$ (s : inclinação da curva de pressão vapor saturado e γ : constante psicrométrica) calculado pela temperatura média diária. O uso de qualquer equação simplificada, em geral, gera valores individuais de ET_0 menos precisos. No entanto, caso se deseja utilizar uma equação simplificada, as Equações 4 ou 4 modificada são a melhor escolha, dependendo se precisa de valores horários (ou de prazo mais curto) (4) ou apenas dados diários (4 modificada). Os valores de ET_0 calculados com estas equações são os mais próximos dos valores verdadeiros e exigem o mínimo de parâmetros de entrada.

Palavras-chave: evapotranspiração diária; ET_0 ; Penman-Monteith.

Abstract: Evapotranspiration is an important component of the hydrological cycle. It consists of the transfer of water vapor in a given area conditioned by its climatological and physical characteristics. Hydrological processes in small basins occur in reduced temporal scales, requiring the use of data in hourly or sub-hourly intervals. Monitoring equipment is sensitive. With absence or deficiency in maintenance, they can cause failures in the time series or invalidate results. Thus, simplifications in the complete Penman-Monteith equation (PM, equation 1) in estimating evapotranspiration becomes necessary. The simplifications adopted were: 1) dispensing with moisture data, excluding the aerodynamic term from the PM equation (equation 2); 2) replacement of net radiation by global radiation, so that net longwave radiation is not calculated (equation 3); 3) omission of wind speed (equation 4). Equation 4 was modified, considering the term $s / (s + \gamma)$ (s : slope of the saturated vapor pressure curve and γ : psychrometric constant) calculated by the daily average temperature. The use of any simplified equation usually yields individual ET_0 values less accurate. However, if you want to use a simplified equation, Equation 4 or 4 modified is the best choice, depending on whether you need hourly (or shorter term) values (4) or just daily data (4 modified). The ET_0 values calculated with these equations are the closest to the true values and require the least amount of input parameters.

Keywords: Daily evapotranspiration, ET_0 ; Penman-Monteith.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é importante componente do ciclo hidrológico e consiste na transferência do vapor de água em uma determinada área condicionada por suas características climatológicas e físicas. Combinada por dois fenômenos simultâneos, a perda de água pela evaporação e a transpiração das plantas representa um processo complexo e não linear, correspondendo ao maior fluxo externo de água e sendo componente essencial do ciclo hidrológico (Allen et al., 1998). A estimativa precisa do ET é fundamental para o gerenciamento de recursos hídricos, balanço hídrico da captação e sistemas de irrigação (Jovic et al., 2018; Parajuli et al., 2019).

Dos componentes do balanço hídrico, a evapotranspiração é uma variável que não é medida diretamente. Utiliza-se a equação do balanço de massa ou de energia para sua estimativa. Determinar a evapotranspiração real se torna um desafio. Por isso é frequente a utilização de equações de evapotranspiração de referência (ET_0). Sua determinação deve seguir as especificações preconizadas na FAO 56 (Allen et al., 1998), definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, onde admite-se uma grama com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência superficial de 70 s/m.

A equação Penman-Monteith (PM) é frequentemente utilizada para estimar a ET_0 , que sob as condições de referência, representa a evapotranspiração hipotética da grama que cobre completamente a superfície observada. A equação considera uma disponibilidade ilimitada de água e resistência estomática arbitrariamente baixa. Portanto, ao utilizar essa equação empírico-teórica para a determinação da ET_0 , os dados climatológicos correspondem a entrada de informações, não dependendo dos valores de fluxo de água e da vegetação do solo (Parajuli et al., 2019).

Vários métodos empíricos e conceituais de estimativa de ET_0 são apresentados na literatura (Kumar et al., 2018; Subedi & Chávez, 2015). Esses métodos variam desde expressões simples baseadas na temperatura média e no comprimento do dia até modelos mais complexos, que tentam equilibrar o balanço de energia no dossel e/ou na superfície e combinações de energia, transferência de massa e abordagens aerodinâmicas (Ellenburg et al., 2018). O método utilizado geralmente reduz a quantidade e o tipo de dados de entrada disponíveis. Estudos de estimativa da ET_0 têm sido realizados, comparando-se os métodos empíricos e conceituais com a equação de Penman-Monteith (Costa Santos et al., 2019; Lima Junior et al., 2016; Moura et al., 2013; Borges & Mendiando, 2007)

Processos hidrológicos em pequenas bacias ocorrem em escalas temporais pequenas, sendo necessária a utilização de dados em escalas horárias ou sub-horárias. A rede de monitoramento meteorológico no Brasil trabalha com as séries em escala horária, o que não permite uma observação do comportamento em escalas menores. Além disso, os equipamentos de monitoramento são sensíveis, precisam de observações quanto a calibração, além de que, com o tempo e com ausência e deficiência de manutenção, podem vir a parar de funcionar, ocasionando falhas nas séries ou invalidando resultados. Assim, simplificações na equação completa de estimativa da evapotranspiração torna-se necessária (Venancio et al., 2019; Tanaka et al., 2016; Carvalho et al., 2015).

Neste contexto, o objetivo do presente artigo é validar três fatores incorporados na equação de evapotranspiração de referência de Penman-Monteith em uma bacia no sul do Brasil, a fim de estimar o processo mesmo com ausência de dados climáticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia, localizada no município de Lontras, no estado de Santa Catarina, entre a latitude 27°11'17,0" S e longitude 49°29'40,1" O, com uma superfície de 30,67 km². O ribeirão é um afluente do rio Itajaí-Açu. O clima é classificado como subtropical úmido (Cfa – Köppen), que não há estação seca definida, ou “constantemente úmido”, com temperatura média anual de 19,5 ± 0,6 °C (2002 a 2016). A precipitação se apresenta como ritmo estacional regular, apresentando diferença pouco significativa entre os períodos mais e menos chuvosos. O período mais chuvoso ocorre nos meses de verão e menos chuvoso no inverno.

A bacia apresenta uma estação meteorológica de superfície instalada em conformidade com as especificações da Organização Meteorológica Mundial de (OMM), e é composta por um pluviógrafo, termo higrômetro, piranômetro, barômetro, anemômetro ultrassônico e termômetro de solo, com aquisição de dados em intervalos de 10 min. Ela está localizada a uma altitude de 534 m, com monitoramento a partir de outubro de 2008.

Equação de Penman-Monteith

Baseando-se nos fatores físicos entre solo e atmosfera, a equação mais precisa para calcular a evapotranspiração de referência em superfície gramada (ET_0) é de Penman-Monteith (PM), preconizada por Allen et al. (1998), apresentada na Equação 1.

$$ET_0 = \frac{s}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \cdot \left[(R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{e_s - e_a}{s \cdot r_a} \right] \quad [1]$$

onde

ET_0 : evapotranspiração de referência para superfícies gramadas [$W \cdot m^{-2}$]

s : inclinação da curva de pressão vapor saturado [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]

γ : constante psicrométrica [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]

r_c : resistência à perda de vapor de água através dos estômatos das folhas no dossel (resistência da cultura) [$s \cdot m^{-1}$]

r_a : resistência à transferência de vapor de água do ar acima do dossel (resistência aerodinâmica) [$s \cdot m^{-1}$]

R_n : radiação líquida [$W \cdot m^{-2}$]

G : fluxo de calor do solo [$W \cdot m^{-2}$]

ρ_a : massa específica do ar [$kg \cdot m^{-3}$]

c_p : calor específico do ar = $1013 \text{ J } kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

e_s : pressão vapor saturada do ar [kPa]

e_a : pressão vapor ambiente [kPa]

Para determinar esses parâmetros são requeridas quatro variáveis meteorológicas diferentes: radiação líquida ou pelo menos radiação global; temperatura do ar; velocidade do vento; e umidade relativa do ar. Para aplicar a equação corretamente, é necessário calcular ET_0 no mínimo a cada hora, e de preferência a cada meia hora ou até intervalos de tempo mais curtos. A temperatura do ar (T_a), a velocidade do vento (u) e a umidade relativa (r_h) entram no cálculo de ET_0 de uma forma não linear. Consequentemente, os dados acima mencionados precisam estar disponíveis por curtos intervalos de tempo. Não se pode usar dados coletados em intervalos de mais de uma hora e certamente não em intervalos diários. Os valores calculados de ET_0 de curto prazo devem ser somados para obter um valor para o ET_0 diário. Portanto, para obtenção do valor de ET_0 diário com a equação de Penman-Monteith deve-se ter conjunto robusto de dados e cálculos dos seus componentes.

A parte matemática não se torna um problema, devido a tecnologia de processamento existente. No entanto, coletar os diferentes dados meteorológicos necessários em intervalos curtos e com boa qualidade torna-se um desafio. A coleta desses dados é essencialmente automatizada, mas a manutenção dos vários instrumentos e a verificação da consistência dos dados coletados consome muito tempo.

Assim, o objetivo é investigar se é possível obter valores precisos de ET_0 diários para Lontras com menos parâmetros de entrada. Esse trabalho foi desenvolvido em várias etapas, sendo a primeira delas dispensar os dados de umidade, o que faz com que o termo aerodinâmico seja excluído da equação PM. Associando a equação PM combinada com a equação de Priestley & Taylor (1972), obtém-se a Equação 2:

$$ET_0 = f_1 \cdot \frac{s}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \cdot (R_n - G) = f_1 \cdot \frac{s}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \cdot 0.9 \cdot R_n \quad [2]$$

onde f_1 : fator empírico para correção da diferença em ET_0 calculado com PM e Priestley e Taylor, respectivamente, que será determinado por uma regressão entre os dados calculados com essas duas equações.

A Equação 2 não contém o termo $(e_s - e_a)$. No entanto, ele ainda é utilizado para calcular a onda longa líquida de radiação. Porém, existem equações que não a utilizam, como Campbell & Norman (1998). A próxima etapa é substituir R_n por R_g . Isso significa que a radiação de onda longa líquida (LW_n) não é calculada, sendo alterado para:

$$ET_0 = f_2 \cdot \frac{s}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \cdot 0.9 \cdot R_g \quad [3]$$

onde f_2 : fator empírico de correção da diferença entre a ET_0 calculado com [3] e [1], respectivamente, que será determinado por uma regressão entre os dados calculados com essas duas equações

A radiação líquida (R_n) é obtida a partir de quatro componentes que a determinam, ou seja, as radiações incidentes e refletidas de ondas curtas e longas (radiação de onda curta na entrada SW_{in} e na saída SW_{out} , radiação de onda longa na entrada LW_{in} e na saída LW_{out}). Ao substituir R_n por R_g , faz-se uma simplificação dos cálculos. A próxima etapa é reduzir a velocidade do vento, ou seja, definir $u_z = 0$. Isso torna $r_c/r_a = 0$, resultando:

$$ET_0 = f_3 \cdot \frac{s}{s + \gamma} \cdot 0.9 \cdot R_g \quad [4]$$

onde f_3 : fator empírico de correção da diferença em ET_0 calculado com [4] e [1], respectivamente, que será determinado por uma regressão entre os dados calculados com essas duas equações.

A Equação 4 é semelhante à proposta por Wendling et al. (1991) que baseou seu trabalho em Turc (1961), desenvolvida na França. A chamada equação de Turc-Wendling é a forma padrão de calcular ET_0 na Alemanha. Por último, pode-se usar R_g para obter uma estimativa de ET_0 . A forma matemática desta relação deve ser determinada por regressão. Considerando que se pode somar o R_g recebido nos períodos de meia hora ao longo do dia para obter o R_g total do dia, não há necessidade de etapas de tempo curtas em cálculos com a equação de regressão, caso o interesse seja apenas nos valores diários de ET_0 . Eles podem ser calculados diretamente do R_g diário.

A qualidade das equações acima mencionadas foi avaliada comparando os valores obtidos com elas aos resultados de cálculos com a equação PM completa [1].

Para todos os cálculos com [1], [2], [3] e [4] foram utilizados o intervalo de tempo de meia hora. O valor dos fatores empíricos f_1 , f_2 e f_3 deve ser obtido por regressão utilizando os respectivos valores diários de ET_0 .

Ressalta-se que existem procedimentos na literatura para usar a equação PM com um valor diário apenas para cada parâmetro de entrada (Allen et al., 1998). Isso reduz significativamente o número de cálculos necessários e, de acordo com Allen et al. (1998), geralmente ainda fornece resultados precisos para ET_0 diário. No entanto, isso é aleatório, e não uma consequência da física que rege a ET_0 .

RESULTADOS

TAXAS DE MEIA HORA DE ET_0

Os dados de entrada completos e confiáveis só estavam disponíveis no período de abril de 2010 a dezembro de 2014. Depois disso, houve problemas frequentes e duradouros, especialmente com a umidade relativa do ar e velocidade do vento. Portanto, utilizou-se apenas esse período à aplicação da equação de Penman-Monteith.

Na Figura 1a é mostrada a curva da ET_0 de meia hora em Lontras em um dia claro no verão e no inverno. Conseqüentemente, em ambos os dias o ET_0 aumentou suavemente desde o nascer do sol até cerca de uma hora após o meio-dia, hora local (13:00 horas), e então diminuiu suavemente novamente até o pôr do sol. Também é possível observar que a taxa de pico de ET_0 é maior no verão do que no inverno, e que há mais horas de evapotranspiração no verão, porque os dias são mais longos. O resultado é um ET_0 total mais alto no verão (6,72 mm) do que no inverno (2,76 mm).

Embora dias completamente claros aconteçam ocasionalmente em Lontras, é comum ter nuvens passando de forma que a radiação solar incidente seja reduzida em alguns intervalos de tempo, como ilustrado na Figura 1b, onde a ascensão e recessão de ET_0 durante o dia é frequentemente perturbada por nuvens leves. Um caso semelhante é mostrado na Figura 1c, no qual as nuvens eram mais densas

e geravam chuva fraca em curto intervalo de tempo. Portanto, a ascensão e a recessão foram mais acentuadas do que na figura anterior.

Outro caso comum é ilustrado na Figura 1d. Do nascer do sol até às 11 horas, o céu estava claro e ET_0 aumentava continuamente, quando ocorreu a formação de nuvens diminuindo a ET_0 até cerca de 13:30 h, quando ocorreram chuvas intensas. Depois disso, as nuvens começaram a se dissipar e a ET_0 voltou a subir, atingindo às 16:00 h, a ET_0 máxima. A partir de então, o céu ficou claro novamente pelo resto do dia, de modo que a ET_0 diminuiu suavemente até o pôr do sol.

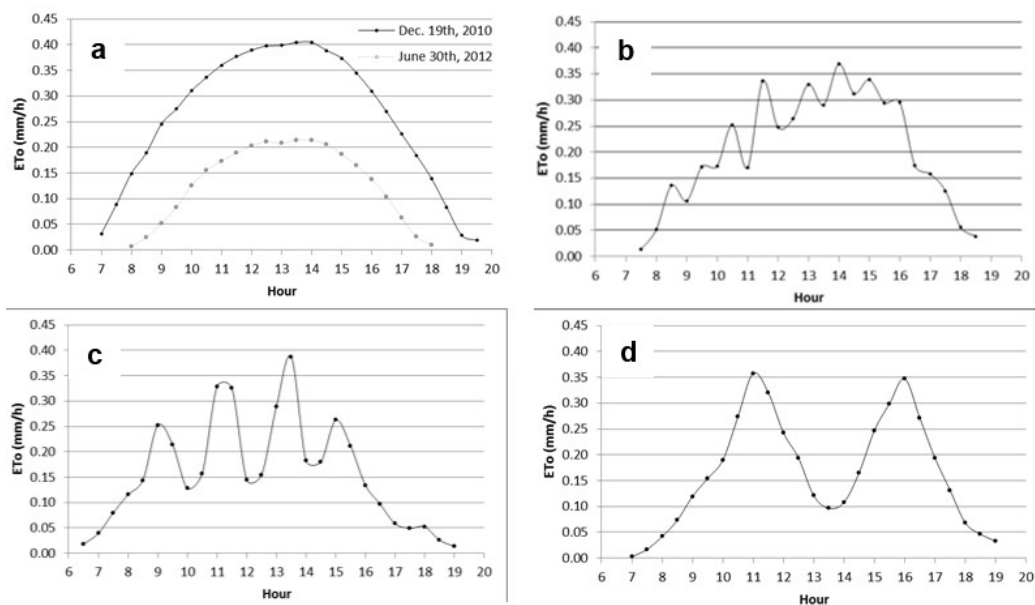


Figura 1 – ET_0 com intervalo de meia hora em Lontras: **a)** em um dia claro no verão (19 de dezembro de 2010) e no inverno (30 de junho de 2012). **b)** em um dia com nuvens intermitentes (24 de fevereiro de 2014). **c)** em um dia com nuvens intermitentes e alguma chuva (23 de novembro de 2010). **d)** em um dia com nuvens densas e chuvas fortes ao meio-dia (28 de janeiro de 2011).

TAXAS DIÁRIAS DE ET_0

A Figura 2 mostra a ET_0 diária de 16 de abril de 2011 até 17 de dezembro de 2014, ou seja, para todo o período para o qual o conjunto de dados meteorológicos é completo e confiável e estava disponível. Ela revela duas características: a primeira que há uma grande variação diária na ET_0 devido ao grau variável de nebulosidade. A segunda que existe uma forte variação sazonal na ET_0 diária com um pico no verão e menores valores no inverno, que é resultado do ciclo anual de insolação. As taxas diárias mais altas são de aproximadamente 7 mm d^{-1} , enquanto as menores são inferiores a $0,5 \text{ mm d}^{-1}$. Isso significa que há um fator superior a 14 entre os dois.

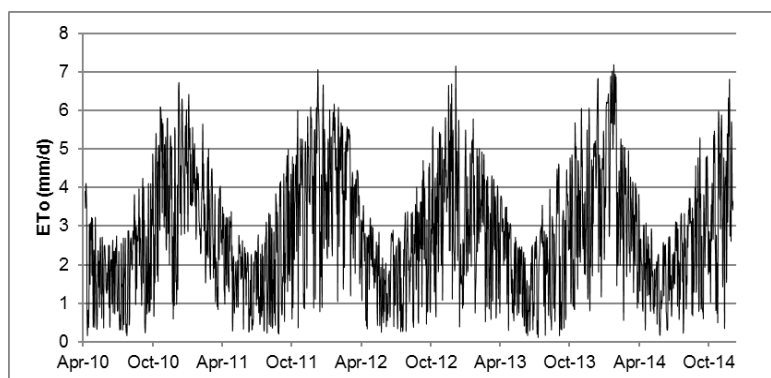


Figura 2 - ET_0 diária em Lontras de 16 de abril de 2011 a 17 de dezembro de 2014.

VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS PELOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Devido à incerteza dos dados de vento nos períodos de dezembro de 2012 a março de 2013, de janeiro de 2014 a fevereiro de 2014, e de outubro a dezembro de 2014, esses valores não foram utilizados nas análises a seguir.

Simplificação do fator de umidade (f_1)

Na ausência de dados de umidade, ou se optar em não os utilizar, o termo aerodinâmico em PM não pode ser calculado. Desconsiderar o termo aerodinâmico (ET_{aero}) só pode funcionar se adotar uma fração mais ou menos constante do termo de radiação (ET_{rad}) ao longo do período considerado. Isso implica que em uma correlação entre ET_{rad} e ET_{aero} , todos os dados devem se ajustar a uma linha de regressão que passa por zero. Observa-se que a afirmativa não é válida para dados de meia hora (Figura 3a), em que não há correlação significativa, menor que 20%.

A situação é melhor, embora ainda não ideal (abaixo de 40%), quando se observa os valores diários (Figura 3b), que indicam que, em média, $ET_{aero} = 0,1152 \cdot ET_{rad}$. No entanto, a Figura 4 ilustra que o fator 0,1152 não é constante, mas sim flutuante. Frequentemente, ele se apresenta muito maior no inverno do que nos meses de verão, o que implica que a ET_{aero} não é significativa para a ET_0 .

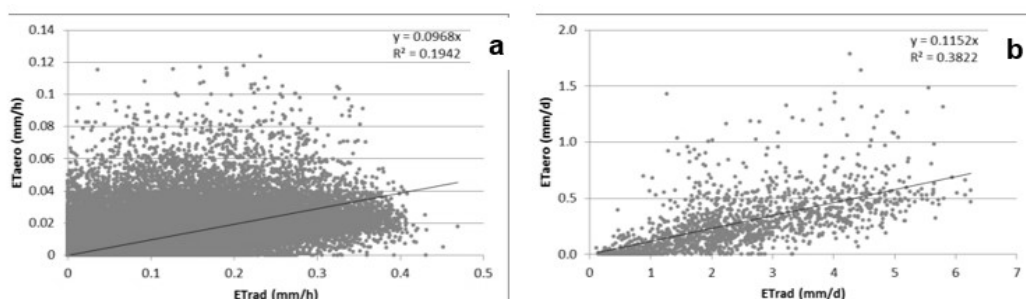


Figura 3 – a) Relação entre os valores de meia hora de ET_{rad} e ET_{aero} . b) Relação entre os valores de diários de ET_{rad} e ET_{aero} .

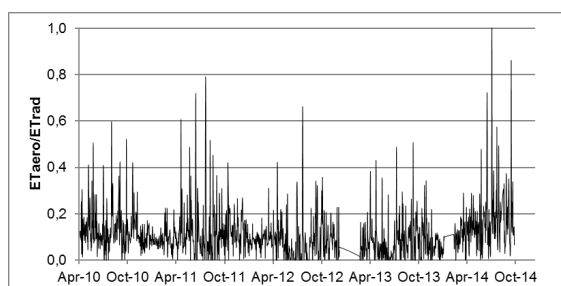


Figura 4 - Curva temporal da razão ET_{aero} / ET_{rad} para valores diários.

Calculou-se ET_{rad} , ou seja, a contribuição do termo de radiação em PM para ET_0 , para o intervalo de meia hora no período de observação e, em seguida, acumulou-se os resultados em valores diários. Na Figura 5, esses dados são correlacionados com dados ET_0 igualmente acumulados de PM.

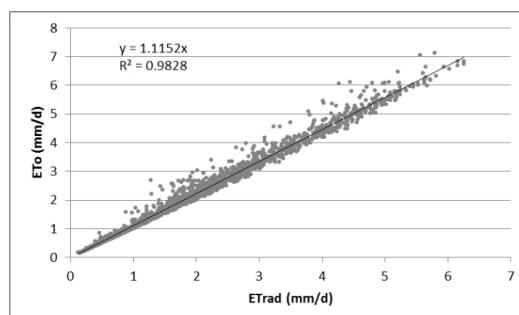


Figura 5 - Relação entre os valores diários de ET_0 calculados com a equação [2] (ET_{rad}) e a equação [1] (ET_0).

A partir da equação da linha de regressão da Figura 3b (1,1152), observa-se que o ajuste é significativo ($R^2 = 0,9828$), o que sugere que a Equação 2 adotando f_1 como 1,1152 resulta em valores similares aqueles da equação de Penman-Monteith. O valor não era esperado, especialmente pela dispersão dos dados. O bom ajuste é explicado pela circunstância de que, em média, o ET_{aero} equivale a apenas 10% do ET_0 diário em Lontras, como exposto na Equação 5.

$$\frac{ET_{aero}}{ET_0} = \frac{0.1152 \cdot ET_{rad}}{1.1152 \cdot ET_{rad}} = 0.1033 \Rightarrow ET_{aero} = 0.1033 \cdot ET_0 \quad [5]$$

Nas Figura 6a e Figura 6b são apresentadas as diferenças entre o ET_0 diário calculado com a Equação 2 adotando f_1 como 1,1152 e a equação original. Na maioria dos casos (82%), a sub e sobre predição é menor do 0,2 mm d⁻¹, mas frequentemente a subestimação é muito maior.

Além disso, em 2014 (Figura 6a), a maioria foi subestimada. A Figura 7 exhibe a sub e sobre estimativa como uma porcentagem da ET_0 calculada com PM. Na maioria dos dias (80%), ela foi inferior a $\pm 10\%$. Além disso, a superestimativa nunca excede 11,52%, enquanto a subestimativa foi frequentemente muito maior.

A equação de regressão evidencia que, para explicar a ausência do termo aerodinâmico ET_{rad} , deve, em média, ser multiplicado por 1,1152 para obter uma ET_0 diária comparável ao calculado com Penman-Monteith. Em dias sem vento, o termo aerodinâmico é zero. Isso significa que a Equação 2 com f_1 igual 1,1152 então superestima em 11,52%. Considerando que o termo aerodinâmico nunca é menor que 0, ou seja, negativo, esta é a previsão máxima possível (Figura 5). No entanto, o termo aerodinâmico pode representar mais de 11,52% do termo de radiação (Figura 4). Na verdade, o ET_{aero} pode ser tão grande e às vezes até maior do que o ET_{rad} . Quando isso acontece, a Equação 2 subestima a ET_0 diária em menos de 11,52%, sem limite definido para a subestimação (Figura 6). Desvios elevados ocorrem principalmente durante o mês de inverno, quando a razão ET_{aero} / ET_{rad} é maior (Figura 5).

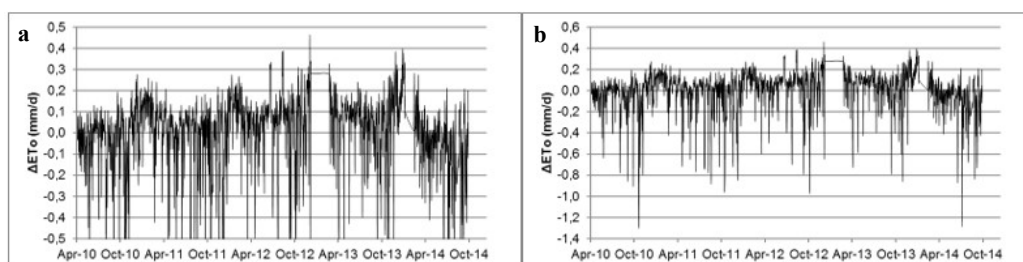


Figura 6 – a) Curva temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a equação 2 com $f_1 = 1,1152$ e a equação PM. b) Como a Figura a, mas com o eixo y não cortado.

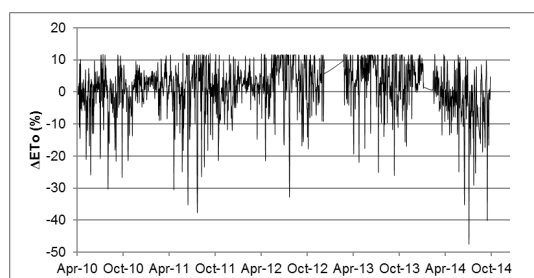


Figura 7 – Curva temporal das diferenças relativas (%) entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 2 com $f_1 = 1,1152$ e a equação PM, ou seja, $\Delta ET_0 = ([2] - [1]) / [1] \times 100$

Uma análise mais detalhada dos dados revela que a Equação 2 com f_1 igual a 1,1152 superestima a ET_0 diária com mais frequência do que a subestima, ou seja, 65% das vezes. As sub estimativas individuais são, em média, maiores do que as superestimações. No entanto, $f_1 = 1,1152$ ainda produz ajuste geral adequado.

No entanto, esse fator é mais elevado em 65% das vezes. Já o termo de radiação (ET_{rad}) passa por um ciclo anual com valores maiores no verão e menores no inverno (Figura 8), assim como ET_0 (Figura 2).

Portanto, a multiplicação de ET_{rad} por um fator maior, na maioria das vezes, resultará em uma estimativa bastante frequente de ET_0 , de modo que os desvios de PM exibam um ciclo semelhante ao de ET_{rad} ,

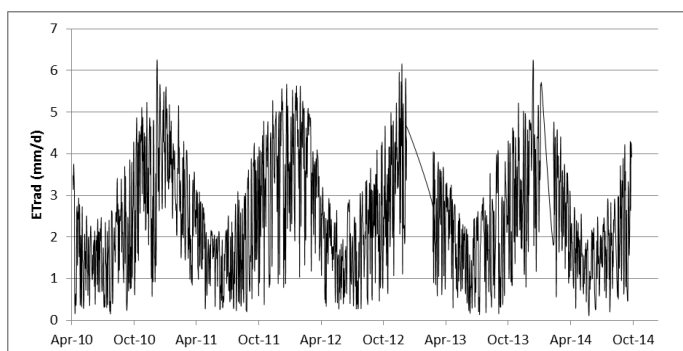


Figura 8 - Curva temporal de ET_{rad} para valores diários.

Simplificação do fator de umidade (f_1) e radiação de onda longa (f_2)

Além de dispensar os dados de umidade, que elimina o termo aerodinâmico, o LW_n não será considerado. Isso significa que R_n deve ser substituído por R_g , assim se considera a Equação 6.

$$R_n = SW_n - LW_n = (1 - \rho) \cdot R_g - LW_n = f_2 \cdot R_g \quad [6]$$

Reorganizando esta equação em função de f_2 resulta na Equação 7.

$$f_2 = \frac{(1 - \rho) \cdot R_g - LW_n}{R_g} = (1 - \rho) - \frac{LW_n}{R_g} \quad [7]$$

Se a superfície de referência for a grama, então ρ permanecerá constante com o tempo. Portanto, substituir R_n por R_g só pode funcionar bem, se a razão da radiação de onda longa líquida (LW_n) por R_g for mais ou menos constante (além das condições para omitir o termo aerodinâmico). Semelhante à afirmativa anterior, isso implica que em uma correlação entre R_g e LW_n todos os dados devem se ajustar a uma linha de regressão que passa por zero. Novamente, para dados de meia hora eles não tem aderência (Figura 9a), e para dados diários há uma relação não linear fraca (Figura 9b).

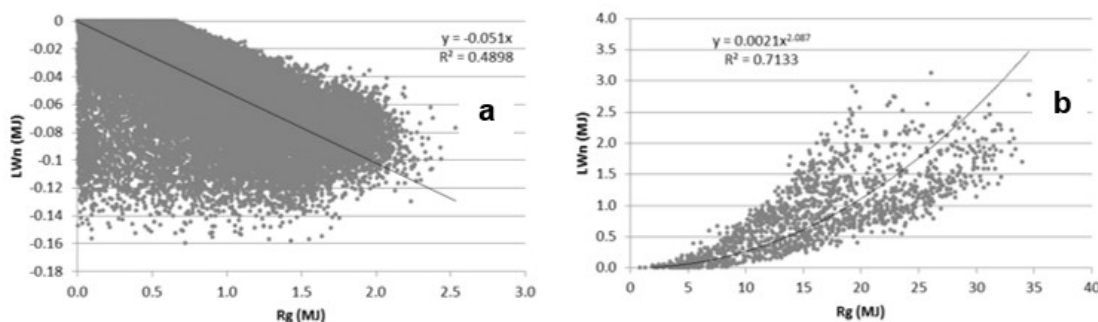


Figura 9 - a) Relação entre os valores de meia hora de R_g e LW_n . b) Relação entre os valores de diários de R_g e LW_n .

A Figura 10 revela que há um ciclo bem definido na razão LW_n/R_g , sendo maior no outono e menor na primavera. Isso sugere que substituir R_n por R_g pode não ser a melhor alternativa. No entanto, em média, o LW_n diário equivale a apenas 5,4% do R_g diário, de modo que qualquer erro na estimativa de LW_n resulta em um pequeno erro em R_n . Esta porcentagem foi obtida dividindo a soma de LW_n ao longo de todo o período de observação pela soma de R_g no mesmo período.

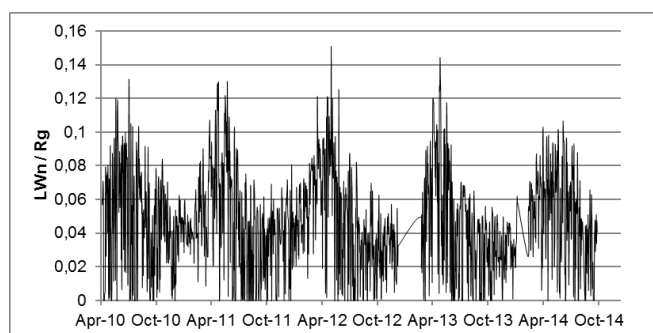


Figura 10 – Curva temporal da razão LW_n / R_g para valores diários.

A Figura 11 representa a relação entre a ET_0 diária calculada com a Equação 3, ou seja, sem o termo aerodinâmico e com $0,9 \cdot R_g$. Novamente, os totais diários foram calculados para o intervalo de tempo de meia hora. A relação é significativa ($R^2 = 0,9847$), o que é inesperado devido a dispersão observada nas Figuras anteriores. Porém é coerente, se recordar que, em média LW_n , equivale a apenas 5,4% do R_g diário. A regressão produz f_2 igual a 0,7971. Este valor pode ser explicado na Equação 8, também multiplicando por f_1 (1,1152) para retirar o termo aerodinâmico.

$$R_n = 1.1152 \cdot 0.716 \cdot R_g = 0.7984 \cdot R_g \quad [8]$$

O $f_2 = 0,7984$ na Equação 8 é próximo ao obtido pela regressão na Figura 11a. A Figura 11b apresenta as diferenças absolutas entre a ET_0 diária calculada com a Equação 3 com $f_2 = 0,7971$ e PM. Tal como acontece com a Equação 2, a sub e sobre estimacão é menor que $0,2 \text{ mm d}^{-1}$ na maioria dos casos (82%). A sub estimacão foi mais elevada. Existe um ciclo sazonal nas diferenças que é muito mais evidenciado do que o da Figura 6.

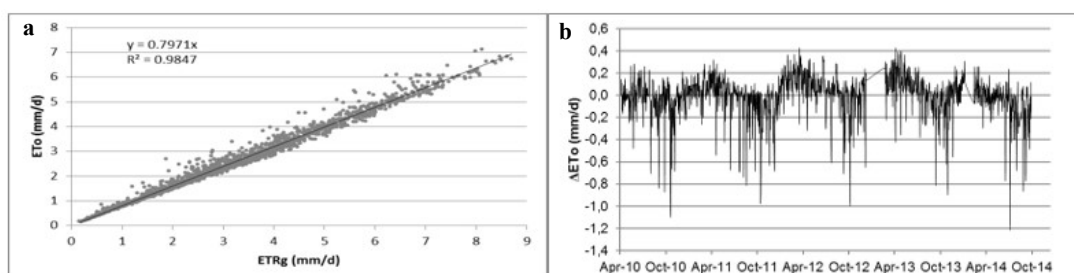


Figura 11 – **a)** Relação entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 3 (ET_{Rg}) e a equação PM (ET_0).
b) Curva temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 3 com $f_2 = 0,7971$ e a equação PM.

A Figura 12 exibe a sub e superestimacão como porcentual do ET_0 calculado com Penman-Monteith. Em 90% dos dias é menor que 10%. A superestimativa raramente excede 10%, enquanto subestimativa foi frequentemente maior. Em contraste com a Equação 2, não há um limite superior definido para a sobre estimacão. Esse comportamento diferente provavelmente surge, porque a Equação 3 contém duas simplificações diferentes.

As diferenças relativas seguem o mesmo ciclo sazonal que as diferenças absolutas. Em contraste com a Equação 2, o pico do ciclo é no outono e não no verão, e o vale na primavera, e não no inverno. Este é o mesmo ciclo exibido pela razão LW_n / R_g , o que, portanto, parece ser a causa desse padrão. O ciclo na razão ET_{aero} / ET_{rad} é muito mais fraca (Figura 4).

Analisando os dados, também se observa que a Equação 3, utilizando f_2 igual a 0,7971, também superestima a ET_0 diária com mais frequência do que o subestima, ou seja, 60% das vezes. Tal como acontece com a Equação 2, as subestimativas individuais são, em média, maiores do que as sobre estimativas, de modo que $f_2 = 0,7971$ ainda produz o melhor ajuste geral. Isso significa que os desvios dos valores reais de ET_0 são moderados na maioria das vezes, mas devido ao ciclo sazonal e às grandes diferenças, nenhum valor individual pode ser considerado preciso. Mesmo os valores semanais ou mensais podem ser um tanto imprecisos.

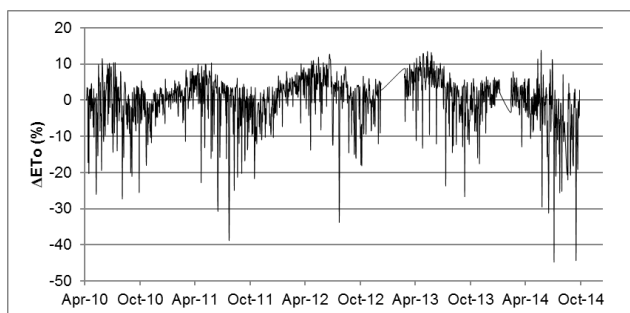


Figura 12 – Curva temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 3 com $f_2 = 0,7971$ e a equação PM.

Simplificação do fator de umidade (f_1), radiação de onda longa (f_2) e velocidade do vento (f_3)

Além de não utilizar os dados de umidade relativa do ar e LW_n , ou seja, não utilizar o fator aerodinâmico, e substituir R_n por R_g , os dados de vento serão omitidos agora. Isso significa que o termo antes dos colchetes utilizados na Equação de Penman-Monteith aos quais nos referiremos como “prefixo” a seguir, se reduz a $s/(s + \gamma)$.

Para que essa redução adicional de dados de entrada funcione, é necessário que o prefixo simplificado seja um múltiplo constante do termo completo. Isso implica que em uma correlação entre o termo simplificado e o termo completo, com a maior parte dos dados aderidos a uma linha de regressão que passa por zero. Como mostra a Figura 13a, este não é o caso para os dados de meia hora. Em dias sem vento, os dois termos tendem o mesmo valor, em dias com vento o termo completo é sempre menor que o termo simplificado. Portanto, há um limite superior bem definido para os pontos de dados na Figura 13a. Os dados diminuem em caso de não haver vento, enquanto, às vezes, com vento os pontos diminuem abaixo desta linha. Não se pode somar os valores de meia hora do prefixo para obter um valor diário.

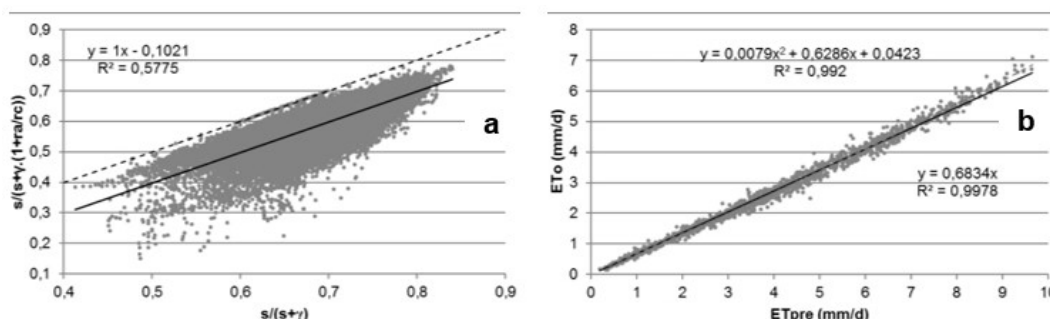


Figura 13 – **a)** Relação entre os valores de meia hora de $s/(s + \gamma)$ e $s / (s + \gamma.(1 + ra/rc))$. A linha sólida é a linha de regressão, a linha tracejada a linha 1:1. **b)** Relação entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 4 (ET_{pre}) e a equação PM (ET_0).

Na Figura 13b é mostrada a relação entre a ET_0 diária calculada com a Equação 4 e PM. Em ambos os casos, os valores diários foram somados aos valores de meia hora. A regressão linear simples se ajusta bem na maior parte do intervalo de dados, mas não tão bem nos valores de ET_0 mais altos, onde a regressão polinomial apresenta vantagem. Abaixo de ET_0 5 $mm\ d^{-1}$, não faz diferença qual equação se aplica. Para simplificar, prosseguiu-se com a relação linear.

Na Figura 14a são apresentadas as diferenças absolutas entre a ET_0 diária calculada com a Equação 4, adotando $f_1 = 0,6834$ e a equação Penman-Monteith. Tal como acontece com as Equações 2 e 3, a sub e superestimação é inferior a 0,2 $mm\ d^{-1}$ na maioria dos casos (86%), mas às vezes a subestimação é maior. As suestimativas acima (57%) e subestimadas (43%) são mais equilibradas do que com as simplificações anteriores. Cerca de 90% das diferenças relativas é inferior a $\pm 10\%$ do valor verdadeiro (Figura 14b) calculado com PM. Os desvios absolutos e relativos mostram um ciclo semelhante aos resultados da Equação 2, ou seja, picos no outono e mínimos na primavera, mas há menos desvios absolutos negativos e menos pronunciados, e alguns relativos positivos bastante distintos.

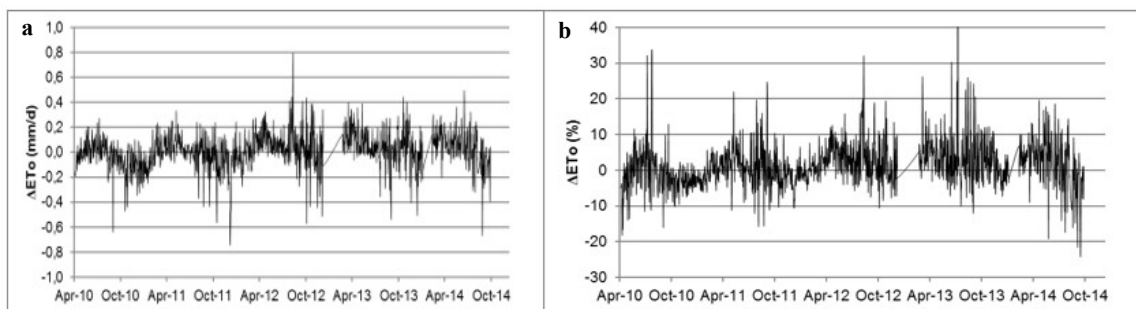


Figura 14 – **a)** Curva temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 4 com $f_3 = 0,6834$ e a equação PM. **b)** Curva temporal das diferenças relativas entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 4 com $f_3 = 0,6834$ e a equação PM, ou seja, $\Delta ET_0 = ([4] - [1]) / [1] \times 100$. o eixo y foi cortado em 40%, porque apenas um valor o excedeu.

Frequentemente, o termo $s / (s + \gamma)$ diário é calculado utilizando a temperatura média do ar diária, o que também foi analisada. A Figura 15 compara a ET_0 diária calculada com este termo (ET_{prealt}) e PM. A inclinação da regressão linear simples é mais acentuada do que no item anterior, mas, as relações são semelhantes.

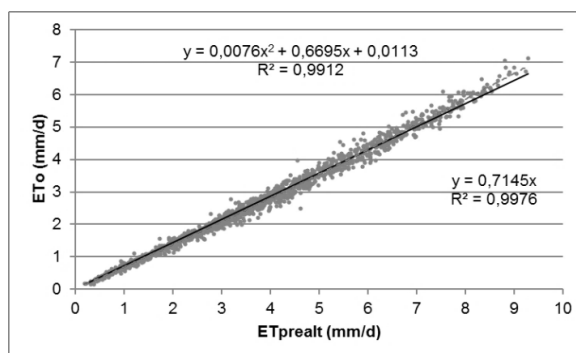


Figura 15 – Relação entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 4 com um prefixo baseado na temperatura média diária do ar e a equação PM (ET_0).

A evolução temporal dos desvios absolutos (Figura 16a) e relativos (Figura 16b) é alinhada com as Figura 16 e Figura 15, respectivamente. Cerca de 84% dos desvios são iguais ou menores a $0,2 \text{ mm d}^{-1}$, e cerca de 88% dos dados desviam menos que 10% do valor verdadeiro. Essas porcentagens são um pouco mais baixas do que para Equação 4. No final, pode-se dizer que Equação 4 modificada funciona quase tão bem quanto a própria 4.

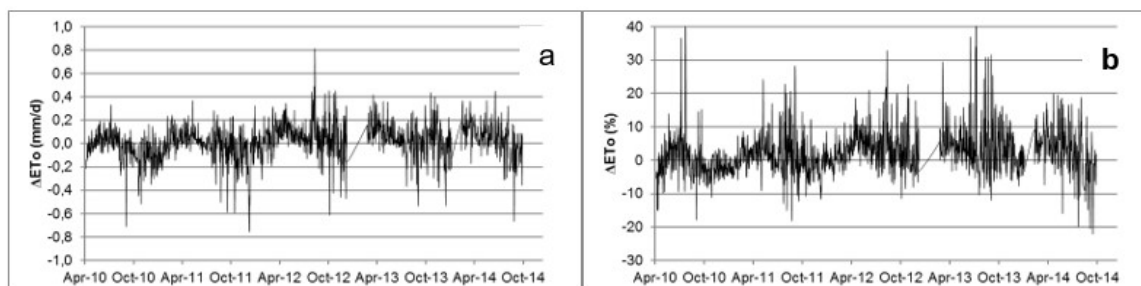


Figura 16 – **a)** Evolução temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a equação 4 modificada com $f_{3alt} = 0,7145$ e a equação PM. **b)** Curva temporal das diferenças relativas entre os valores diários de ET_0 calculados com a Equação 4 com $f_{3alt} = 0,7145$ e a equação PM, ou seja, $\Delta ET_0 = ([4 \text{ modificada}] - [1]) / [1] \times 100$. o eixo y foi cortado em 40%, porque apenas um valor o excedeu.

Em resumo, com a Equação 4 os desvios dos valores verdadeiros de ET_0 são moderados na maioria das vezes. Existem menos desvios menores do que nas Equações 3 e 2, mas o ciclo é mais

evidente (Figura 16a e Figura 16b). Consequentemente, nenhum valor individual pode ser considerado preciso.

Regressão simples (uso apenas de radiação global)

A última etapa de simplificação foi correlacionar R_g e ET_0 calculado com PM (Figura 17). Uma regressão linear simples não tem boa aderência, especialmente quando ET_0 é menor que 5 mm d^{-1} , mas uma regressão polinomial produz melhor ajuste. O R^2 sugere um ajuste razoável.

As diferenças absolutas dos valores de ET_0 calculados com a equação de regressão polinomial dos valores dados por Penman-Monteith são exibidos na Figura 18a, os relativos na Figura 18b. Uma análise detalhada revela que cerca de 66% dos valores calculados com a equação de regressão diferem em menos de $0,2 \text{ mm d}^{-1}$, e 75% em menor ou igual a 10% do valor real. Estes números não são tão bons quanto as simplificações anteriores. Além disso, há grandes super e subestimações frequentes. Há um ciclo sazonal claro nas diferenças absolutas e relativas que é o mais pronunciado em todos os casos examinados. Os picos ocorrem no inverno, os mínimos no verão. Em contraste com as Equações 2, 3, 4 e 4 modificada, a equação de regressão polinomial subestima mais frequentemente (em 54%) do que superestima (46%).

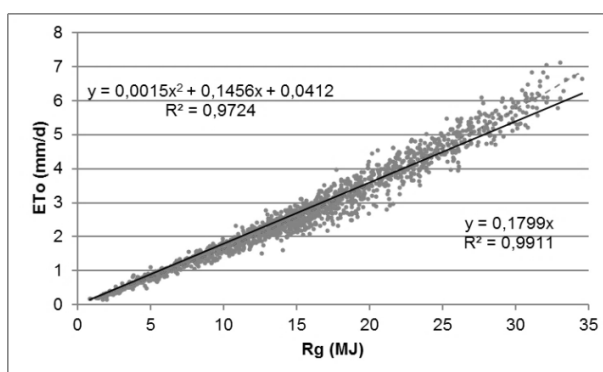


Figura 17 – Relação entre radiação global diária (R_g) e ET_0 calculada com a equação PM.

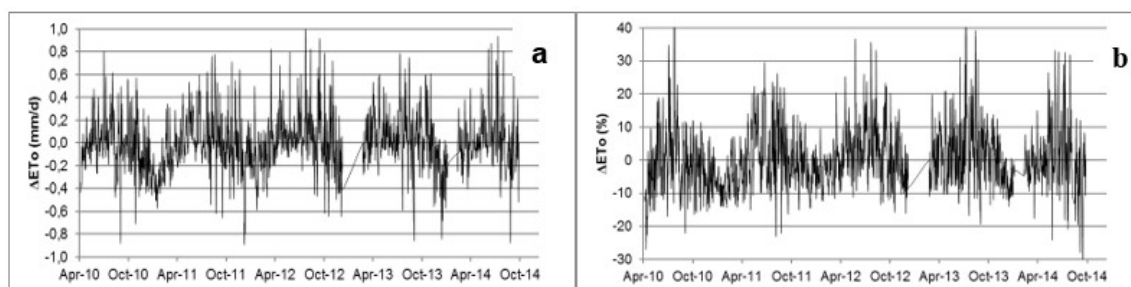


Figura 18 – **a)** Curva temporal das diferenças absolutas entre os valores diários de ET_0 calculados com a equação de regressão polinomial na Figura 17 e a equação PM. **b)** Curva temporal das diferenças relativas entre os valores diários de ET_0 calculados com a equação de regressão polinomial na Figura 17 e a equação PM.

Em resumo, os desvios são comparativamente maiores dos verdadeiros valores de ET_0 . As subestimações são mais frequentes e o ciclo sazonal mais pronunciado tornando menos provável do que as outras equações que um valor diário individual gerado com R_g sozinho é preciso. Tal como acontece com as outras equações, o ciclo afeta que a precisão e difere dentro do ano.

DISCUSSÃO

O desempenho das equações simplificadas está resumido no Quadro 1. A qualidade da estimativa foi avaliada pela proximidade dos valores calculados com as equações individuais dos verdadeiros valores de ET_0 , que se considerou serem obtidos com a equação de Penman-Monteith.

Quadro 1- Resumo dos parâmetros de avaliação do desempenho das equações simplificadas examinadas com relação aos dados diários. Os números azuis indicam o melhor desempenho para um determinado parâmetro.

Parâmetro ou desvio da equação PM	Eq. [2] com $f_1 = 1.1152$	Eq. [3] com $f_2 = 0.7971$	Eq. [4] com $f_3 = 0.6834$	Eq. [4 _{modificada}] com $f_{3alt} = 0.7145$	Equação polinomial
R ²	0.9828	0.9847	0.9908	0.9900	0.9724
Desvio médio	0.134 mm d ⁻¹ 5.9%	0.124 mm d ⁻¹ 5.0%	0.105 mm d ⁻¹ 4.6%	0.110 mm d ⁻¹ 5.0%	0.181 mm d ⁻¹ 7.4%
< 0.05 mm d ⁻¹	26.9%	35.3%	34.7%	32.6%	24.4%
< 0.1 mm d ⁻¹	51.9%	55.6%	60.0%	57.6%	42.2%
< 0.2 mm d ⁻¹	81.9%	81.6%	86.1%	85.3%	66.2%
< 0.3 mm d ⁻¹	91.9%	92.0%	96.0%	94.6%	80.1%
< 5%	54.0%	63.4%	66.4%	63.7%	43.2%
< 10%	80.1%	90.1%	90.5%	88.6%	75.2%
< 20%	98.0%	97.9%	98.8%	98.4%	95.4%
Superestimação	65%	60%	57%	60%	46%
Subestimação	35%	40%	43%	40%	54%
Pico do ciclo	summer	fall	fall	fall	winter
Vale do ciclo	winter	spring	spring	spring	summer
ΔET_0 entre pico e vale	~ 0.15 mm d ⁻¹ com grandes subestimativas muito frequentes	~ 0.3 mm d ⁻¹ com grandes subestimativas frequentes	~ 0.4 mm d ⁻¹ com subestimativas maiores comuns e superestimativas maiores ocasionais	~ 0.4 mm d ⁻¹ com subestimativas maiores comuns e superestimativas maiores ocasionais	~ 0.7 mm d ⁻¹ frequentes sub e superestimativas

A abordagem para calcular a ET₀ diária utilizando uma regressão polinomial com R_g mostra o pior desempenho no que diz respeito a praticamente todos os parâmetros, exceto o equilíbrio entre super e subestimativa, que é realmente a melhor de todas as abordagens. No entanto, isso não pode compensar o pior desempenho em todos os outros pontos. Portanto, essa abordagem deve ser usada apenas como último recurso. Além disso, até onde se sabe, em todas as estações meteorológicas onde R_g é medida, a temperatura do ar (T_a) também é medida. Pode-se então aplicar a Equação 4 ou 4 modificada e obter resultados melhores. O esforço extra de cálculo com essas equações não é grande. Isso significa que não há necessidade da abordagem de regressão polinomial.

A Equação 4 apresenta o melhor desempenho na maioria dos parâmetros. É a segunda melhor com relação ao equilíbrio entre super e subestimativa, depois da regressão polinomial. Em termos de distribuição de dados dentro de 0,05 mm d⁻¹ da ET₀ verdadeira, ela também está em segundo lugar, muito próxima dos resultados obtidos na Equação 3.

Embora a Equação 2 tenha a menor diferença média entre pico e vale no ciclo dos desvios de PM, ela sofre com subestimativas muito frequentes e elevadas. A diferença média entre o pico e o vale é maior com a Equação 4, mas as previsões abaixo ou acima da média são muito mais raras. Portanto, com relação ao ciclo as Equações 2 e 4 são semelhantes no final.

Além de ter a menor diferença média entre pico e vale no ciclo, a Equação 2 não tem um desempenho muito bom. É o segundo ou terceiro pior em todos os outros pontos. Isso é surpreendente, porque é a que mais se assemelha à equação completa de Penman-Monteith. Ele apenas omite os dados de umidade, ou seja, o termo aerodinâmico.

A Equação 3 é melhor em alguns aspectos do que a 2, exceto no que diz respeito ao ciclo. Isso sugere que não considerar a radiação de ondas longas compensa alguns dos erros introduzidos pela omissão de dados de umidade.

Ao todo, a Equação 3 é a terceira melhor, um pouco inferior as Equação 4 e 4 modificada. Essa ordem, por sua vez, implica que deixar de fora os dados do vento além da omissão dos dados de umidade e LW_n compensa ainda mais o erro introduzido pela eliminação dos dois últimos e, portanto, melhora um pouco mais os resultados.

Sendo assim, se todos os dados necessários estiverem disponíveis, a melhor alternativa sempre será a utilização de Penman-Monteith original. Usar a regressão polinomial, isto é, dados de R_g apenas, não é muito satisfatório. Além disso, como se apontou anteriormente, não há necessidade de simplificar tanto.

Os resultados da Equação 2 são melhores, mas não tão bons quanto os resultados obtidos com as Equações 3, 4 e 4 modificada. Essas três equações não diferem muito em sua qualidade. No entanto,

uma vez que a Equação 4 requer menos parâmetros de entrada do que a 3, a torna um pouco melhor, e seria a equação a ser escolhida se os valores de ET_0 de curto prazo (por exemplo por hora) forem desejados.

Ter dados de ET_0 para intervalos de tempo curtos pode ser bastante útil no estudo das relações solo – planta – água - atmosfera. Porém, para os estudos hidrológicos para os quais a bacia do Rio Concordia foi equipada, incluindo uma estação meteorológica completa, os valores diários de ET_0 são suficientes. Para esse propósito, a Equação 4 modificada é a melhor escolha.

Com cautela, pode-se afirmar que os fatores f_1 , f_2 , f_3 , f_{3alt} e os coeficientes na equação polinomial foram derivados por regressão e baseados em dados de Lontras. É improvável que sejam iguais em outros locais. Mesmo no município de Lontras, eles devem ser usados com cautela, porque se baseiam apenas em 55 meses de dados.

Em um local diferente, outra equação em vez da 4 ou 4 modificada pode apresentar melhor simplificação. Portanto, o trabalho aqui apresentado deve ser visto como uma forma de encontrar uma equação mais simples adequada, e não como a resposta definitiva para a questão de qual delas funciona melhor. Os resultados não devem ser aplicados a outros locais sem verificar sua validade.

Conforme afirmado acima, ao utilizar as equações simplificadas, os desvios dos valores diários de ET_0 daqueles obtidos com Penman-Monteith, que se considerou verdadeiros, são moderados na maioria das vezes, mas devido ao ciclo sazonal e/ou frequentes desvios, nenhum valor individual pode ser considerado preciso.

CONCLUSÕES

A partir dos dados gerados é possível concluir que:

- 1) É sempre melhor usar a equação Penman-Monteith completa, ou seja, um conjunto completo de dados meteorológicos, caso se deseje obter valores confiáveis de ET_0 .
- 2) O uso de qualquer equação simplificada, ou seja, o uso de apenas alguns dados meteorológicos, frequentemente leva a valores individuais de ET_0 não precisos.
- 3) A confiabilidade de uma dada equação simplificada é pior em algumas partes do ano do que em outras.
- 4) Caso se deseje utilizar uma equação simplificada, as Equações 4 ou 4 modificada são a melhor escolha, dependendo se precisa de valores horários (ou de prazo mais curto) (4) ou apenas dados diários (4 modificada). Há duas razões para isso: Os valores de ET_0 calculados com eles são os mais próximos dos valores verdadeiros e exigem o mínimo de parâmetros de entrada.
- 5) Os coeficientes nas equações simplificadas para Lontras foram derivados com base no total dos cerca de quatro anos e meio de dados disponíveis. Eles podem ser diferentes para cada ano.
- 6) É improvável que os coeficientes mencionados sejam iguais em outro local. Portanto, os resultados apresentados aqui não devem ser transferidos para outra localidade sem verificar se eles se aplicam outras condições.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (processo 88887.143990/2017-00) pelo financiamento do projeto de cooperação internacional e ao CNPq (processo 304475/2020-3) pela bolsa de produtividade do quarto autor.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Borges, A. C., & Mendiondo, E. M. (2007). Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(3), 293-300. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300008>
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *An introduction to environmental biophysics* (2nd ed.). New York, USA: Springer.

- Carvalho, D. F., Rocha, H. S., Bonomo, R., & Souza, A. P. (2015). Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100001>
- Costa Santos, L., Cruz, G. H. T., Capuchinho, F. F., Jose, J. V., & Reis, E. F. (2019). Assessment of empirical methods for estimation of reference evapotranspiration in the Brazilian Savannah. *Australian Journal of Crop Science*, 13(7), 1094-1104. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1569>
- Ellenburg, W. L.; Cruise, J. F.; Singh, Vijay P. (2018). The role of evapotranspiration in streamflow modeling—An analysis using entropy. *Journal of Hydrology*, 567, 290-304.
- Jovic, S., Nedeljkovic, B., Golubovic, Z., & Kostic, N. (2018). Evolutionary algorithm for reference evapotranspiration analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 1-4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.003>
- Kumar, V., Khan, S., Shaktibala, B., & Rahul, A. K. (2018). Review of Evapotranspiration Methodologies. *American Journal of Earth Science and Engineering*, 1(2), 72-84.
- Lima Junior, J. C., Arraes, F. D. D., Oliveira, J. B., Nascimento, F. A. L., & Macêdo, K. G. (2016). Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. *Ciência Agrônômica*, 47(3), 447-454. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160054>
- Moura, A. R. C., Montenegro, S. M. G. L., Antonino, A. C. D., Azevedo, J. R. G., Silva, B. B., & Oliveira, M. M. (2013). Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 181-191. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000200007>
- Parajuli, R., Thoma, G., & Matlock, M. D. (2019). Environmental sustainability of fruit and vegetable production supply chains in the face of climate change: A review. *The Science of the Total Environment*, 650, 2863-2879.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-82.
- Subedi, A., & Chávez, J. L. (2015). Crop Evapotranspiration (ET) Estimation Models: a review and discussion of the applicability and limitations of ET methods. *The Journal of Agricultural Science*, 7(6), 50-68. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n6p50>
- Tanaka, A. A., Souza, A. P., Klar, A. E., Silva, A. C., & Gomes, A. W. A. (2016). Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(2), 91-104. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200001>
- Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- Venancio, L. P., Cunha, F. F., Mantovani, E. C., Sedyama, G. C., Eugenio, F. C., & Aleman, C. C. (2019). Penman-Monteith with missing data and Hargreaves-Samani for ETo estimation in Espírito Santo state, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(3), 153-159. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n3p153-159>
- Wendling, U., Schellin, H.-G., & Thomä, M. (1991). Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Zeitschrift für Meteorologie*, 41, 468-475.

Contribuições dos autores:

Gabrielly Cristhine Zwang Baptista: Redação e revisão do texto.

Vander Kaufmann: Preparação e tratamento dos dados.

Heinz Borg: Manipulação dos dados e realização dos cálculos.

Adilson Pinheiro: concepção e revisão do texto.