**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Balanço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no
sudeste brasileiro**

Rodolfo Armando de Almeida Pereira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Rodolfo Armando de Almeida Pereira
Bacharel em Ciências Atmosféricas

**Balanco de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste
brasileiro**

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

ORIENTADOR:

Prof. Dr. **FÁBIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Pereira, Rodolfo Armando de Almeida

Balanço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro / Rodolfo Armando de Almeida Pereira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2018.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Fator de desacoplamento 2. Evapotranspiração 3. Razão de Bowen
I. Título

DEDICATÓRIA

À minha família

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar uma família maravilhosa

Aos meus pais, Armando Eugênio e Maria Fátima, por me apoiarem e serem exemplos de vida, mesmo em situações adversas.

Ao meu irmão Guilherme Armando, pela cumplicidade, apoio e ajuda.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Ricardo Marin, pela oportunidade concedida.

Aos meus amigos Cleverson, Thais, Rodrigo, Evandro, Luis, Daniel e Alexandre pelos momentos felizes e descontraídos que passamos nesta caminhada e pela ajuda nos momentos difíceis.

A Mariana, pelo carinho, pela atenção e pelo companheirismo.

Aos meus colegas do Grupo de Experimentação e Pesquisa em Modelagem Agrícola / Grupo de Pesquisa e extensão em Meteorologia dos Cultivos Agrícolas (GEPEMA/AGRIMET), pelas contribuições a este trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À ESALQ-USP, pelo apoio durante as atividades exercidas no decorrer do curso.

Muito Obrigado a todos, por tornarem este sonho uma realidade!

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO GERAL	15
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1. IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO TRIGO NO BRASIL.....	17
3.2. EXIGENCIAS CLIMÁTICAS DA CULTURA DO TRIGO	18
3.3. BALANÇO DE ENERGIA E RAZÃO DE BOWEN.....	20
3.4. FATOR DE DESACOPLAMENTO (Ω).....	22
3.5. COEFICIENTE DE CULTURA (K_c)	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1. ÁREA EXPERIMENTAL	27
4.2. MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	30
4.3. RESISTÊNCIAS A DIFUSÃO DE VAPOR	31
4.4. MEDIDAS BIOMÉTRICAS	33
4.5. FATOR DE DESACOPLAMENTO (Ω).....	34
4.6. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA	35
4.7. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (E_{To}).....	36
4.8. COEFICIENTE DE CULTURA (K_c)	37
4.9. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1. CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO PERÍODO EXPERIMENTAL	39
5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CULTURA.	44

5.3. BALANÇO DE ENERGIA	47
5.4. RESISTÊNCIAS À DIFUSÃO DE VAPOR	52
5.5. FATOR DE DESACOPLEMENTO	60
5.6. CONSUMO HÍDRICO E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA	65
5.7. COEFICIENTE DE CULTURA	68
6. CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXO.....	91

RESUMO

Balanco de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro.

O trigo é uma importante cultura agrícola no mundo, sendo uma das poucas na qual o Brasil não é autossuficiente, produzindo apenas cerca de 50% da sua demanda interna. Estudos relacionados ao crescimento da cultura e suas trocas de massa e energia com a atmosfera podem auxiliar no planejamento e manejo da cultura. O objetivo desse trabalho foi estudar o balanço de energia, o consumo hídrico e a recomendação de valores de Kc, com enfoque no acoplamento copa-atmosfera. Para isso foi instalado um experimento na Escola Superior Luiz de Queiroz- ESALQ, semeado no dia 30 de maio de 2017 sob sistema de irrigação. Os resultados indicam que o fluxo de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) representaram 81,17 %, 14,13% e 4,7% do saldo de radiação (Rn). A evapotranspiração acumulada para a cultura do trigo foi de 301 mm, tendo uma evapotranspiração média diária de 2,8 mm.d⁻¹. A cultura teve um fator de desacoplamento (Ω) médio para o ciclo de 0,53, porém variou em relação as fases fenológicas: 0,68 (emborrachamento), 0,55 (floração), 0,26 (formação de grãos) e 0,3 (maturação). O coeficiente de cultura ao longo do ciclo foi 0,58, 1,12, 1,46, 1,23, 1,32 e 0,73 para as fases de estabelecimento, perfilhamento, emborrachamento, floração, formação de grão e maturação, e o valor médio para todo o ciclo foi de 1,08. Os valores de Kc indicaram uma queda quando houve elevação da evapotranspiração de referência (ET_o). Assim os valores de Kc para diferentes intervalos de ET_o foram: 1,09 (ET_o ≤ 2); 1,34 (2 < ET_o ≤ 3); 1,25 (3 < ET_o ≤ 4); 0,77 (ET_o > 4).

Palavra-chave: Fator de desacoplamento; Evapotranspiração; Razão de Bowen

ABSTRACT

Energy balance, water consumption and crop coefficient of wheat in the southeastern Brazil.

The wheat is one of the most important crop of the world, and the few one that Brazil is not self-sufficient, producing only 50% of domestic demand. Studies related crop growth and its mass and energy exchange with atmosphere may help to improve the crop planning and management. The objective here was to study on the energy balance and water use of wheat crop, take into account the canopy-atmosphere coupling approach in such study. To do so, an irrigated experiment was conducted in Piracicaba-SP, at the Escola Superior Luiz de Queiroz-ESALQ, sown on May of 2017. The results showed that the latent heat flux (LE), sensible heat (H) and soil heat (G) represented 81.17%, 14.13% and 4.7% of the net radiation (R_n). Cumulative evapotranspiration for the whole wheat crop was 301 mm, with na average daily evapotranspiration of 2.8 mm.d⁻¹. The crop had a mean decoupling fator (Ω) for the cycle of 0.53, but varied with the phenological phases as: 0.68 (head development), 0.55 (flowering), 0.26 (grain formation) and 0.3 (maturation). The crop coefficient along the cycle was 0.58, 1.12, 1.46, 1.23, 1.32 and 0.73 for the respective phases establishment, tillering, head development, flowering, grain formation and maturation, with the average Kc for the cycle was 1.08. The values of Kc indicated a decrease when there was elevation of reference evapotranspiration (ET_o). Thus, Kc values for different ET_o intervals were: 1.09 (ET_o ≤ 2); 1.34 (2 < ET_o ≤ 3); 1.25 (3 < ET_o ≤ 4); 0.77 (ET_o > 4).

Keywords: Desacoupling factor; Evapotranspiration; Bowen ratio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Série histórica da produtividade média dos dois estados mais produtivos por região nos últimos 17 anos (2000-2017). Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).	18
Figura 2. Imagem aérea da área experimental cultivada com trigo na Fazenda Areão da ESALQ, irrigada por pivô central, indicando o posicionamento da torre micrometeorológica (círculo branco) e da direção predominante do vento na região.....	28
Figura 3. Porômetro utilizado para determinação da resistência foliar à difusão de vapor (rf) na cultura de trigo.	33
Figura 4. Escala de desenvolvimento de cereais baseado na abordagem de Feekes (1940). A numeração é a divisão adotada por Large (1954) para melhor detalhamento no desenvolvimento da planta.	34
Figura 5. Variação dos elementos meteorológicos: precipitação; temperatura média do ar durante o experimento (Tar_Exp) e a média histórica da temperatura média do ar (Tar_Clima) para Piracicaba. Além das lâminas de irrigação aplicadas durante o experimento.....	39
Figura 6. Variação do déficit de pressão de vapor médio diário ao longo do ciclo da cultura do trigo (Figura 6a) e a variação média horária durante o experimento (Figura 6b).	41
Figura 7. Variação da temperatura média do solo ao longo do ciclo em duas profundidades (a) e variação horária da temperatura do solo para duas profundidades (b).	42
Figura 8. Conteúdo de água no solo ao longo e entradas de água no sistema oriundas de irrigação e precipitação no período de 30 de maio à 15 de setembro.	44
Figura 9. Variação temporal da massa seca da parte aérea (MSPA), de folhas (MSF) e massa seca de colmo mais bainha foliar (MSC).	45
Figura 10. Altura da planta (a) e índice de área foliar (b) do trigo ao longo do ciclo.	46
Figura 11. Variação média horária para os fluxos de energia para todo o ciclo do trigo	47
Figura 12. Variação média horária dos fluxos de energia nas fases fenológicas da cultura: (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação.	49
Figura 13. Particionamento do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE) (a) e fluxo de calor sensível (H) (b) para todo o ciclo da cultura.	50
Figura 14. Particionamento do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE) em diferentes fases fenológicas: (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação	51
Figura 15. Particionamento do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor sensível (H) por fase fenológica do trigo. (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação.	52
Figura 16. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para a resistência foliar nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d). rf é o valor médio para fase e σ é o desvio padrão para a fase.	54

Figura 17. Variação média horária e diária da resistência foliar à difusão de vapor em comparação com o déficit de pressão de vapor (Δe) (a e b) e com o saldo de radiação (R_n) (c e d).	55
Figura 18. Variação média horária e diária da resistência foliar à difusão de vapor em comparação com a temperatura da folha (a e b) e com a velocidade do vento medida a 2 m (c e d).	56
Figura 19. Variação diária da resistência aerodinâmica a difusão de vapor (r_a) ao longo do ciclo da cultura. Cada ponto na figura representa a média diária de r_a nos mesmos dias de campanhas porométricas, e as barras verticais representam o desvio padrão diário.	58
Figura 20. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para a resistência aerodinâmica nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d).	59
Figura 21. Relação fator de desacoplamento (Ω) em função da razão entre r_f e r_a	60
Figura 22. Relações entre o fator de desacoplamento (Ω) com (a) o saldo de radiação (R_n); (b) déficit de pressão de vapor (Δe); (c) resistência aerodinâmica (r_a); (d) velocidade do vento (U_2); (e) resistência foliar à difusão de vapor (r_f) e (f) temperatura foliar.	61
Figura 23. Variação média horária (a) e diária (b) do fator de desacoplamento (Ω) para o período de emborrachamento à maturação.	62
Figura 24. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para o fator de desacoplamento (Ω) nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d). Ω são os valores médios por fase e σ é o desvio padrão	64
Figura 25. Variação da evapotranspiração de cultura (ET_c) e da evapotranspiração de referência (ET_o) ao longo do ciclo do trigo	66
Figura 26. Relação entre evapotranspiração de cultura (ET_c) e evapotranspiração de referência (ET_o) para todo o ciclo do trigo (a) e desconsiderando a fase de maturação (b).	69
Figura 27. Relação entre evapotranspiração de cultura (ET_c) em função da evapotranspiração de referência (ET_o) para 3 fases fenológicas: Estabelecimento (a), Perfilhamento (b), Emborrachamento (c), Floração (d), Formação de grão (e) e Maturação (f).	70
Figura 28. Variação de K_c diário ao longo do ciclo, com valor-médio do perfilhamento até a maturação	71
Figura 29. Variação do coeficiente de cultura (K_c) em função da evapotranspiração potencial (ET_o) para todo o ciclo da cultura.	76
Figura 30. Variação do coeficiente de cultivo (K_c) e do fator de desacoplamento (Ω) em relação ao ciclo da cultura.	77
Figura 31. Relação coeficiente de cultura (K_c) e fator de desacoplamento (Ω).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores do coeficiente de cultura indicados pelo boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998).	26
Tabela 2. Média histórica para cidade de Piracicaba, SP, referente ao período de 1917 a 2017.	29
Tabela 3. Sensores, modelos e marcas utilizados no monitoramento ambiental durante o experimento e a quantidade de sensores instalados (Qnt).....	30
Tabela 4. Metodologia para avaliação dos dados do MRB (adaptado de Perez et al., 1999).....	35
Tabela 5. Indicadores estatísticos para avaliação do desempenho da modelagem: coeficiente de determinação (R^2); coeficiente de eficiência da modelagem Nash-Sutcliffe (COE); índice BIAS; e raiz quadrada média do erro (RQME).....	36
Tabela 6. Valores médios mensais de temperatura do ar e chuva observados ao longo do experimento e média histórica de chuva e temperatura (1917-2017) observado no Posto Meteorológico da ESALQ.	40
Tabela 7. Valores médios durante o ciclo e médias mensais para temperatura do solo e umidade volumétrica em dois níveis de profundidade, observados ao longo do experimento.	43
Tabela 8. Médias diárias de índice de área foliar (IAF), déficit pressão de vapor (Δe), velocidade do vento (U_2), saldo de radiação (R_n), umidade do solo para duas profundidades (θ), resistências aerodinâmicas (r_a) e a foliar a difusão de vapor (r_f) e o fator de desacoplamento (Ω) e evapotranspiração de cultura (ET_c).....	65
Tabela 9. Evapotranspiração de cultura (ET_c) e de referência (ET_o) por fase fenológica e ciclo do trigo.	66
Tabela 10. Caracterização climática das regiões referentes aos valores do K_c da Tabela 11.	73
Tabela 11. Valores do coeficiente de cultura (K_c) para diversos locais com características climáticas distintas.	75
Tabela 12. Interpretação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.	95
Tabela 13. Graus dias acumulado por fase fenológica.	96

1. INTRODUÇÃO

Elementos meteorológicos como a radiação, precipitação, temperatura e a umidade do ar estão em constante interação com a copa das plantas e são condicionantes dos principais processos de crescimento e desenvolvimento das plantas. A compreensão dos mecanismos subjacentes a interação copa-atmosfera contribui para o avanço no conhecimento básico sobre a cultura e para a predição dos padrões de fluxo de massa e energia na interface copa-atmosfera. Numa instancia mais aplicada, essa base de conhecimento contribui também para o aprimoramento do manejo da irrigação, para a determinação das melhores datas de semeadura das culturas em diferentes condições edafoclimáticas e antever efeitos de eventos meteorológicos no desempenho econômico das culturas.

Na agricultura, o balanço de energia e seu particionamento em seus componentes permitem quantificar o consumo hídrico e a temperatura da cobertura vegetal estudada. Tal particionamento pode ser feito com o método da razão de Bowen (MRB), por exemplo. O método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (ALLEN et al, 1998) pode, por sua vez, ser utilizado para se obter a evapotranspiração de referência (ET_o). Alinhando esses dois métodos, pode-se obter o coeficiente de cultura (K_c), indicador prático e de grande utilidade para o manejo de irrigação e, também, na determinação de áreas aptas para o cultivo da cultura.

No mundo, muitos trabalhos envolvendo as variáveis atmosféricas e a cultura do trigo foram desenvolvidos (ASSENG et al., 2017; CLEUGH et al., 1995; LIU et al., 2010; MOGHIMI; POOYA²; MOHAMMADI³, 2014), porém, tais trabalhos abordam condições climáticas diferentes daquelas observadas no Brasil. No Brasil, a despeito da vasta literatura sobre a agrometeorologia do trigo, (AUGUSTO STRECK; MAUS ALBERTO, 2006; BATTISTI et al., 2013; MANFRON; LAZZAROTTO; MEDEIROS, 1993; MOTA, 1989), há ainda certa carência de publicações analisando os componentes do balanço de energia sobre essa cultura no país, dando ênfase para a região sul (RUBERT, 2013) e para a clima do cerrado (LUCHIARI; RIHA; GOMIDE, 1997).

O trigo, por suas características ecofisiológicas e de custo de produção, é uma das poucas culturas nacionais que dependem de importações para garantir o abastecimento interno do país. Para melhorar esse cenário é necessário aumentar a produção, consequentemente, aumentando a área plantada. Uma das alternativas é a expansão da cultura do trigo para regiões irrigadas na região centro oeste e sudeste, ou o aumento da eficiência produtiva na região sul do país. Alguns trabalhos indicam que essa cultura irrigada se mostra altamente produtiva além de ser uma alternativa para a rotatividade de culturas (ALOÍSIO et al., 2004;

FLUMIGNAN et al., 2013; FRIZZONE et al., 1996). Assim, a pesquisa básica sobre a cultura pode apoiar a compreensão da interação da cultura com o ambiente e, assim, favorecer o planejamento da instalação e o manejo da cultura nos diferentes ambientes de produção do Brasil.

2. OBJETIVO GERAL

Estudar o balanço de energia e o consumo hídrico para uma cultura de trigo em Piracicaba, São Paulo.

2.1.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar o balanço de energia em diferentes fases fenológicas de uma lavoura de trigo
2. Determinar o consumo hídrico da cultura.
3. Determinar o coeficiente de cultura (K_c)
4. Estudar a interação planta-atmosfera utilizando o fator de desacoplamento (Ω).
5. Analisar as relações entre o K_c e a evapotranspiração de referência (E_{To}) considerando o acoplamento copa-atmosfera.

HIPOTESE

Pode-se determinar o consumo hídrico e o coeficiente de cultivo da cultura do trigo a partir de medidas do balanço de energia e do acoplamento copa-atmosfera.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. IMPORTÂNCIA DA CULTURA DO TRIGO NO BRASIL

O trigo ganhou importância no país por volta do século XVII, com as primeiras lavouras sendo semeadas nos Estados de São Paulo e Rio Grande do Sul. No século XIX, a abertura dos portos e da ferrugem do trigo causaram forte queda na área cultivada, quase levando ao seu desaparecimento no país. Com investimentos do governo esse panorama foi modificado no século XX, aumentando novamente a produção de grãos de trigo (ROSSI; NEVES, 2004).

Atualmente, a produção na safra 2016/2017 foi de 6,7 milhões de toneladas, sendo o consumo interno pouco acima e 12 milhões de toneladas. Assim, a produção nacional conseguiu atender 54,7% de sua demanda interna (CONAB, 2017) e posicionou o Brasil na 16ª posição como produtor de trigo e na 2ª posição como maior importador (CRACKNELL, 2016).

Segundo o Ministério da Agricultura Pecuária e Pesca (MAPA, 2017), o consumo de trigo vem aumentando nos últimos anos no Brasil. Em 2010 o consumo era aproximadamente de 10 milhões de toneladas, enquanto em 2017 estima-se 13 milhões. As perspectivas são de que o consumo interno aumente em média 1,1% ao ano até 2026. Tal panorama é baseado no aumento populacional, também observado em outras áreas do mundo. A demanda mundial por trigo pode aumentar em até 60% até 2050 de acordo com diversos autores (RAUF et al., 2015; ROSEGRANT; AGCAOILI, 2010), indicando bom potencial para os países produtores no futuro.

Afim de elevar a produção nacional e baixar custos de produção, além do sistema de produção da cultura na região sul, há também a alternativa de explorar outras regiões do país, baseando-se em melhoramento genético, irrigação e selecionando áreas de menor risco climático.

A média de produtividade de trigo no mundo é por volta de $3,24 \text{ t.ha}^{-1}$ (PAULSEN; SHROYER; SHROYER, 2016). No Brasil, a produtividade média da última safra (2017) foi de $2,7 \text{ t.ha}^{-1}$, sendo que a região sul obteve apenas a terceira maior produtividade ($2,14 \text{ t.ha}^{-1}$), seguindo o DF e GO (Figura 1), onde a irrigação é mais utilizada.

Figura 1. Série histórica da produtividade média dos dois estados mais produtivos por região nos últimos 17 anos (2000-2017). Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).

O estado de São Paulo é uma opção interessante para a expansão da cultura do trigo, por conta do grande mercado consumidor, condições logísticas e os valores de tributos sobre o produto. A produção de trigo no estado de São Paulo cresceu, de 2013 a 2015, mais de 40% em área plantada. Segundo o Sindicato da Indústria do Trigo (Sindustrigo-SP), essa porcentagem representou um aumento de 70 % na produção do estado. Consequência da substituição de culturas anuais por trigo no Vale do Paranapanema e da ampliação de área plantada nos municípios de Avaré e Itapetininga (CONAB, 2017), notadamente como cultura de rotação, contribuindo quanto a fertilidade, doenças, eficiência no uso de máquinas e no controle de daninhas nas culturas de verão (PIRES, 2017).

3.2.EXIGENCIAS CLIMÁTICAS DA CULTURA DO TRIGO

O trigo é uma cultura cultivada em diversas regiões do globo. Desde regiões com características de clima desérticas, como em alguns países do Oriente Médio, até regiões com altos níveis de precipitação pluviométrica, como na Índia e China (CONAB, 2017). Mesmo sendo cultivado em diversas regiões do globo, essa cultura prefere regiões de clima temperado e moderadamente secos (MANFRON; LAZZAROTTO; MEDEIROS, 1993). As principais áreas produtoras estão no hemisfério norte, se estendendo do Trópico de Câncer até as latitudes de 60°N, abrangendo áreas da Ásia, Europa e América do Norte. A segunda região

com impacto nas produções mundiais estão entre o Trópico de Capricórnio até latitudes de 40°S (Austrália e Argentina) (CASTRO; KLUGE, 1999).

3.2.1. Temperatura do ar

A temperatura do ar ideal para o desenvolvimento do trigo varia entre as cultivares e em relação ao estágio fenológico da cultura. Os impactos podem ser negativos ou positivos dependendo do estágio de desenvolvimento que se encontra a planta (MANFRON; LAZZAROTTO; MEDEIROS, 1993). O crescimento do trigo é acelerado para temperaturas superiores à 20°C, enquanto temperaturas abaixo de 15°C retardam esse crescimento (CASTRO; KLUGE, 1999).

A temperatura média diária para o desenvolvimento do trigo está entre 15°C a 23 °C (FAO, 2012). Entretanto, o intervalo das temperaturas mais indicadas para o pleno desenvolvimento varia em relação ao estágio da cultura (MANFRON; LAZZAROTTO; MEDEIROS, 1993), mas pode-se estabelecer que, de modo geral, as temperaturas cardinais para o crescimento e desenvolvimento do trigo são: temperatura basal inferior (Tb) entre 3,9 a 4,4°C; temperatura ótima (Tot) de 25°C; e temperatura basal superior (TB) entre 30,0 e 32,2°C (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017).

Baixas temperaturas do ar, consequência de geadas, podem causar danos ao trigo. Tais danos serão mais severos ou não, dependendo da fase que ocorre tal evento meteorológico. No início do ciclo, o trigo apresenta boa tolerância à geada tendo sua temperatura letal em -9°C (ROSENBERG; BLAD; VERMA, 1983). Os possíveis danos ao trigo começam a ser mais intensos a partir do alongamento da planta, ocasionado pelo maior conteúdo hídrico presente na planta (MOTA, 1989). Geadas que ocorrem durante o enchimento de grãos podem gerar perdas de produtividade até 33% (CROMEY; WRIGHT; BODDINGTON, 1998).

3.2.2. Consumo hídrico

Em relação ao consumo hídrico, a evapotranspiração (ET) acumulada para a cultura do trigo pode variar de 200 a 500 mm. Sendo que em regiões semiáridas, sem irrigação, pode-se obter valores inferiores a 200 mm e, para regiões com maior demanda atmosférica, os valores de ET podem chegar a 800 mm (FAO, 2012).

No norte da China, em um experimento irrigado conduzido durante três anos o consumo médio do trigo foi de aproximadamente 426 mm, sendo aplicado uma lâmina de 300 mm para todo o ciclo além da precipitação pluviométrica (SUN et al., 2006). Essa região

apresenta clima temperado semiárido, com temperatura média anual de 12,2°C (SUN et al., 2006). Também para o norte da China, usando lisímetros, autores obtiveram uma ET acumulada média de 453 mm para trigo de inverno, com produtividade média superior a 6.000 kg.ha⁻¹ (LIU; ZHANG; ZHANG, 2002). Em Nebraska a evapotranspiração acumulada para o trigo de inverno foi de 609,6 mm para a safra 2008/2009, e de 482,6 mm para a safra 2009/2010 (IRMAK; SHARMA; DJAMAN, 2016).

Com relação ao consumo hídrico do trigo no Brasil, existem poucos trabalhos atuais que abordam essa temática. Em Cruz Alta-RS, o consumo hídrico obtido com o método da correlação de turbilhões (do inglês “eddy covariance”, EC) foi de 256 mm para um ciclo de 149 dias, tendo uma temperatura média de 16°C durante o experimento. Em Piracicaba, em lisímetros, obteve-se um acumulado de ET para o trigo de 347 mm em um ciclo de 120 dias (CESAR DE MELLO LIBARDI; BARCELLOS DA COSTA, 1997). Para a região do cerrado, em trigo irrigado, a ET acumulada variou de 345 a 385 mm para um ciclo de 98 e 101 dias, respectivamente (LUCIARI; RIHA; GOMIDE, 1997). Azevedo et al., (1991) obteve produtividades de 5.260 e 6.086 kg.ha⁻¹, para a região de Planaltina-DF, aplicando uma lâmina total de água de 500 e 600 mm, respectivamente (SANO et al., 2005).

3.3.BALANÇO DE ENERGIA E RAZÃO DE BOWEN

A superfície terrestre é coberta por diferentes tipos de cobertura, onde a interação entre a atmosfera e a superfície se dá de maneiras diferentes. Essa interação é uma troca de massa e energia em diferentes níveis da atmosfera. A quantificação dessa energia, próximo à superfície pode ser representada pelo balanço de energia (Rn), em que esse representa a energia absorvida no sistema superfície-atmosfera.

O Rn pode ser particionado em três principais fluxos de energia: fluxo de calor sensível (H), o fluxo de calor no solo (G) e o fluxo de calor latente (LE). Em que o H e G são responsáveis pelos processos de aquecimento da atmosfera e do solo, respectivamente. Já o LE representa a energia para os processos evaporativos do sistema estudado.

Embasado no princípio da conservação de energia, pode-se equacionar o particionamento de Rn da seguinte maneira (Equação 1) (VALENTE, 2016):

$$Rn = LE + H + G \quad (1)$$

Entre as metodologias para obter a evapotranspiração pode-se destacar três opções: lisímetros, correlação de turbilhões (EC) e o método da razão de Bowen (MRB). O lisímetro é tido como referência neste tipo de estudo, servindo como base para o desenvolvimento de outros métodos mais práticos e viáveis economicamente, já que o custo de implantação e manutenção, além da pequena área de amostragem são limitações para sua utilização (PEÑALVER; VERA-REPULLO; BUENDÍA-JIMÉNEZ, 2015). O EC é atualmente um dos mais empregados para a medição de trocas de calor, massa e momentum em uma superfície (VALENTE, 2016). Entretanto a utilização desse método também requer um alto investimento, pois necessita de equipamentos capazes de mensurar variáveis atmosféricas em alta frequência (BURBA, 2013). Além disso, sabe-se que esse método apresenta certo problema ao fechar o balanço de energia e também a descontinuidade dos dados em alguns casos (FOKEN et al., 2006; MOORHEAD et al., 2017; ONCLEY et al., 2007). Por fim, o MRB ainda é um dos mais utilizados (MOORHEAD et al., 2017) pois em comparação com os sensores utilizados no sistema de EC não necessitam medir em alta frequência, consequentemente mais viáveis financeiramente. Porém apresenta algumas limitações por se tratar de um método de estimativa, sendo as mais comuns um viés causado por instrumentos e a descontinuidade dos dados quando β se aproxima de -1, os quais ocorrem geralmente no início e final do dia devido ao pequeno gradiente de temperatura do ar e pressão atual de vapor (MOORHEAD et al., 2017; TODD; EVETT; HOWELL, 2000).

Vários trabalhos já foram desenvolvidos baseados no MRB e se mostram eficientes para expressar o consumo hídrico da cultura, como: cana de açúcar (INMAN-BAMBER; MCGLINCHEY, 2003)(NASSIF; MARIN; COSTA, 2014), cafezais (RIGHI, 2004), gramado (DA SILVA et al., 2016), soja (ÜNLÜ; KANBER; KAPUR, 2010) e trigo (LUCHIARI; RIHA; GOMIDE, 1997).

Nesse sentido, a utilização do MRB para estudos relacionados ao consumo hídrico é relevante, desde que se leve em consideração a instalação dos sensores de maneira correta. A bordadura insuficiente em relação as superfícies adjacentes é um dos principais problemas dos métodos micrometeorológicos, podendo acarretar em erros oriundos da advecção de outras superfícies, causando inconsistência nos valores de H e LE (RIGHI, 2004). Para diminuir essas inconsistências é importante que os sensores estejam dentro da camada limite em equilíbrio com a superfície (camada limite ajustável), em que dentro dessa camada os fluxos são constantes e representativos à superfície em questão. No geral a relação entre a camada limite ajustada e a bordadura, é 1:50, ou seja, para a cada 1 m acima da cultura são necessários 50 m de bordadura. Entretanto essa relação pode variar de 1:20 à 1:100

dependendo das características do solo circunvizinho (HEILMAN; BRITTIN; NEALE, 1989; NASSIF, 2015).

Em geral, estudos relacionados ao processo de balanço de energia em culturas agrícolas são bastante difundidos. No Brasil estudos para uva (PEDRO JÚNIOR et al., 2015), café (RIGHI, 2004) e (ANGELOCCI et al., 2008), maracujá (SILVA et al., 2007) e soja (RICARDO et al., 2014) já foram realizados. Para a cultura do trigo não é diferente, porém a maior parte dos trabalhos foram desenvolvidos para o hemisfério norte na região da Ásia e Europa (RUBERT, 2013), como o trabalho de Anthoni et al. (2004) envolvendo as trocas gasosas, e os trabalhos sobre o uso eficiente da água (QIU et al., 2008; TALLEC et al., 2013). Porém, mesmo sendo uma cultura muito importante mundialmente, estudos que caracterizam o balanço de energia para essa cultura no Brasil são escassos, porém pode-se citar os trabalhos como de Rubert (2013) e o de Luchari et al., (1997) que realizaram estudos referentes ao balanço de energia e consumo hídrico no trigo na região sul e centro-oeste brasileiro, respectivamente.

3.4.FATOR DE DESACOPLAMENTO (Ω).

O fator de desacoplamento (Ω) desenvolvido por Jarvis e McNaughton (1986) é uma metodologia utilizada para estudar a influência da atmosfera e da condutância estomática na transpiração foliar. Esses autores foram motivados a esse estudo devido ao debate da época em relação a quais fatores mais influenciavam a transpiração da planta, esse questionamento foi polarizado por meteorologistas e fisiologistas, em que cada área estudava a transpiração utilizando métodos diferentes. Enquanto as pesquisas dos fisiologistas eram conduzidas em laboratório para uma única folha ou planta, os experimentos dos meteorologistas eram realizados em grandes áreas à campo. A conclusão de Jarvis e McNaughton (1986) é que não passa de um conflito de opinião e não um conflito de evidência científica, ou seja, ambos estão corretos em relação ao controle ou não controle da transpiração pelos estômatos.

A metodologia do fator de desacoplamento é baseada na interação da superfície foliar com atmosfera adjacente a ela, a qual é separada por uma camada de ar que fica muito próximo à superfície da folha. Nesta camada assume-se que o deslocamento de ar próximo a folha é paralelo a superfície da mesma, tendo um escoamento laminar. Assim o transporte de vapor de água nesse sistema é dito como difuso, podendo aplicar a 1º Lei de Fick (ANGELOCCI, 2002).

Neste sentido Jarvis e McNaughton (1986) derivaram a equação de Monteith (1965) para o processo de balanço de energia na superfície de uma folha. Nesta abordagem o Ω é um indicador que descreve a proximidade do déficit de saturação de vapor de água na atmosfera próxima à folha (Δe) e o déficit de saturação de vapor de água na superfície da folha (Δe_f) (Jarvis e McNaughton, 1986).

Matematicamente o Ω (Equação 2), quando desenvolvido para a escala foliar, é uma função da constante psicrométrica (γ), da declividade da curva de pressão de vapor (s), e das condutâncias: estomática (g_s) e da camada limite foliar (g_b). Sendo governado principalmente por essas duas condutâncias (para explicação matemática do método consultar anexo).

$$\Omega = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{s + \gamma} \frac{g_b}{g_s}} \quad (2)$$

Em suma o Ω pode variar de 0 a 1, indicando uma relação dos déficits de saturação de vapor de água (Equação 3) e consequentemente, indicando qual o tipo de transpiração predomina na folha (Equação 4). A transpiração total da folha é um somatório de duas transpirações: a transpiração em equilíbrio (E_{eq}) e a transpiração imposta (E_{imp}).

$$D_f = \Omega \cdot \Delta e + (1 - \Omega) \cdot \Delta e_f \quad (3)$$

$$E = \Omega \cdot E_{eq} + (1 - \Omega) \cdot E_{imp} \quad (4)$$

A E_{eq} ocorre quando as condições na superfície da folha estão completamente desacopladas do ar fora da camada limite foliar, em que Δe_f tende a um valor de equilíbrio local, ou seja, as características físicas da camada limite foliar independem dos processos turbulentos da atmosfera, como o vento, por exemplo. Assim, o processo de transpiração é governado principalmente do saldo de radiação (R_n) e da condutância estomática (g_s). Nessa condição o fator de desacoplamento tende ao limite superior ($\Omega \rightarrow 1$).

Quando $\Omega \rightarrow 0$ há um acoplamento da folha com a atmosfera, ou seja, o déficit de saturação na superfície foliar é igual ao déficit de saturação fora da camada limite foliar ($\Delta e_f = \Delta e$), assim, pode-se dizer que as características físicas da camada limite foliar estão mais sensíveis aos processos turbulentos da atmosfera, consequentemente a folha também. Neste caso a transpiração é denominada transpiração imposta (E_{imp}), tendo além do R_n a velocidade do vento e o Δe como variáveis atmosféricas importantes no processo evaporativo da folha. Com isso a mudança na taxa de transpiração é mais sensível a variações na condutância estomática.

O Ω já foi estudado para diversas culturas, desde culturas agrícolas até espécies arbóreas, tendo grande variação em seus valores.

Steduto e Hsiao (1998a) estudaram o fator de acoplamento para a cultura do milho para sequeiro e irrigado, em que os valores de Ω variaram de 0,2 a 0,8. Os autores relatam que as condições de irrigado favorecem a um maior desacoplamento da cultura, influenciado principalmente por maiores valores de condutância do dossel (g_c). Além disso, os autores relatam a influência do índice de área foliar (IAF) e da altura do dossel, que nesse caso influenciam as condições micrometeorológicas do dossel, afetando principalmente a resistência aerodinâmica (r_a).

O padrão sazonal no fator de desacoplamento foi observado para a cana de açúcar, no qual Ω nunca superou o limiar de 0,4, em que os valores médios para o período úmido e seco foram de 0,31 e 0,28, respectivamente (NASSIF; MARIN; COSTA, 2014).

Em citros, mais especificamente para lima ácida, os valores de Ω variaram de 0,15 a 0,45 seguindo a variação da condutância do dossel (g_c), sendo diretamente proporcional. Considerando a variação entre o período seco e úmido, assim como a cana de açúcar, nota-se que os maiores valores e menores valores ocorreram para as estações úmidas e secas, respectivamente (MARIN; ANGELOCCI, 2011).

Na cultura da soja tem-se um padrão de desacoplamento na maior parte do ciclo, com valores superiores a 0,8. Em contrapartida na fase inicial e final do ciclo o fator de desacoplamento diminui, indicando um acoplamento com a atmosfera. Esse padrão de acoplamento, segundo os autores, sugere que há um maior controle estomático no processo de evapotranspiração (SOUZA et al., 2016). Além disso, eles constataram uma queda de Ω quando a umidade do solo teve uma diminuição, evidenciando um possível contribuição da condutância estomática da planta (SOUZA et al., 2016).

Para quatro espécies arbóreas, *Fraxinus uhdei*, *Ligustrum lucidum*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Liquidambar styraciflua*, com alturas variando de 13 a 14 m e IAF variando de 4 a 4,5 os autores indicaram um forte acoplamento das árvores com a atmosfera. Os valores variaram em média 0,086 a 0,125, tendo valores mais elevados para a *E. camaldulensis*. A justificativa apresentada pelos autores é que a *E. camaldulensis* apresenta maior copa e suas folhas são 2 vezes maiores que as demais. Esse acoplamento indicou que a transpiração dessas árvores foi dominada pelo déficit de pressão de vapor (Δe) e pela condutância estomática (BALLINAS; BARRADAS, 2016).

Entretanto para o trigo, uma das principais culturas mundiais são escassos os trabalhos recentes relacionados ao fator de desacoplamento. Jarvis e McNaughton (1986) citam os

valores médios para diversas culturas, no qual o trigo apresentou valor médio de 0,6. No Brasil não há até o momento trabalhos focados no estudo do Ω para a cultura do trigo.

Estudos recentes indicam que o fator de desacoplamento pode explicar a demanda hídrica para culturas altamente acopladas com a atmosfera, pois o maior acoplamento da planta pode estar relacionado a diminuição do coeficiente de cultivo (K_c). Esses estudos evidenciam uma nova maneira de se utilizar o K_c em função do aumento da evapotranspiração de referência (E_{To}) para determinar o consumo hídrico e auxiliar no manejo de irrigação (MARIN et al., 2005; MARIN; ANGELOCCI, 2011).

3.5. COEFICIENTE DE CULTURA (K_c)

O coeficiente de cultura (K_c) é definido como a razão entre a evapotranspiração de referência (E_{To}) e a evapotranspiração de cultura (E_{Tc}) (Equação 5). A E_{To} é a evapotranspiração da superfície de referência, na qual é uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 s.m^{-1} e um albedo de 0,23. Essa superfície pode ser interpretada como uma grama verde, bem irrigada, que cobre completamente a superfície do solo e tem altura uniforme (ALLEN et al., 1998). A E_{Tc} representa a evapotranspiração de qualquer superfície vegetada, desde que essa esteja em condições favoráveis para pleno crescimento e desenvolvimento, sem a ocorrência de doenças ou pragas e sem limitações nutricionais (ALLEN et al., 1998).

Assim, o K_c representa a diferença do consumo hídrico da superfície de referência e a cultura, representando os aspectos fenológicos, morfológicos e fisiológicos da cultura (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

$$K_c = \frac{E_{To}}{E_{Tc}} \quad (5)$$

Para facilitar a utilização do K_c no manejo de irrigação, a FAO tabelou seus valores indicando o K_c mais adequado para fase inicial, intermediária e final do ciclo (Tabela 1). Entretanto, esses valores foram desenvolvidos para regiões de clima áridos e semiáridos, fazendo com que para regiões mais úmidas os valores de K_c podem ser inferiores aos indicados pela FAO (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). Assim, além das características como altura e IAF, o K_c é influenciado pelas condições climáticas de cada região (ALLEN et al., 1998).

Tabela 1. Valores do coeficiente de cultura indicados pelo boletim da FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

Trigo	Kc-inicial	Kc médio	Kc-final
Primavera	-	1,15	0,25-0,40
Inverno			
Solo congelado	0,4	1,15	0,25-0,40
Solo não congelado	0,7	1,15	0,25-0,4

Para a cultura do trigo há muitos trabalhos relacionados ao Kc e muitos relatam divergência em relação ao valor proposto pela FAO, indicando que há uma variação nos experimentos. Neste sentido, caso esses experimentos tenham sido conduzidos de maneira correta, o principal fator que afeta o Kc é o clima da região.

Como o Kc é função das condições micrometeorológicas do local há grande variabilidade em seus valores. Para o trigo, em um trabalho desenvolvido na Índia em uma região semiárida, o Kc variou de 0,5 a 1,42 (TYAGI; SHARMA; LUTHRA, 2000). O trabalho desenvolvido na Argélia obteve o Kc para duas regiões distintas, uma subúmida e outra extremamente árida. A região subúmida teve valores de Kc variando de 0,78 a 1,04, enquanto para a região extremamente árida os valores de Kc variaram de 0,50 a 1,35 (LAABOUDI A et al., 2015). No Texas, EUA, o Kc obtido variou de 0,1 a 1,7 ao longo do ciclo (KO et al., 2009). É evidente a grande variabilidade do Kc em função do local no qual foi medido, mostrando-se bastante variável quando comparado aos coeficientes propostos pela FAO.

No Brasil há trabalhos em que os valores de Kc também mudam em relação à área em que o experimento foi desenvolvido. Em Piracicaba, utilizando lisímetros o valor de Kc médio para o ciclo da cultura foi de 0,86 (CESAR DE MELLO LIBARDI; BARCELLOS DA COSTA, 1997). Em Maringá, no Paraná, o Kc mínimo e máximo foram de 0,67 e 1,03 respectivamente (VIEIRA et al., 2016). E em Planaltina, DF, utilizando lisímetros o valor de Kc variou de 0,70 a 1,57 (GUERRA et al., 2003).

Mesmo o coeficiente de cultura sendo amplamente pesquisado no mundo para diversas culturas, nota-se poucos trabalhos referente a cultura do trigo no Brasil. Porém é evidente que se usar esse coeficiente de maneira generalizada haverá erros nas estimativas de ETc. Isso é

evidente quando analisamos a grande variabilidade de K_c entre as diferentes regiões do Brasil.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1.ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na cidade de Piracicaba-SP na área experimental da fazenda Areão situada no campus da Escola Superior Luiz de Queiroz-USP. A área experimental está localizada em: latitude 22°42'56'' S, longitude 47°38'33'' e altitude de 511 m. A cidade de Piracicaba apresenta uma precipitação média anual de 1.386 mm (Tabela 2), sendo caracterizada por verões chuvosos e quentes e invernos secos, consequentemente sendo classificada como Cwa pela classificação de Köppen (CEPAGRI, 2016).

O trabalho foi realizado com a cultivar TBIO-Sossego, indicada para o cultivo de trigo no estado de São Paulo (EMBRAPA, 2017) e que se destaca pela resistência às principais doenças e pragas da cultura e atendendo a exigência de qualidade do mercado para produção do trigo tipo pão.

O experimento foi semeado no dia 30 de maio de 2017 adotando-se um plantio convencional com espaçamento 0,17 m e profundidade variando de 0,03 a 0,05 m, totalizando 53 plantas por metro linear. Tal procedimento resultou em 309 plantas por metro quadrado. A área experimental foi irrigada por aspersão com sistema de irrigação, por meio de pivô central (20 psi, Irrigabras, 90 m³h⁻¹). E o solo da área experimental foi classificado como Nitossolo (VIANNA, 2017). A área total de trigo para o experimento correspondeu ha 27.400 m² (Figura 2).

Figura 2. Imagem aérea da área experimental cultivada com trigo na Fazenda Areão da ESALQ, irrigada por pivô central, indicando o posicionamento da torre micrometeorológica (círculo branco) e da direção predominante do vento na região.

O manejo de irrigação foi controlado utilizando sensores de umidade do solo à 0,2 m de profundidade. O monitoramento tomou como base os valores máximos e mínimos registrados por tais sensores antes da instalação do experimento. O valor máximo de umidade do solo, quando este estava praticamente saturado, foi de $0,4470 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (umidade volumétrica a -10 kPa, representando a umidade na capacidade de campo, CC). E o valor mínimo de umidade foi de $0,3281 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (umidade volumétrica a -15000 kPa representando a umidade no ponto de murcha permanente, PMP). A lâmina de irrigação foi calculada conforme Equação 7, e sempre visando manter o conteúdo de água no solo em 70% de sua capacidade.

$$L_{70} = 0,7.(CC - \frac{(\theta_l + \theta_e)}{2}).100 \quad (6)$$

em que L_{70} é a lâmina aplicada para repor a água à 70% da CAD (mm) ; θ_l a umidade do solo na linha e θ_e a umidade do solo na entrelinha, ambas para profundidade de 0,2 m.

Tabela 2.Média histórica para cidade de Piracicaba, SP, referente ao período de 1917 a 2017.

Mês	Precipitação (mm)	Umidade relativa (%)	Tar. Máxima (°C)	Tar. Mínima (°C)	Tar. Média (°C)
JAN	230.22	77.97	30.03	19.09	24.53
FEV	179.60	77.98	30.44	19.15	24.79
MAR	142.02	77.26	30.07	18.33	24.18
ABR	65.83	75.12	28.51	15.63	22.05
MAI	55.53	76.15	26.09	12.27	19.16
JUN	44.65	75.87	25.06	10.55	17.79
JUL	28.79	70.98	25.36	9.81	17.57
AGO	29.26	64.93	27.43	11.16	19.29
SET	62.02	65.51	28.29	13.59	20.94
OUT	109.44	69.96	29.18	15.86	22.54
NOV	133.51	71.11	29.66	16.93	23.27
DEZ	199.32	75.73	29.83	18.39	24.10
Média	106.68	73.22	28.33	15.06	21.68
Soma	1386.87				

Fonte: Posto meteorológico da Universidade de São Paulo- ESALQ

4.2.MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

O monitoramento das variáveis ambientais se deu por sensores de temperatura e umidade do ar, radiação, umidade e temperatura do solo, velocidade do vento e precipitação (Tabela 3). Para coleta e armazenamento dos dados obtidos pelos sensores, utilizou-se um sistema de aquisição de dados (modelo CR1000, Campbell Scientific, Inc.). Os dados foram coletados a cada cinco segundo, com médias armazenadas a cada 15 minutos.

Os termohigrômetros ficaram separados entre si, verticalmente, em 0,70 m. A distância vertical do termohigrômetro mais baixo foi de 0,30 m em relação a cultura. O sensor de fluxo de calor no solo foi instalado a uma profundidade máxima de 0,05 m. O saldo radiômetro ficou posicionado de maneira a não sofrer interferência de sombra, com uma altura vertical de 1,5 m. Os sensores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), tiveram o seguinte posicionamento: Um sensor (li-190sb) ficou posicionado sempre acima do dossel, enquanto os outros dois sensores (SQ-311) foram instalados na altura do solo. Um posicionado na entrelinha e outro na linha da cultura. O anemômetro de caneca foi instalado a uma altura de 2,0 m. O pluviômetro foi instalado a 1,5 m de altura, posicionado a 3,0 m de distância da torre meteorológica para não ocorrer possíveis interferências de respingo. Os sensores para monitoramento das condições de solo foram instalados na linha e na entrelinha nas profundidades de 0,2 m e 0,5 m.

Tabela 3. Sensores, modelos e marcas utilizados no monitoramento ambiental durante o experimento e a quantidade de sensores instalados (Qnt).

Variáveis	Modelo	Qnt
Temperatura e umidade relativa do ar	HMP155 – VAISALA	2
Sensor de fluxo de calor no solo	HFP01 – Hukseflux	2
Saldo de radiação	NR-Lite 2 – Kipp & Zone	1
Radiação fotossinteticamente ativa	li-190 sb, LI-COR	1
Radiação fotossinteticamente ativa	SQ-311 - Apogee	2
Velocidade do Vento	Anemômetro MET One	1
Precipitação	TE525MM – Texas Instruments	1
Umidade Volumétrica / Temperatura do solo/ Condutividade elétrica	GS3 – Decagon	4

É importante ressaltar que os sensores para estimativa dos fluxos de energia estavam posicionados dentro da camada limite ajustada. Nesta camada os fluxos são considerados constantes e representativos as condições micrometeorológicas da superfície em questão (NASSIF, 2015).

Para determinar a camada limite ajustável utilizou-se a abordagem Righi (2004), o qual é calculado por:

$$\delta = 0,1.Z_0^{0,2} .x^{0,8} \quad (7)$$

sendo δ a altura da camada limite ajustada (m), z_0 é o comprimento da rugosidade da superfície e x a distância da bordadura. Nesse contexto optou-se por adotar uma bordadura de pelo menos 60 m, tendo uma altura da camada limite ajustável de pelo menos 2 m.

4.3.RESISTÊNCIAS A DIFUSÃO DE VAPOR

As condutância a difusão de vapor podem ser interpretadas como resistências, já que essas podem ser reescritas como o inverso da condutância ($r_a=1/g_a$; $r_f = 1/g_f$). Essa abordagem é baseada na 1ª lei de Fick. Considerando a passagem de ar, ou fluxo de ar, não necessariamente turbulento no tempo inicial, passa a ser turbulento quando em contato com a folha, porém em uma camada adjacente muito próximo à folha (sub-camada laminar) esse fluxo é considerado paralelo à superfície da folha, de modo que nessa sub camada o processo de transporte de vapor d'água é tratado como difusivo, consequentemente podendo aplicar a 1ª lei Fick (ANGELOCCI, 2002).

4.3.1. Resistência aerodinâmica (r_a)

Um dos conceitos mais importantes para o estudo dos processos que ocorrem no sistema solo-atmosfera é a resistência aerodinâmica (r_a). No caso do fluxo de vapor entre a vegetação e a atmosfera, pode-se defini-la como uma resistência ao fluxo de vapor dentro da camada limite superficial. O comportamento de r_a é função do sistema de interesse, seja ele uma comunidade vegetal, a copa de uma árvore, a folhagem de um ramo ou mesmo uma única folha.

Na maior parte das culturas agrícolas, onde se tem o máximo aproveitamento do espaço define-se esse sistema como uma cobertura continua (comunidade vegetal). Assim, r_a for estimada por:

$$ra = \frac{[\ln((z-d)/z_o)]^2}{k^2 \cdot u_z} \quad (8)$$

$$z_o = \frac{h^{0,997}}{7,638} \quad (9)$$

$$d = \frac{h^{0,979}}{1,425} \quad (10)$$

em que ra é dada em $s.m^{-1}$; k é a constante de von Karman (igual a 0,4); u_z é a velocidade do vento ($m.s^{-1}$); z é a altura de medida do vento (m); d é o deslocamento do plano zero (m) e z_o é o comprimento da rugosidade da superfície (m); h , nesse caso, será a altura da planta (m) (STANHILL, 1969; SZEICZ; ENDRÖDI; TAJCHMAN, 1969; JONES, 1992)

É importante considerar as condições da atmosfera para estimar a resistência aerodinâmica de uma superfície. A utilização dessa metodologia é aplicável para condições de neutralidade atmosférica. Nesse sentido adotou-se a metodologia de Campbell e Norman (1998), o qual quantifica a convecção que provoca turbulência mecânica no ar. Esse parâmetro é dado por:

$$\zeta = -\frac{k \cdot g \cdot z \cdot H}{\rho_a \cdot c_p \cdot T \cdot u^3} \quad (11)$$

em que H é o fluxo de calor sensível, u a velocidade do vento; k é constante de Von Kármán; c_p é o calor específico do ar; ρ_a é a densidade do ar a pressão constante; g é a aceleração da gravidade; T é a temperatura do ar ($^{\circ}C$); z é altura (m) em que é medido a velocidade do vento.

A determinação para uma atmosfera estável ocorre para valores de ζ positivos, instabilidade têm-se valores negativos de ζ , por fim, para considerar a neutralidade da atmosfera adota-se o intervalo $-0,0325 < \zeta < 0,0325$ (LYRA; PEREIRA, 2007; RUBERT, 2013).

4.3.2. Resistência foliar a difusão de vapor (rf)

Para determinação da resistência foliar à difusão de vapor (rf), utilizou-se o porômetro de equilíbrio dinâmico (modelo Delta T, AP4) (Figura 3). O instrumento funciona medindo o tempo que a uma folha leva para liberar vapor de água suficiente para alterar a umidade relativa em uma pequena câmara com uma quantidade fixa. Isto é comparado com calibração conhecida, a fim de derivar a resistência estomática ou condutância foliar.

Foram realizadas nove medições ao longo do experimento. As medições eram realizadas em intervalos de duas horas ao longo do dia, iniciando a partir das 8 horas da manhã. Em cada medição eram amostradas quinze folhas bandeiras, em um espaço linear de 30 m aproximadamente.

Figura 3. Porômetro utilizado para determinação da resistência foliar à difusão de vapor (rf) na cultura de trigo.

4.4.MEDIDAS BIOMÉTRICAS

Foram realizadas análises biométricas frequentes no trigo, no qual tais análises eram realizadas semanalmente, totalizando 14 campanhas de medida ao longo do ciclo. Todas as análises biométricas foram destrutivas, para obter as seguintes variáveis: (a) a área foliar total por meio do software Quant (LIBERATO, 2003); (b) a altura da planta; (c) massa seca de folha; (d) massa seca de caule. A massa seca dos itens acima foi fracionada e colocada em estufa de ventilação forçada de ar a 70°C até atingirem massa constante, posteriormente o material foi pesado em balança de precisão.

Figura 4. Escala de desenvolvimento de cereais baseado na abordagem de Feekes (1940). A numeração é a divisão adotada por Large (1954) para melhor detalhamento no desenvolvimento da planta.

Os estádios de desenvolvimento seguiram a abordagem de Large (1954), mas para análise dos processos de balanço de energia optou-se por dividir o ciclo em quatro fases: (a) Perfilamento; (b) Alongamento; (c) Espigamento; (d) Maturação (Figura 4) (SCHEEREN; LIMA DE CASTRO; CAIERÃO, 2015).

4.5.FATOR DE DESACOPLAMENTO (Ω)

O fator de desacoplamento é uma função da resistência aerodinâmica (r_a) e da resistência foliar a difusão de vapor (r_f), dado por:

$$\Omega = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{(s + \gamma)} \cdot \frac{r_f}{r_a}} \quad (12)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\frac{(7,5 \cdot T)}{(237,3 + T)}} \quad (13)$$

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,7)^2} \quad (14)$$

em que: γ é o coeficiente psicrométrico igual a 0,062 kPa. °C⁻¹; s é a declividade da curva de pressão de vapor (Equação 14), sendo T em °C e e_s dado em kPa.

4.6. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA

4.6.1. Método da razão de Bowen

O método utilizado para modelar os fluxos de massa e energia, e consequentemente determinar a evapotranspiração do trigo na Fazenda Areão foi o método da razão de Bowen (MRB) (BOWEN, 1926). O MRB estima o fluxo de calor latente (LE) usando medidas à superfície dos gradientes de temperatura e umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo. Aplicando a equação do balanço de energia (Equação 1). Dado que o MRB é expresso pela Equação 15, assim a evapotranspiração é expressa pela Equação 19.

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

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \cdot \gamma \quad (15)$$

$$\lambda = 2,503 * 0,002386 * T_{ar} \quad (16)$$

$$ET = \frac{(R_n - G)}{\lambda \cdot (1 + \beta)} \quad (17)$$

em que ET é a evapotranspiração dada em mm.dia⁻¹; R_n é o saldo de radiação medido sobre a superfície vegetada (MJ.m⁻².dia⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².dia⁻¹); ΔT é o gradiente da temperatura do ar medida nos dois níveis pelos termohigrometros (°C); Δe_a é a diferença de pressão atual de vapor do ar; λ é o calor latente de evaporação (MJ.Kg⁻¹); γ (0,006230068 °C.kPa⁻¹) é a constante psicrométrica.

Righi (2004), afirmou que o MRB pode apresentar incoerência nos valores. Nesse sentido foi aplicado a metodologia proposta por Perez et al., (PEREZ et al., 1999) para considerar apenas os dados que apresentam consistência física, evitando possíveis erros de estimativa (Tabela 4).

Tabela 4. Metodologia para avaliação dos dados do MRB (adaptado de Perez et al., 1999)

Energia Disponível	Pressão atual de Vapor	Razão Bowen	Fluxos de Calor	Condição
R _n – G > 0	Δe _a > 0	β > -1	λE>0 e H≤0 para 1≤β≤0 ou H>0 para β>0	Aceitar
	Δe _a < 0	β < -1	λE<0 e H>0	Aceitar
R _n – G < 0	Δe _a > 0	β < -1	λE>0 e H>0	Aceitar
	Δe _a < 0	β > -1	λE<0 e H≥0 para 1≤β≤0 ou H<0 para β>0	Aceitar

4.6.2. Preenchimento dos dados

A partir do filtro utilizado por Perez et al., (1999) fez-se necessário preencher os dados descartados. Assim, optou-se por fazer uma regressão linear para achar uma equação simples capaz de estimar satisfatoriamente os dados inconsistentes referentes ao intervalo de 15 min (Equação 18). Para obter a equação os dados foram divididos em dois, no qual a primeira parte dos dados serviu para achar a curva de regressão entre a energia disponível ($R_n - G$) e a evapotranspiração estimada.

$$ET_c = 0,3019.(R_n - G) + 0,0136 \quad (18)$$

sendo os valores de R_n e G dados em $MJ.m^{-2}.15min^{-1}$.

A segunda parte dos dados teve como objetivo avaliar o desempenho dessa equação, para isso foi necessário usar algumas estatísticas que descrevem a eficiência, acurácia e precisão das simulações. Os índices estatísticos estão disponíveis na Tabela 5 e a descrição mais detalhada dos métodos estão em anexo.

Tabela 5. Indicadores estatísticos para avaliação do desempenho da modelagem: coeficiente de determinação (R^2); coeficiente de eficiência da modelagem Nash-Sutcliffe (COE); índice BIAS; e raiz quadrada média do erro (RQME)

Estatística	Índice
R^2	0,9042
COE	0,8189
BIAS	-0,1029
RQME	0,0162

4.7.EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada com base nos dados da estação meteorológica da ESALQ, latitude $22^\circ 42' 32'' S$, longitude $47^\circ 37' 45'' O$ e altitude de 548 m. A ET_o foi obtida utilizando o método padrão da FAO, boletim 56 (ALLEN et al., 1998) (Equação 21). -

$$ET_o = \frac{s.(R_n - G)}{(s + \gamma)} + \frac{900.\rho_a.cp.\Delta e}{\lambda.ra.(s + \gamma)} \quad (19)$$

em que ET_o dada em $mm.d^{-1}$; R_n o saldo de radiação em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$; G o fluxo de calor no solo $MJ.m^{-2}.d^{-1}$; ρ é a densidade do ar em $kg.m^{-3}$; cp é o calor específico do ar; Δe o déficit de pressão de vapor (kPa):

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (20)$$

em que e_s (Equação 13) é a pressão de vapor de saturação (kPa) e e_a (Equação 21) é a pressão atual de vapor (kPa).

$$e_a = \frac{e_s \cdot U_R}{100} \quad (21)$$

s é a declividade da curva de pressão de vapor, determinada pela Equação 18 e a resistência aerodinâmica (r_a) para gramado foi obtida da seguinte maneira:

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (22)$$

em que U_2 a velocidade média do vento a 2 m de altura.

4.8. COEFICIENTE DE CULTURA (K_c)

O coeficiente de cultura foi obtido a partir dos dados diários da evapotranspiração de referência (ET_o) e da evapotranspiração de cultura (ET_c). Seguindo a metodologia do boletim da FAO 56.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (5)$$

Essa variável foi analisada nas seguintes fases fenológicas: estabelecimento, perfilhamento, emborrachamento, floração, formação de grãos e maturação.

4.9. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

A produtividade da água, também conhecida como eficiência do uso da água (do inglês: *water use efficiency* - PDA) nesse trabalho foi obtida usando a razão entre produtividade de grãos e a evapotranspiração acumulada no ciclo (WANG et al., 2016).

$$WUE = \frac{P_g}{ET_{ac}} \quad (23)$$

em que PDA é dado em $kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$; P_g é a produtividade de grãos ($kg \cdot ha^{-1}$); ET_{ac} é a evapotranspiração de cultura acumulada para todo o ciclo (mm).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO PERÍODO EXPERIMENTAL

5.1.1. Temperatura do ar e precipitação

O regime de chuvas durante o experimento variou mais que a temperatura do ar quando comparado à média histórica de Piracicaba. Para os quatro meses de experimento, de julho a setembro, obteve-se valores de precipitação abaixo do normal, sendo o mês de julho sem chuvas e junho com 17 mm apenas. Entretanto em agosto o acumulado de chuva ficou acima da média histórica em 21 mm (Tabela 6).

Com base na média histórica para esses quatro meses observou-se um acumulado de 166 mm. No ano de 2017 o acumulado para esse mesmo período foi de apenas 104 mm, sendo importante salientar que os 53 mm em setembro ocorreram na última semana do mês, no qual o experimento já havia sido encerrado. Além disso, a distribuição de chuvas não foi homogênea, fazendo-se necessário o uso da irrigação pra suprir as necessidades hídricas da cultura (Figura 6).

Figura 5. Variação dos elementos meteorológicos: precipitação; temperatura média do ar durante o experimento (Tar_Exp) e a média histórica da temperatura média do ar (Tar_Clima) para Piracicaba. Além das lâminas de irrigação aplicadas durante o experimento.

A temperatura média do ar ficou abaixo da climatologia para julho e agosto, 1,11 °C e 0,67°C, respectivamente. Em setembro a temperatura média do ar foi superior em 2,09°C em relação à climatologia de Piracicaba, tendo valor médio 23,03°C. Para o desenvolvimento do trigo à faixa ideal de temperatura média diária é de 15 a 23°C (FAO, 2012), sendo que valores inferiores a 15°C podem retardar o crescimento da planta e valores superiores a 20°C tem efeito de acelerar o crescimento da mesma (CASTRO; RICARDO A. KLUGE, 1999). Durante o experimento a média da temperatura do ar foi de 18,99°C, dentro da faixa ótima para o desenvolvimento do trigo.

Tabela 6. Valores médios mensais de temperatura do ar e chuva observados ao longo do experimento e média histórica de chuva e temperatura (1917-2017) observado no Posto Meteorológico da ESALQ.

Mês	Temperatura do ar (°C)						Chuva (mm)	
	Experimento			Média Histórica			Experimento	Média Histórica
	Max	Min	Med	Max	Min	Med		
Maio	-	-	-	-	-	-	161	56
Junho	24,63	12,19	17,86	25,06	10,55	17,79	16,5	45
Julho	24,22	9,26	16,46	25,36	9,81	17,57	0	29
Agosto	25,83	12,22	18,62	27,43	11,16	19,29	51	30
Setembro	32,24	14,28	23,03	28,29	13,59	20,94	53	62
Média	26,73	11,99	18,99					

A variação do déficit de pressão de vapor (Δe) ao longo do ciclo do cultivo (Figura 6a) elevou-se, principalmente a partir do mês de agosto, com valores médios diários superiores a 1 kPa. Essa variação é esperada, uma vez que o regime de chuvas foi mal distribuído ao longo do experimento, além de coincidir com as maiores temperaturas do ar no período experimental.

O padrão de variação do Δe observado ao longo do experimento é considerado típico do interior paulista e possivelmente de todo o Sudeste brasileiro nessa época do ano. Isso porque os meses de agosto e setembro são os que apresentam menor pressão atual de vapor (e_a) associada a altos valores de temperatura máxima que elevam os valores da pressão de saturação (e_s), levando aos menores valores anuais de umidade relativa (Tabela 2). O Δe não é normalmente considerada quando se avalia a interação atmosfera-cultura, mas pode afetar

sobremaneira a regulação estomática e, de maneira indireta, a massa do hectolitro de grãos dependendo da fase fenológica em que ocorra (GUARIENTI et al., 2005).

Figura 6. Variação do déficit de pressão de vapor médio diário ao longo do ciclo da cultura do trigo (Figura 6a) e a variação média horária durante o experimento (Figura 6b).

5.1.2. Temperatura e umidade do solo

A temperatura do solo foi baixa nas primeiras fases do ciclo do trigo (Figura 7a), como consequência da temperatura do ar normalmente baixa neste período em Piracicaba e a elevação do conteúdo de água no solo por conta de elevadas precipitações em maio (161 mm), pouco antes da instalação do experimento, mantendo as temperaturas amenas na superfície. Os menores valores de temperatura do solo ocorrem nos períodos coincidentes aos maiores índices de área foliar (IAF) (Figura 7a), que diminuíram a transmissão de radiação solar para o solo e, consequentemente, sua temperatura. O inverso pode ser evidenciado para o final do ciclo, quando a temperatura do solo aumenta devido ao menor IAF e ao menor conteúdo de água no solo. A variação horária da temperatura do solo oscilou em média 1,25°C para a profundidade de 20 cm. Enquanto que para a profundidade de 50 cm essa oscilação não superou 0,2°C ao longo do dia devido justamente a sua profundidade e ao maior conteúdo de água no solo nessa camada.

Figura 7. Variação da temperatura média do solo ao longo do ciclo em duas profundidades (a) e variação horária da temperatura do solo para duas profundidades (b).

A temperatura do solo, principalmente para culturas agrícolas, tem maior importância nos estádios iniciais. Assim como a temperatura do ar tem importância nos processos de crescimento e desenvolvimento da planta, a temperatura do solo apresenta algo semelhante nos processos de germinação e emergência (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017), em que o intervalo da temperatura do solo para o trigo varia de: 3,9 a 4,4 °C para a temperatura mínima; 30 a 32,2 °C para temperatura máxima; 25 °C como temperatura ótima (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; WILSIE; GARCÍA, 1966).

Para a fase de germinação e emergência a temperatura média do solo ficou na faixa dos 20 °C (Tabela 7). Para todo o ciclo a temperatura média do solo foi aproximadamente 19 °C para as duas profundidades mensuradas. Os valores extremos de temperatura do solo ocorreram nos meses de setembro (28,45 °C), para a profundidade de 0,20 m, e julho (15,25 °C) para profundidade de 0,20 m também.

Tabela 7. Valores médios durante o ciclo e médias mensais para temperatura do solo e umidade volumétrica em dois níveis de profundidade, observados ao longo do experimento.

Mês	Temperatura do solo (°C)		Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³)	
	20 cm	50 cm	20 cm	50 cm
Junho	20,09	19,72	0,407	0,462
Julho	17,93	17,45	0,374	0,447
Agosto	18,35	18,43	0,365	0,435
Setembro	20,07	21,03	0,303	0,388
Média	19,11	19,16	0,362	0,433

Ao longo do experimento a umidade do solo manteve-se acima de 0,3 para a profundidade de 20 cm e acima de 0,4 para profundidade de 50 cm (Tabela 7), indicando bom suprimento hídrico para cultura ao longo de todo o ciclo. A queda da umidade do solo em setembro se deu nesse período, pois a cultura se encontrava na fase de senescência, sendo indicado a suspensão da irrigação. Sabidamente, a umidade do solo está relacionada aos principais processos fisiológicos da planta, e o estresse hídrico pode afetar a cultura de diferentes maneiras dependendo da fase em que ocorra. As fases mais sensíveis a deficiência hídrica são a transição do perfilhamento ao emborrachamento, assim como na fase de florescimento. Enquanto que na formação de grão leitoso não há diferença significativa no rendimento de grãos em função da deficiência hídrica. Além disso, em qualquer fase de desenvolvimento, espera-se que até um limiar de -2,0 MPa de deficiência hídrica não haja efeito sobre a produtividade de grãos (RODRIGUES et al., 1998). Em geral, a perda de produção por deficiência hídrica está ligado diretamente a redução da área foliar, em detrimento da redução do número de folhas e do tamanho delas, diminuindo a fotossíntese (LAWLOR; UPRETY, 1993; SANTOS et al., 2012). Entretanto discutir a resposta da deficiência hídrica é algo complexo, pois essa resposta varia de cultivar, principalmente com o desenvolvimento do melhoramento genético. Trabalhos como o de Batista (2017) e Boutraa et al., (2010) fizeram esses estudos mais detalhados sobre a deficiência hídrica em diferentes cultivares de trigo, observando diferença entre cultivares.

Por outro lado, o excesso de água no solo pode causar a hipóxia radicular tendo efeito expressivo sobre o crescimento do trigo (BISPO, 2011). Além disso, com o conteúdo de água no solo elevado cria-se um ambiente favorável para o desenvolvimento de doenças. Para o trigo de sequeiro, quando a umidade do solo está constantemente elevada, essa geralmente está associada a níveis pluviométricos elevados, ou seja, nesse caso há maior nebulosidade e

diminuição da radiação, afetando negativamente o crescimento da parte aérea e radicular, consequentemente diminui a produtividade da cultura (ALBERTO et al., 2006; CUNHA; DALMAGO; ESTEFANEL, 1999). Segundo Guatienti et al., (2004) o excesso de água no solo tem maior impacto negativo no rendimento da cultura quando ocorre próximo a colheita, mais precisamente nos últimos 20 dias. Nesse sentido, Freitas et al., (1985) observou que para um Argissolo Vermelho Amarelo, é importante manter a umidade do solo entre 60 a 80% da capacidade de armazenamento no período que antecede a emergência da folha bandeira, posteriormente na fase reprodutiva é importante manter os valores de 80 a 100%.

Figura 8. Conteúdo de água no solo ao longo e entradas de água no sistema oriundas de irrigação e precipitação no período de 30 de maio à 15 de setembro.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DA CULTURA.

Observou-se que a produção da massa seca de colmo mais a massa da bainha foliar (MSC) seguiu o mesmo padrão da curva de crescimento da altura da cultura (Figura 10), com valores máximos ocorrendo em momentos coincidentes. Isso também foi observado para o índice de área foliar (IAF). A produção de massa seca de folha (MSF) teve uma curva com característica similar a curva de IAF, com um período de máxima produção e um decréscimo em seguida. A massa seca da parte aérea (MSPA) teve valor máximo entre 8.000 kg a 9.000 kg, semelhante ao obtido por Hamada e Pinto (2001). Além disso, o rápido aumento de IAF

(Figura 10) no período de perfilhamento e alongamento, obtido nesse trabalho, também foi observado por Hamada Pinto (2001).

Figura 9. Variação temporal da massa seca da parte aérea (MSPA), de folhas (MSF) e massa seca de colmo mais bainha foliar (MSC).

A altura máxima da cultura do trigo varia entre 0,3 m, para culturas anãs, até 1,5 m para cultivares antigas (CASTRO et al., 2008). No caso da TBIO-Sossego, a altura máxima, aproximada, durante o experimento foi de 0,65 m (Figura 11a), esse valor é característico de cultivares de porte pequeno, quando a altura é inferior a 0,7 m (DEDECCA; PURCHIO, 1952).

O IAF máximo do trigo foi de 4,5 na fase de emborrachamento, ocorrendo na mesma fase fenológica em que Oviedo e Rudorff (2000) e Hamada e Pinto (2001) observaram valores máximos de IAF, 3,39 e 4, respectivamente. Valores mais elevados de IAF foram observados por Luchiari et al., (1997), o qual obteve IAF máximo entorno de 5 nas duas safras estudadas.

Figura 10. Altura da planta (a) e índice de área foliar (b) do trigo ao longo do ciclo.

A produtividade final atingida foi de 4.338 kg.ha^{-1} , produtividade essa superior à média nacional (2.224 kg.ha^{-1}), e dos estados de São Paulo (3.325 kg.ha^{-1}), Minas Gerais (2.760 kg.ha^{-1}) e aproximando-se da média do Distrito Federal (5.000 kg.ha^{-1}). Comparando a produtividade obtida com a principal região produtora de trigo no país (região sul), obteve-se uma produtividade mais elevada. Em relação aos três estados que compõem a região sul, Paraná (2.306 kg.ha^{-1}), Santa Catarina (2.630 kg.ha^{-1}) e Rio Grande Sul (1.826 kg.ha^{-1}), a produtividade no experimento foi superior em pelo menos 1.708 kg.ha^{-1} . Essa comparação mais geral é baseada nos dados da safra de 2017 disponibilizado pela Conab (2018), em que produtividades afetadas por limitações nutricionais e fitossanitárias são computados também. Caso contrário do experimento conduzido, pois tomou-se cuidado para que não houvesse essas limitações.

A variação de produtividade pode estar associada a muitos fatores, podendo se destacar o clima como responsável pela diferença de produtividade entre as diversas regiões do Brasil, como no caso do Distrito Federal (DF) e Rio Grande do Sul (RS). O RS é muito

mais influenciado pela variabilidade climática do que o DF, pois o excesso de chuva pode gerar um ambiente propício para ocorrência de doenças e menor a radiação solar, afetando a produtividade da cultura (ALBERTO et al., 2006; CUNHA; DALMAGO; ESTEFANEL, 1999). Vale lembrar, contudo, que no DF a maior parte do trigo cultivado é irrigado e que a combinação de boa insolação e elevada amplitude térmica favoreçam o desenvolvimento do trigo.

5.3.BALANÇO DE ENERGIA

A variação horária média dos fluxos de energia está ilustrada na Figura 11. Observou-se que os valores de LE ao longo do dia acompanham a curva de Rn, sendo superior durante a madrugada. No início da noite o LE é o fluxo com maior energia, por outro lado o H é menor, e durante a madrugada as linhas do LE e H tende a se aproximarem (Figura 11). Esse processo é consequência do armazenamento de energia na forma de LE e G no sistema durante o dia e a sua liberação a noite. Durante a madrugada a energia armazenada no solo é liberada para atmosfera com intuito de equilibrar o gradiente de temperatura, uma vez que a temperatura do solo é mais elevada que a temperatura do ar. Além disso há o efeito do orvalho, que libera energia para transforma o vapor de água próximo a superfície do dossel em água líquida, objetivando aquecer as camadas de ar próximo ao dossel.

Figura 11. Variação média horária para os fluxos de energia para todo o ciclo do trigo

A influência da sazonalidade e das características da cultura são bastante evidentes quando analisados os fluxos de energia horários por fase fenológica (Figura 12). Do aspecto

do fluxo de calor no solo (G) notou-se que nas fases de alongamento (Figura 12b) e espigamento (Figura 12c), o fluxo só é maior que 0 depois das 10h30min, influenciado principalmente pelo maior IAF que contribuiu para diminuição da radiação incidente sobre o solo. Dado o período de cultivo, os valores de H decaíram mais rapidamente no período da tarde, passando a apresentar valores negativos por volta das 17:30, durante a maior parte do ciclo. Na Figura 12 observou-se um aumento médio de $0,2 \text{ MJ.m}^{-2}15\text{min}^{-1}$ de R_n máximo (às 12 horas) entre as fases de perfilhamento (Figura 12a) e maturação (Figura 12d). Além desse fator, é importante lembrar a influência do índice de área foliar e do conteúdo de água no solo, já que no início do ciclo o IAF foi inferior ao IAF na fase de maturação e o conteúdo de água no solo era mais elevado no início do ciclo.

Segundo a literatura, essa tendência é adequada para a cultura do trigo, como indicado por Luchiari et al., (1997) e Rubert (2013) que conduziram os trabalhos para a região do cerrado e sul do país, respectivamente. Os resultados obtidos por esses autores indicam uma variação semelhante em relação a R_n , LE, G e H, com os primeiros valores negativos de H a partir das 15h e valores positivos apenas a partir das 10h.

Figura 12. Variação média horária dos fluxos de energia nas fases fenológicas da cultura: (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação.

Na média de todo o ciclo, a cultura do trigo indicou valores de LE correspondentes a 81,17% de Rn, enquanto o H representou 14,13 % (Figura 13). Tais valores foram semelhantes aos obtidos por Luchiari et al., (1997) para a região do cerrado Brasileiro, que obteve 80% de LE, 13% de H e 7% de G, em relação ao particionamento do Rn. Entretanto, Cruz Alta-RS (RUBERT, 2013), observou valores médios diários de LE superior ao Rn, com $H = 7,8 \text{ W.m}^{-2}$; $G = -1,72 \text{ W.m}^{-2}$; $LE = 73,17 \text{ W.m}^{-2}$; $Rn = 70,95 \text{ W.m}^{-2}$; em porcentagem esses valores representaram 9,87% e 103,12% de Rn, respectivamente para H e LE. Isso pode ser efeito de advecção ou de picos de medida contaminando as medias das variáveis, apesar desses elevados valores de LE serem fisicamente questionáveis, é bem sabido que as incertezas dos métodos micrometeorológicos podem conduzir a este tipo de imprecisão. Segundo Allen et al., (2011) os métodos para estudos relacionados a evapotranspiração,

consequentemente balanço de energia, apresentam erros esperados em suas estimativas. Tais erros estão associados à limitação física do método, instrumentação e inexperiência do pesquisador.

Figura 13. Particionamento do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor latente (LE) (a) e fluxo de calor sensível (H) (b) para todo o ciclo da cultura.

Em relação as fases fenológicas houve uma variação desse particionamento, consequência do IAF e da umidade do solo. O valor de LE na fase de perfilhamento foi de 83,34% (Figura 14a), na fase de alongamento 89,08% (Figura 14b), espigamento 81,52 % (Figura 14c) e na maturação 73,4 % (Figura 14d). Os maiores valores de IAF ocorreram na fase de alongamento e espigamento, indicando uma maior contribuição da transpiração das plantas no processo de evapotranspiração.

O H mostrou tendência de elevação nas duas últimas fases fenológicas (Figura 15), com valores de 16,43 e 19,87 % de R_n para a fase de espigamento e maturação, respectivamente. Tais valores coincidem com o decréscimo de IAF (Figura 10b), uma vez que redução do IAF permite a incidência de maior fração da radiação sobre a superfície do solo e, consequentemente, a temperatura da superfície do solo (Figura 7a). Além disso, durante a fase de maturação, quando o IAF já era inferior a 1,5 e a cultura havia entrado em senescência, a irrigação foi encerrada e o nível de umidade do solo diminuiu (Figura 8), favorecendo o aumento de H em relação a LE no sistema.

Figura 14. Particionamento do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE) em diferentes fases fenológicas: (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação

Figura 15. Particionamento do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor sensível (H) por fase fenológica do trigo. (a) perfilhamento; (b) alongamento; (c) espigamento; (d) maturação.

5.4. RESISTÊNCIAS À DIFUSÃO DE VAPOR

5.4.1. Resistência foliar - r_f

Os valores medidos de r_f para o trigo variaram ao longo do ciclo, com menores valor mínimo na fase de emborrachamento (20 s.m⁻¹) e valor máximo no final do ciclo (500 s.m⁻¹), indicando uma média geral de $r_f = 147$ s.m⁻¹. Nas fases de emborrachamento, floração, formação de grão e maturação as médias foram 99, 135, 213 e 367 s.m⁻¹ respectivamente, tendo desvio padrão elevado mais elevado na época de emborrachamento. Para a cultura do trigo há trabalhos que indicam uma resistência foliar a partir de 50 s.m⁻¹ (HATFIELD, 1985;

OKE 2002) até 379 s m^{-1} (RUBERT, 2013). A grande variabilidade temporal e espacial nas medições de rf dificultam a análise (ANGELOCCI; MARIN; RIGHI, 1998), tornando a média pouco representativa dos valores de rf na copa. Por isso, a Figura 16 busca contribuir para a interpretação dos dados de rf a partir da distribuição de frequência relativa junto com a frequência relativa acumulada, representando também os dois períodos de agrupamento dos dados.

Essa análise permitiu afirmar com maior confiança que a resistência foliar aumentou conforme fase fenológica. No das duas primeiras fases analisadas percebe-se que a maior concentração ocorrem nos intervalos de 50 a 100 s.m^{-1} , para emborrachamento, e de 100 a 150 s.m^{-1} , na fase de floração. Por outro lado, nas fases de formação de grão e maturação os valores se concentraram no intervalo de 200 a 250 s.m^{-1} e 350 a 450 s.m^{-1} , respectivamente. Esse aumento é uma resposta da planta, devido a diminuição da condutância estomática, em função do aumento de Δe que ocorreu nas fases finais do ciclo (FARQUHAR; SHARKEY, 1982)

Figura 16. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para a resistência foliar nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d). rf é o valor médio para fase e σ é o desvio padrão para a fase.

Figura 17. Variação média horária e diária da resistência foliar à difusão de vapor em comparação com o déficit de pressão de vapor (Δe) (a e b) e com o saldo de radiação (R_n) (c e d).

Os maiores valores de r_f ocorreram a partir das 16h, horário da última porometria, respondendo a diminuição de R_n (Figura 17c) e o aumento gradativo de Δe (Figura 17a) ao longo do dia. Em escala diária esse padrão também é observado, em que o aumento de Δe (Figura 17b) e R_n (Figura 17d) ao longo do ciclo coincide com o aumento de r_f . Pode-se inferir que esse aumento de r_f indica que a planta diminui a perda de água para atmosfera diminuindo a abertura estomática.

Figura 18. Variação média horária e diária da resistência foliar à difusão de vapor em comparação com a temperatura da folha (a e b) e com a velocidade do vento medida a 2 m (c e d).

Com relação a velocidade do vento e a temperatura da folha não houve um padrão bem definido para nenhuma escala temporal. O esperado seria que com maiores velocidades de vento a planta diminuísse a abertura estomática para evitar a perda de água em excesso. O que pode-se dizer é que para velocidades acima de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ a r_f teve um aumento, porém a diminuição da velocidade do vento não necessariamente fez com que r_f diminuísse (Figura 18d).

5.4.2. Resistência aerodinâmica- r_a

A resistência aerodinâmica é diretamente proporcional a altura e rugosidade da cultura e tem relação inversa com a velocidade do vento. Quando a taxa de crescimento foi acelerada, na fase de emborrachamento, observou-se grande variação nos valores estimados de r_a (Figura 20a e 20b). Por outro lado, nas duas fases finais avaliadas, quando a planta já estava com a taxa de crescimento estável, a variação de r_a diminuiu consideravelmente sendo a velocidade do vento o principal fator de sua variação.

Valores máximos de r_a foram estimados para a fase de emborrachamento, no qual o valor máximo de r_a foi 100 s.m^{-1} , o mínimo chegou a 16 s.m^{-1} e valor médio foi de 57 s.m^{-1} . Por outro lado, nas duas épocas finais a média de r_a diminuiu para $18,3 \text{ s.m}^{-1}$ (formação de grãos) e $33,6 \text{ s.m}^{-1}$ (maturação). O valor médio absoluto encontrado foi de 43 s.m^{-1} para todo o ciclo da cultura, sendo tal valor similar ao de Rubert (2016), a qual obteve $39,54 \text{ s.m}^{-1}$.

Figura 19. Variação diária da resistência aerodinâmica a difusão de vapor (r_a) ao longo do ciclo da cultura. Cada ponto na figura representa a média diária de r_a nos mesmos dias de campanhas porométricas, e as barras verticais representam o desvio padrão diário.

Figura 20. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para a resistência aerodinâmica nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d).

5.5.FATOR DE DESACOPLAMENTO

O fator de desacoplamento é dado em função das resistências a difusão de vapor, a resistência aerodinâmica (r_a) e a resistência foliar (r_f). Essa relação é claramente exemplificada na Figura 21, a qual nota-se que quanto maior for a razão entre r_f e r_a , maior será o acoplamento da planta com a atmosfera.

Figura 21. Relação fator de desacoplamento (Ω) em função da razão entre r_f e r_a

Quando a resistência foliar é uma ordem de grandeza superior a resistência aerodinâmica, os valores de Ω sempre estão abaixo de 0,3, indicando um forte acoplamento entre planta e atmosfera (Figura 21). A quantificação desse valor pode ser interpretada como uma porcentagem de interação da superfície da planta ou dossel com a atmosfera. Neste caso, por exemplo, o valor 0,3 informa que 70% do processo de transpiração foliar é decorrente da transpiração imposta e que o Δe da superfície foliar é igual (Δe_f) ao Δe da atmosfera (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986). Por outro lado, quando Ω tende a 1, por exemplo 0,8, pode-se dizer que 80% da transpiração é tida como transpiração em equilíbrio. Nesse caso o Δe_f encontra um valor de equilíbrio local, desacoplando da atmosfera, e nesse caso não há necessidade de controle estomático na transpiração e a variável atmosférica que mais influencia o processo de transpiração é o R_n pois as condições físicas na superfície da folha diferem da atmosfera circunvizinha (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986).

Figura 22. Relações entre o fator de desacoplamento (Ω) com (a) o saldo de radiação (R_n); (b) déficit de pressão de vapor (Δe); (c) resistência aerodinâmica (ra); (d) velocidade do vento (U_2); (e) resistência foliar à difusão de vapor (rf) e (f) temperatura foliar.

Na Figura 22, apresentam-se as relações entre as principais variáveis relacionadas aos padrões de abertura estomática e desacoplamento da folha com a atmosfera, evidenciando a dependência de Ω em relação a r_a e r_f (Figura 22c, Figura 22d e Figura 22e), bem como as fracas relações indiretas com R_n , DPV e a T_f com Ω (Figura 22a, Figura 22d e Figura 22f). Na Figura 22 fica também evidente que r_a apresenta maior correlação com Ω especialmente quando há elevação dos valores de r_f acima de 120 s.m^{-1} , indicando fisiologicamente que existe um maior controle estomático nesta condição.

A variação horária do fator de desacoplamento é representada na Figura 23a, onde se observa a ausência de tendência definida ao longo do dia para Ω , com valor médio próximo de 0,53. Esse padrão é causado pela grande variabilidade de Ω ao longo do ciclo da cultura (Figura 23b), com tendência ao desacoplamento no início do ciclo, enquanto que no final do ciclo, a transpiração é principalmente imposta pela atmosfera livre, uma vez que a cultura tende ao acoplamento. Por definição, isso significa que a transpiração de equilíbrio é definida principalmente pelo saldo radiação e que r_f é relativamente baixa. Por outro lado, quando a transpiração é imposta, a velocidade do vento, em conjunto com o DPV atuam fortemente e, neste caso, há forte controle estomático por parte da cultura na regulação do processo transpiratório (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986).

Figura 23. Variação média horária (a) e diária (b) do fator de desacoplamento (Ω) para o período de emborrachamento à maturação.

A variação ao longo do ciclo é descrita para outras culturas também, como a soja, a qual permanece a maior parte do ciclo desacoplada da atmosfera (valor médio de 0,8), tendendo a acoplar com a atmosfera nos primeiros e últimos 20 dias do ciclo quando há um

menor IAF (SOUZA et al., 2016). Além disso, neste trabalho, os autores destacam que a alta disponibilidade hídrica junto com o menor DPV atmosférico favoreceram o desacoplamento durante a maior parte do ciclo, pois nesse caso a condutância estomática sempre se manteve elevada, ou seja, menor r_f . Esse mesmo padrão foi obtido na cultura do arroz ($\Omega=0,85$), na região do Santarém no Pará, cultivada no período úmido do local, quando as condições de umidade do ar e do solo favoreceram a alta condutância estomática (SAKAI et al., 2004). Para pastagem, avaliada em dois períodos, seco e úmido, os valores de Ω foram significativamente diferentes. No período úmido, nota-se valores mais elevados de Ω (0,6-0,7), indicando um maior desacoplamento da planta com a atmosfera, por outro lado no período seco a média diminui para 0,4, ou seja, um maior acoplamento da planta com atmosfera (SAKAI et al., 2004).

Na cana de açúcar há apenas uma pequena variação de Ω entre o período seco e úmido, sendo média para o período seco de 0,28 e no período úmido de 0,31 (NASSIF; MARIN; COSTA, 2014). Em outro trabalho para cana de açúcar, conduzido no vale do São Francisco, os valores de Ω foram bem superiores. O valor médio foi de 0,74, porém os autores ressaltam que os maiores valores ocorreram na estação chuvosa, enquanto os menores valores ocorreram no período sem chuva e quando a irrigação foi suspensa ($\Omega = 0,61$ e $0,69$) (FRANCISCO et al., 2012).

Em lima ácida a variação de Ω também responde as estações secas e úmidas, na qual a estação chuvosa tem valores de Ω superiores a 0,3, com máximo de 0,42, enquanto na estação seca os valores não superaram 0,2 (MARIN; ANGELOCCI, 2011).

Para o milho em um experimento conduzido em tratamento irrigado e sequeiro os autores obtiveram os maiores valores de Ω para irrigado e menores para sequeiro. Os valores para o tratamento irrigado iniciaram em 0,8 e no final do ciclo os valores chegaram em 0,2. Enquanto que no tratamento de sequeiro também iniciaram na faixa de 0,8, porém no final do ciclo chegaram há valores menores que 0,1. Os autores concluíram que o acoplamento da cultura à atmosfera depende, em parte, da densidade de plantas, da condutância foliar e das condições micrometeorológicas do local (STEDUTO; HSIAO, 1998).

Para o trigo também se observou um padrão diferente de acoplamento entre o período seco e úmido. Considerando as 4 fases fenológicas avaliadas, observou que nas duas primeiras fases há uma maior tendência ao desacoplamento do trigo, justificada pelo maior conteúdo de água no solo e pelo menor Δe . Nas duas últimas fases (formação de grão e maturação), houve um aumento considerável de Δe , sendo necessário assim um maior controle estomático da

cultura, elevando consequentemente os valores de rf, tendendo ao acoplamento com atmosfera.

Figura 24. Distribuição de frequência relativa e frequência relativa acumulada para o fator de desacoplamento (Ω) nas fases fenológicas: Emborrachamento (a); Floração (b); Formação de grão (c); Maturação (d). Ω são os valores médios por fase e σ é o desvio padrão

Ainda, mota-se uma correlação entre IAF e os valores de Ω , em que os valores de IAF mais elevados coincidiram com os maiores valores de desacoplamento, como por exemplo nos DAS 29, 38, 44, 52 e 58 (Tabela 9). Essa relação coincide com a observação de Steduto e Hsiao (1998), pois no final do ciclo do trigo, com a queda de IAF, tem-se uma modificação do microclima da cultura e o maior acoplamento com a atmosfera. Isso fica mais claro quando

tomamos a cultura da soja como exemplo, que tem cobertura continua e menor espaçamento que a cultura de lima ácida.

Tabela 8. Médias diárias de índice de área foliar (IAF), déficit pressão de vapor (Δe), velocidade do vento (U_2), saldo de radiação (R_n), umidade do solo para duas profundidades (θ), resistências aerodinâmicas (r_a) e a foliar a difusão de vapor (r_f) e o fator de desacoplamento (Ω) e evapotranspiração de cultura (ET_c)

DAS	IAF	Δe (kPa)	U_2 ($m.s^{-1}$)	R_n ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)	θ_{20} ($m^3.m^{-3}$)	θ_{50} ($m^3.m^{-3}$)	r_a ($s.m^{-1}$)	r_f ($s.m^{-1}$)	Ω	ET_c ($mm.d^{-1}$)
29	3.4	0.9	1.4	8.36	0.367	0.456	78	79	0.78	2.80
38	3.6	0.9	2.0	5.20	0.332	0.442	61	114	0.69	1.81
44	3.8	0.9	1.4	8.65	0.331	0.429	63	113	0.68	2.69
52	4.1	1.2	2.2	9.20	0.411	0.456	34	113	0.56	3.85
58	3.5	1.1	1.6	10.28	0.413	0.462	42	144	0.55	3.92
83	1.9	0.5	2.9	7.09	0.423	0.467	18	195	0.25	2.43
93	1.7	1.2	2.7	12.84	0.337	0.439	18	238	0.25	4.21
99	1.5	2.4	1.6	10.64	0.305	0.405	33	366	0.29	4.13
Média	2.7	-	-	-	0.370	0.447	42	143	0.54	-

*DAS = Dias após semeadura

5.6.CONSUMO HÍDRICO E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

Durante parte do período estudado a ET_o se manteve sempre abaixo da ET_c , tendo o padrão bem definido entre as duas curvas de evapotranspiração (Figura 25). A queda de ET_c observada próxima aos 80 DAS foi consequência da alta nebulosidade e chuva, ocorrida durante 4 a 5 dias, associada a redução do Δe e do R_n . Além disso, a influência da fase de transição entre inverno e primavera, promoveu um incremento da radiação incidente elevando R_n e, consequentemente, elevando os níveis de evapotranspiração (Figura 25).

Os picos de ET_c ocorreram na fase de emborrachamento e de formação de grãos, com valores superiores a $5 mm.d^{-1}$ (Figura 25). Porém, a fase que se observou a maior média de ET_c foi na floração ($3,43 mm.d^{-1}$), seguido por formação de grãos ($3,23 mm.d^{-1}$) e emborrachamento ($3,16 mm.d^{-1}$). Libardi et al., (1997) estudando trigo, ciclo de 120 dias, obteve os seguintes valores: $2,21 mm.d^{-1}$ (Emborrachamento), $3,74 mm.d^{-1}$ (Floração), $5,48 mm.d^{-1}$ (Formação de grãos) e $2,12 mm.d^{-1}$ (Maturação). Nesse caso o valor médio máximo dele ocorreu na fase de formação de grãos, diferente desse estudo que teve máximo na floração. Isso é justificado devido na fase de enchimento de grãos (agosto), ter ocorrido um

longo período com nebulosidade, teve-se grande nebulosidade, diminuindo o R_n e queda nos valores de ET_c .

Tabela 9. Evapotranspiração de cultura (ET_c) e de referência (ET_o) por fase fenológica e ciclo do trigo.

Fase fenológica	ET_c (mm)	ET_c (mm.d ⁻¹)	ET_o (mm)	ET_o (mm.d ⁻¹)
Estabelecimento	6.6	0.7	16.9	1.9
Perfilhamento	35.5	2.0	30.3	1.7
Emborrachamento	94.8	3.2	62.7	2.2
Floração	65.2	3.4	53.6	2.8
Formação de grão	64.6	3.2	48.3	3.0
Maturação	34.0	2.8	52.2	4.4
Ciclo	300.8	2.8	266.3	2.6

Figura 25. Variação da evapotranspiração de cultura (ET_c) e da evapotranspiração de referência (ET_o) ao longo do ciclo do trigo

A evapotranspiração acumulada do trigo, nos 110 dias de experimento foi de 300,8 mm, com ET_c média diária de 2,8 mm.d⁻¹. Esses valores variam principalmente em função da característica climática do local em que foi conduzido o experimento (Tabela 9). Tal valor pode ser comparado diretamente com o trabalho de Libardi et al., (1997), que obteve 348 mm e média diária de 3,0 mm.d⁻¹ para a cultura do trigo em Piracicaba em um ciclo de 120 dias em 1997. Essa diferença pode ter sido devido ao método para obtenção da ET_c , que no caso do experimento de Libardi et al., (1997) foi por meio de lisímetros; na diferença entre os

cultivares; no ciclo fenológico da cultura, com uma diferença de 10 dias. Há, ainda, a variação das condições meteorológicas em que o experimento foi submetido, e isso fica mais evidente quando se analisa a diferença de evapotranspiração em locais distintos no Brasil.

No Brasil a área cultivada se estende da região sul ao centro-oeste e a ET_c acumulada para cada local evidentemente tem variabilidade no tempo e entre os locais, além de haver cultivares específicas. Dito isso, vale lembrar que no cerrado brasileiro, em dois experimentos, a ET_c acumulada para o trigo foi de 345 mm e 384 mm (LUCHIARI; RIHA; GOMIDE, 1997), indicando a característica já mencionada de dias quentes e noites frias, umidade relativa do ar baixa e maior radiação durante boa parte do ano. Além disso devido a sua latitude essa região pouco é afetada por eventos como frentes frias, que podem trazer períodos de nebulosidade que interferem no R_n do sistema. Essa característica proporciona uma alta evapotranspiração mesmo em caso de ciclo reduzido. Na a região sul (Cruz Alta-RS) onde as condições climáticas são diferentes das encontradas no cerrado brasileiro, para o ciclo de 149 dias a evapotranspiração acumulada foi de 252 mm (RUBERT, 2013). O Rio Grande do sul situa-se em latitudes muito mais altas, sendo fortemente influenciada pela sazonalidade da radiação e exposta a um regime de chuvas bem distribuído ao longo do ano. Essa distribuição de chuvas faz com que a umidade relativa do ar seja sempre elevada quando comparada a outras regiões, além disso a alta nebulosidade afeta a radiação incidente e em detrimento disso ocorre a diminuição de R_n.

A evapotranspiração acumulada é uma das formas de se estudar a produtividade da água fazendo uma simples relação entre matéria seca total (grãos) e ET_c acumulada no ciclo. Segundo Quisenberry e Reitz (1967) o trigo tem uma produtividade da água (PDA) relativamente superior a outras culturas, pois apresenta certa tolerância a deficiência hídrica devido sua origem ser de regiões semiáridas. Porém, duas fases fenológicas são sensíveis a falta de água florescimento e formação de grão (FRIZZONE; OLITTA, 1990).

O valor encontrado para o PDA neste trabalho foi de 14,31 kg.ha⁻¹.mm⁻¹. Os trabalhos no Brasil relacionados ao PDA em relação a produção de grãos de trigo são escassos, dificultando a comparação. Segundo WANG (2017), para tratamento irrigado há um melhor aproveitamento no uso da água na produção de grãos. Em seu trabalho, em 8 anos avaliados para tratamento de sequeiro e irrigado na China, ele obteve valores de PDA superiores a 20 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ para produtividades variando de 9.000 – 10.000 kg.ha⁻¹.

Mesmo para outras regiões do mundo existe grande variabilidade na PDA para a cultura do trigo, pois essa é uma função de condições de clima, irrigação, características do solo, nutrição entre outros aspectos. Essa grande variação é relatado no trabalho de Sadras et

al. (2010), que reuniu estudos realizados no sudeste da Austrália, China, grandes planícies da América do Norte e na bacia do Mediterrâneo, no qual a média de PDA foi de $9,9 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Austrália), $9,8 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (China), $8,9 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (América do Norte), $7,6 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Mediterrâneo). Nesse sentido, o intervalo indicado é de 6 a $17 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ para irrigado e $5\text{-}10 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ para sequeiro (SADRAS; GRASSINI; STEDUTO, 2010).

5.7. COEFICIENTE DE CULTURA

O Kc médio para o ciclo foi de 1,08, com valores mais elevados na fase de emborrachamento (Figura 26a), que abrangeu o final de junho e grande parte do mês de julho. No mês de julho não houve precipitação e toda a água de entrada no sistema foi por meio da irrigação. Além do fator climático pode-se observar o desenvolvimento da planta, em que o IAF para o período de emborrachamento estava próximo de 3,5. Na fase de maturação, por outro lado, o Kc diminuiu rapidamente no final do ciclo como mostra a Figura 27f.

O Kc médio obtido neste trabalho é praticamente igual ao Kc médio indicado pela FAO, que é 1,15 (Allen et al., 1998), mas difere dos outros trabalhos publicados no Brasil. Comparando com o único trabalho sobre Kc da cultura do trigo para Piracicaba (Libardi et al., 1997), a maior divergência está na fase em que se obteve os valores máximos de Kc e a grandeza dos valores obtidos pelos autores. Libardi et al., (1997), usando lisímetros, obteve valor médio de 0,85 para todo o ciclo, tendo o maior valor de Kc na fase de formação de grão 1,16. Ao comparar com os resultados obtidos para Piracicaba, nota-se que o valor médio para o ciclo foi relativamente superior (1,08) e a fase de maior Kc foi durante o emborrachamento da cultura (1,46).

Essa diferença entre o Kc obtido em Piracicaba pode estar associada ao método de estimativa da ETc e a característica do cultivar, como IAF e altura. O uso de lisímetros, ainda que considerado como método de referência para quantificação da ETc pode apresentar certa limitação, como representar uma pequena área do cultivar (PEÑALVER; VERA-REPULLO; BUENDÍA-JIMÉNEZ, 2015). Além disso, o manejo de irrigação utilizado também pode interferir, pois este está diretamente associado a área/superfície molhada, assim sistemas que apresentam irrigação localizada tendem a ter menores valores de Kc (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Figura 26. Relação entre evapotranspiração de cultura (ETc) e evapotranspiração de referência (ETo) para fase de estabelecimento até maturação (a) e para fase de estabelecimento até formação de grão (b).

Além da instrumentação, do método e do cultivar o clima tem influência na variação de Kc. O trabalho de Laaboudi et al., (2015) avaliou o Kc para o trigo em 4 tipos diferentes de clima na Argélia: sub úmido, semiárido, árido e muito árido, indicando grande variabilidade de Kc, tanto entre locais quanto em relação aos valores por estágio fenológico. Essa influência do clima em relação aos valores de Kc fica mais evidente quando são analisados os valores de Kc para diferentes áreas do mundo (Tabela 11), no qual se observou que para regiões mais secas e quentes os valores de Kc se elevam. No Brasil esse padrão foi observado claramente entre o Kc obtido por Vinicius et al., (2016), para Maringá-PR, e por Guerra et al., (2003) para Planaltina-DF, no qual os valores médios para o ciclo foram 0,76 e 1,20, respectivamente. Isso é conseqüenciada maior quantidade de radiação sobre Planaltina junto com a maior demanda atmosférica.

Figura 27. Relação entre evapotranspiração de cultura (ET_c) em função da evapotranspiração de referência (ET_o) para 3 fases fenológicas: Estabelecimento (a), Perfilhamento (b), Emborrachamento (c), Floração (d), Formação de grão (e) e Maturação (f).

Figura 28. Variação de K_c diário ao longo do ciclo, com valor-médio do perfilhamento até a maturação

Tabela 10. Caracterização climática das regiões referentes aos valores do Kc da Tabela 11.

Local	Lat.	Lon.	Altura (m)	Temperatura Média anual (°C)	Precipitação Anual (mm)	Classificação de Koppen	País	Referência
Maringá-PR	23°25' S	51°56'O	542	17.7	1276	Cfa	Brasil	(VINICIUS et al., 2016)
Piracicaba-SP	22°42'S	47°30'O	576	21.7	1387	Cwa		(LIBARDI et al., 1997)
Planaltina-DF	15°35'S	47°42'O	1175	21.7	1433	Aw		(GUERRA et al., 2003)
Uvalde	29°13'N	99°45'O	283	18.5	610	Cfa	Estados Unidos	(KO et al., 2009)
Argel	26°41'N	03°60'L	19	17.7	707	Csa	Argélia	(LAABOUDI A et al., 2015)
Lamtar	35°04'N	00°48'L	571	15.6	457	Csa	Argélia	
Touggourt	33°04'N	06°05'L	75	21.4	63	BWh	Argélia	
Adrar	27°49'N	00°18'L	278	24.3	16	BWh	Argélia	
Karnal	29°43'N	76°58'L	245	24.4	667	Cwa	Índia	(TYAGI et al., 2000)
Pequim	39°37'N	116°25'L	30	12.1	610	Dwa	China	(WANG et al., 2017)

*Cfa: Clima temperado chuvoso e quente, com precipitação bem distribuída ao longo do ano; Cwa: clima subtropical úmido, com verões chuvosos e invernos secos.; Aw: Duas estações bem definidas em relação a chuva, verões com alto nível de precipitação e invernos secos.; Csa: Verão quente e seco, inverno úmido com chuvas ; BWh: clima desértico com pouca precipitação e grande amplitude térmica.; Dwa: Clima frio com neve, tendo verão quente e chuvoso.

Tabela 11. Valores do coeficiente de cultura (Kc) para diversos locais com características climáticas distintas.

Coeficiente de Cultura - Kc					
	PER	EMB	FL	FDG	MAT
Maringá-PR	0,67	0,67	1,01	1,03	0,42
Piracicaba-1997	0,36	0,79	1,11	1,16	0,45
Piracicaba-2017	1,12	1,45	1,23	1,32	0,77
Planaltina-DF	0,70	1,57	1,57	1,57	0,60
Uvalde	0,58	0,95	1,15	0,90	0,65
Argel	0,70	1,00	1,12	1,05	0,60
Lamtar	0,75	1,00	1,19	0,90	0,80
Touggourt	1,00	1,10	1,29	1,05	0,90
Adrar	0,80	1,10	1,35	1,10	1,00
Pequim (65-85% CC)	0,73	1,03	1,29	0,94	0,72
Pequim (75-100% CC)	0,88	1,15	1,44	1,19	0,82
Karnal	0,50	1,36	1,36	1,24	0,42

*Piracicaba -1997 experimento de Libardi et al., (1997); Piracicaba -2017 resultados desta dissertação; CC = Capacidade de Campo; PER = Perfilhamento; EMB = Emborrachamento; FL= Floração; FDG = Formação de grãos; MAT = Maturação.

A grande variabilidade do Kc é um dos principais fatores que alertam para o uso generalizado deste para estudos e principalmente para o manejo de irrigação, devido à grande divergência para os valores tabelados pela FAO (CESAR DE MELLO LIBARDI; BARCELLOS DA COSTA, 1997; KO et al., 2009; LAABOUDI A et al., 2015; VINICIUS et al., 2016). Nesse sentido, uma abordagem é verificar a variação de Kc em função da ETo, uma vez que há uma diminuição dos valores de Kc em função do aumento da ETo (Figura 29). Observou-se que há uma pequena inclinação decrescente para Kc em função do aumento da ETo, sendo essa inclinação causada pelo rápido decréscimo de Kc nas fases finais do ciclo do Trigo. Pode-se inferir que para altos valores de ETo talvez não seja necessário utilizar Kc tão elevados, o que representaria uma economia de água e energia para o produtor irrigante, sem risco de perda de produtividade.

Figura 29. Variação do coeficiente de cultura (K_c) em função da evapotranspiração potencial (E_{To}) para todo o ciclo da cultura.

Essa variação de K_c em função da E_{To} já foi mencionada para outras culturas, em que os autores relatam que essa queda é uma característica de culturas altamente acopladas com atmosfera (MARIN et al., 2005; MARIN; ANGELOCCI, 2011; NASSIF, 2015; NASSIF; MARIN; COSTA, 2014). Entretanto o trigo não pode ser definido como uma cultura altamente acoplada, uma vez que o valor de Ω obtido foi 0,53, indicando momentos de desacoplamento e acoplamento ao longo do ciclo. Observa-se que próximo da DAS de 80 quando a cultura estava na fase de formação de grãos há uma queda considerável de K_c (Figura 30), e por consequência há também uma queda de Ω nessa fase. Posteriormente na fase de maturação, quando teve a suspensão da irrigação os valores de K_c diminuíram rapidamente, podendo inferir que essa rápida queda respondeu ao alto acoplamento da cultura no final do ciclo. Porém o fator de desacoplamento só explica em partes a queda do K_c , como pode ser observado na Figura 31 em que para Ω tendendo a 1 os valores de K_c aumentam, e quando Ω tende a 0 os valores de K_c diminuem.

Nesse sentido, foi realizado uma divisão de K_c em função de intervalos de E_{To} , assim como feito por Marin et al., (MARIN et al., 2016), visando contribuir para um uso mais eficiente desse coeficiente. Entretanto para aperfeiçoar essa divisão de K_c por faixa de E_{To} , no caso desse estudo, os intervalos foram feitos por fase fenológica.

Figura 30. Variação do coeficiente de cultivo (K_c) e do fator de desacoplamento (Ω) em relação ao ciclo da cultura.

Figura 31. Relação coeficiente de cultura (K_c) e fator de desacoplamento (Ω).

Tabela 12. Variação de Kc em função de intervalos da evapotranspiração de referência (ET_o) e fases fenológicas.

Fase Fenológica	Intervalo de ET _o (mm.d ⁻¹)			
	ET _o ≤ 2	2 < ET _o ≤ 3	3 < ET _o ≤ 4	ET _o > 4
	Coeficiente de cultivo (Kc)			
Estabelecimento	0,44 ± 0,03	0,65 ± 0,39	-	-
Perfilhamento	0,79 ± 0,38	1,31 ± 0,30	-	-
Emborrachamento	1,42 ± 0,19	1,48 ± 0,16	1,41 ± *	*
Floração	1,32 ± 0,14	1,29 ± 0,29	1,12 ± 0,23	1,19 ± *
Formação de grão	1,27 ± -	-	1,31 ± 0,07	1,38 ± *
Maturação	-	-	1,15 ± 0,28	0,65 ± 0,36
Ciclo	1,09±0,43	1,34 ± 0,30	1,25 ± 0,17	0,75 ± 0,41

“-“ não ocorreu ET_o para aquele intervalo; * número insuficiente de amostra para calcular desvio padrão.

6. CONCLUSÕES

Tendo em vista o objetivo do trabalho, conclui-se:

1. O fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (G) e o fluxo de calor no solo representam, para todo o ciclo, respectivamente 81,17 %, 14,13 % e 4,7% do saldo de radiação (Rn).
2. A evapotranspiração acumulada para todo o ciclo do trigo foi de 301 mm, com valores médios diários de 2,8 mm.d⁻¹. Além o uso eficiente da água na produção de grãos foi 14,3 kg.ha⁻¹.mm⁻¹.
3. A de desacoplamento médio para o trigo foi de 0,53, entretanto apresentou grande variabilidade ao longo do ciclo. Tendo valores de 0,68 (emborrachamento), 0,55 (floração), 0,26 (formação de grãos) e 0,30 (maturação). Há indícios que essa variação foi causada pelo aumento do Δe , variação do IAF e pelo conteúdo de água no solo.
4. Os valores de Kc obtidos nesse trabalho foram distintos de outras regiões do Brasil, indicando que o clima é uma das variáveis importantes na quantificação dessa variável. Os valores obtidos foram: 0,58 (estabelecimento), 1,12 (perfilhamento), 1,46 (emborrachamento), 1,23 (floração), 1,32 (formação de grão), 0,77 (maturação).
5. O trigo apresentou queda nos valores de Kc em função do aumento da ETo, entretanto não foi uma cultura perfeitamente acoplada com a atmosfera, sendo assim essa queda do Kc não pode ser unicamente explicada pelo maior acoplamento da planta com atmosfera.
6. Com a abordagem para definir os valores de Kc em função de intervalos de ETo, pretende-se melhorar a aplicação do coeficiente em estudos e práticas agrícolas. Dessa maneira o Kc deixa de ser um parâmetro que só varia em função do ciclo da cultura respondendo também as condições atmosféricas.
7. Os valores obtidos em função dos intervalos de ETo foram: 1,09 (ETo $\leq$ 2), 1,34 (2<ETo $\leq$ 3), 1,25 (3<ETo $\leq$ 4) e 0,75 (ETo>4). Tais valores diminuem se comparados à metodologia atual, o que pode proporcionar uma economia de água e energia na agricultura irrigada.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, C. M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067–1075, 1 jul. 2006.
- ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899–920, 2011.
- ALOÍSIO, A. M. J. et al. Manejo da Irrigação para o Trigo no Sistema Plantio Direto Critérios para o Manejo da Irrigação. **Comunicado Técnico 91 Embrapa**, 2004.
- ANGELOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. **Piracicaba: O autor**, 2002.
- ANGELOCCI, L. R. et al. Radiation balance of coffee hedgerows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 274–281, jun. 2008.
- ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; RIGHI, E. Z. **Variação sazonal e ao longo do dia da condutância estomática e da transpiração de lima ácida “Tahiti” em pomar irrigado em Piracicaba, SP**. Congresso da sociedade botânica de São Paulo. **Anais...**1998
- ANTHONI, P. M. et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1–2, p. 55–67, 20 jan. 2004.
- ASSENG, S. et al. Hot spots of wheat yield decline with rising temperatures. **Global change biology**, v. 23, n. 6, p. 2464–2472, 2017.
- AUGUSTO STRECK, N.; MAUS ALBERTO, C. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesq. agropec. bras.**, v. 41, n. 9, p. 1351–1359, 2006.
- AZEVEDO, J. A. DE et al. **Níveis de tensão de água no solo e suspensão da irrigação em três períodos de crescimento do trigo (Triticum aestivum L.) irrigado em solo de cerrado: efeito sobre a produtividade, componentes da produção, desenvolvimento e uso de água..** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., 1991
- BALLINAS, M.; BARRADAS, V. L. Transpiration and stomatal conductance as potential mechanisms to mitigate the heat load in Mexico City. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 152–159, 1 dez. 2016.
- BALTOKOSKI, V. et al. CALIBRAÇÃO DE MODELO PARA A SIMULAÇÃO DE VAZÃO E DE FÓSFORO TOTAL NAS SUB-BACIAS DOS RIOS CONRADO E PINHEIRO – PATO BRANCO (PR) (1). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 253–261, 2010.
- BATISTA, F. DA P. S. **POTENCIAL DE TOLERÂNCIA À SECA DE GENÓTIPOS DE TRIGO E SOJA EM CONDIÇÃO DE CERRADO**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

- BATTISTI, R. et al. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 390–396, 2013.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As Plantas e o Clima : Princípios e Aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017.
- BISPO, N. B. **Seleção de genótipos e análise da tolerância do milho ao encharcamento do solo**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- BOUTRAA, T. et al. Effect of water stress on growth and water use efficiency of some wheat cultivars Effect of water stress on growth and water use efficiency (WUE) of some wheat cultivars (Triticum durum) grown in Saudi Arabia. **Journal of Taibah University for Science**, v. 3, p. 39–48, 2010.
- BURBA, G. **Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates**. [s.l.] LI-Cor Biosciences, 2013.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998.
- CASTRO, P. R. .; KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de cultivos anuais**. [s.l.] Nobel, 1999.
- CASTRO, P. R. C. et al. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. [s.l.] Agronômica Ceres, 2008.
- CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 10 maio. 2017.
- CESAR DE MELLO LIBARDI, V.; BARCELLOS DA COSTA, M. CONSUMO D'ÁGUA DA CULTURA DO TRIGO (TRICUTUM. n. 1, p. 16–23, 1997.
- CLEUGH, H. A. et al. Hydrology Modelling sensible heat fluxes from a wheat canopy: an evaluation of the resistance energy balance model List of symbols c~. **Journal of Hydrology**, v. 164, n. 164, p. 127–152, 1995.
- CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A Cultura do Trigo**. [s.l.: s.n.].
- CONAB, 2018. **Conab - Série Histórica - Dashboard**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safras/safra-serie-historica>>. Acesso em: 27 abr. 2018.
- CRACKNELL, R. Wheat: The Crop Wheat Production and Consumption. **Encyclopedia of Food and Health**, p. 478–485, 2016.
- CROMEY, M. G.; WRIGHT, D. S. C.; BODDINGTON, H. J. Effects of frost during grain filling on wheat yield and grain structure. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 26, n. 4, p. 279–290, dez. 1998.

- CUNHA, G. R. DA; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V. ENSO influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 127–138, 1999.
- DA SILVA, L. D. B. et al. Desempenho do método do balanço de energia-razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 516–529, 2016.
- DEDECCA, D. M.; PURCHIO, M. J. Variedade Agrícolas de Trigo (*Triticum Aestivum* L.): Caracterização Botânica de algumas variedades em experimentação em São Paulo. **Bragantia**, v. 12, n. 3, p. 20–53, 1952.
- EMBRAPA. **Cultivo de Trigo**. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_76293187_sistemaProducaoId=3704&p_r_p_-996514994_topicoId=3>. Acesso em: 12 jun. 2017.
- FAO. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. **Estudio FAO: Riego Y Drenaje**, v. 66, 2012.
- FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. STOMATAL CONDUCTANCE AND PHOTOSYNTHESIS. **Annu. Rev. Plant Physiol**, 1982.
- FLUMIGNAN, D. L. et al. INFLUENCE OF IRRIGATION ON WHEAT CROP. **Eng. Agríc**, v. 2533333, n. 11, p. 75–8875, 2013.
- FOKEN, T. et al. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmos. Chem. Phys. Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 4395–4402, 2006.
- FRANCISCO, S. et al. Fator de desacoplamento em um canavial irrigado no Submédio do Vale do São Francisco. v. 168, p. 849–858, 2012.
- FRIZZONE, J. A. et al. Efeito de diferentes níveis de irrigação e adubação nitrogenada sobre componentes de produtividade da cultura do trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 6, p. 425–434, 1 jun. 1996.
- FRIZZONE, J. A.; OLITTA, A. F. L. Efeitos da supressão da água em diferentes fases do crescimento na produção de trigo. **Engenharia Rural**, v. 1, n. 1, p. 1–76, 1990.
- GUATIENTI, E. M. et al. Influência das temperaturas mínima e máxima em características de qualidade industrial em rendimento de grãos de trigo. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 24, n. 4, p. 505–515, 2004.
- GUERRA, A. F. et al. Necessidade Hídrica no Cultivo de Feijão, Trigo, Milho e Arroz sob Irrigação no Bioma Cerrado. 2003.
- HAMADA, E.; PINTO, H. S. **Avaliação do Desenvolvimento do Trigo Utilizando Medidas Radiométricas em Função de Graus-Dia**. Anais X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**Foz do Iguaçu: 2001
- HATFIELD, J. L. Wheat Canopy Resistance Determined by Energy Balance Techniques 1. **Agronomy Journal**, v. 77, n. 2, p. 279–283, 1985.

- HEILMAN, J. L.; BRITTIN, C. L.; NEALE, C. M. U. FETCH REQUIREMENTS FOR BOWEN RATIO MEASUREMENTS OF LATENT AND SENSIBLE HEAT FLUXES*. **Elsevier Science Publishers B.V.**, v. 44, p. 261–273, 1989.
- INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research** , v. 83, p. 125–138, 2003.
- IRMAK, S.; SHARMA, V.; DJAMAN, K. Winter Wheat (*Triticum aestivum* L .) Winter Wheat (*Triticum aestivum* L .) Evapotranspiration (Crop Water Use) and Crop Coefficients. **Nebraska Extension**, n. November, 2016.
- JARVIS, P. G.; MCNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in ecological research**, v. 15, p. 1–49, 1986.
- JARVIS, P. P. G. **Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor**. I International Symposium on Water Relations in Fruit Crops 171. **Anais...**1984
- JONES, H. G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- KO, J. et al. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of cotton and wheat. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1961–1967, 2009.
- LAABOUDI A et al. Crop coefficient and water requirement for wheat (*Triticum aestivum*) in different climate regimes of Algeria. **International Journal of Agricultural Policy and Research**, v. 3, n. 8, p. 328–336, 2015.
- LAWLOR, D. W.; UPRETY, D. C. Effects of water stress on photosynthesis of crops and the biochemical mechanism. In: **Photosynthesis: Photoreactions to Plant Productivity**. [s.l.] Springer, 1993. p. 419–449.
- LIBERATO, J. R. Desenvolvimento e avaliação do software QUANT para quantificação de doenças de plantas por análise de imagens. 5 dez. 2003.
- LIU, C.; ZHANG, X.; ZHANG, Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 111, p. 109–120, 2002.
- LIU, H. et al. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 483–492, 2010.
- LUCHIARI, A. J.; RIHA, S. J.; GOMIDE, R. ENERGY BALANCE IN IRRIGATED WHEAT IN THE CERRADOS REGION OF CENTRAL BRAZIL BALANÇO ENERGÉTICO EM TRIGO IRRIGADO NA REGIÃO DOS CERRADOS DO BRASIL CENTRAL. **Sci. Agric.**, v. 54, p. 78–88, 1997.
- LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. DIFICULDADES DE ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE AERODINÂMICA PELO PERFIL LOGARÍTMICO DO VENTO

- SOBRE VEGETAÇÃO ESPARSA EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA. v. 25, n. 2, p. 187–197, 2007.
- MACHADO, A. R.; MELLO JUNIOR, A. V.; WENDLAND, E. C. Avaliação do modelo J2000/JAMS para modelagem hidrológica em bacias hidrográficas brasileiras J2000/JAMS model evaluation for Brazilian watersheds hydrological simulation. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 327–240, 2017.
- MANFRON, P. A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S. L. P. TRIGO - Aspectos agrometeorológicos. **Ciência Rural**, v. 23, n. 2, p. 233–239, ago. 1993.
- MAPA, M. DA A. P. E P. Projeções do Agronegócio Brasil 2016/17 a 2026/27: Projeções de Longo Prazo. p. 125, 2017.
- MARIN, F. R. et al. EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION REQUIREMENTS OF A COFFEE PLANTATION IN SOUTHERN BRAZIL. **Experimental Agriculture**, v. 41, n. 2, p. 187–197, 2005.
- MARIN, F. R. et al. Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 139–145, 2016.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1091–1096, abr. 2011.
- MARTINS, F. B. et al. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 505–514, dez. 2014.
- MOGHIMI, M. R.; POOYA², M.; MOHAMMADI³, A. Study on energy balance, energy forms and greenhouse gas emission for wheat production in Gorge city, Kordestan province of Iran. **European Journal of Experimental Biology**, v. 4, n. 3, p. 234–239, 2014.
- MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms. Symposium of the society of experimental biology, Vol. 19 (pp. 205-234)**Cambridge: Cambridge University Press, , 1965.
- MOORHEAD, J. E. et al. Evaluation of Sensible Heat Flux and Evapotranspiration Estimates Using a Surface Layer Scintillometer and a Large Weighing Lysimeter. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 17, n. 10, 14 out. 2017.
- MOTA, F. S. DA. Agrometeorologia do trigo no Brasil. **Campinas: Sociedade Brasileira de Agronomia**, 1989.
- NASSIF, D. S. P. Evapotranspiração , transpiração e trocas gasosas em canavial irrigado. p. 123, 2015.
- NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; COSTA, L. G. Evapotranspiration and Transpiration Coupling to the Atmosphere of Sugarcane in Southern Brazil: Scaling Up from Leaf to Field. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 250–254, 20 set. 2014.

- ONCLEY, S. P. et al. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. **Boundary-Layer Meteorol.**, v. 123, p. 1–28, 2007.
- OVIEDO, A. F. P.; RUDORFF, B. F. T. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DO TRIGO (*Triticum aestivum* L.) SUBMETIDA AO ESTRESSE HÍDRICO. **Rev. biociência**, v. 6, n. 2, p. 39–47, 2000.
- PAULSEN, G. M.; SHROYER, J. P.; SHROYER, K. J. Wheat: Agronomy. In: **Encyclopedia of Food Grains**. [s.l.] Elsevier, 2016. p. 176–185.
- PEDRO JÚNIOR, M. J. et al. Balanço de energia e consumo hídrico de vinhedo de ‘Cabernet Franc’. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 234–238, 2015.
- PEÑALVER, L. R.; VERA-REPULLO, J. A.; BUENDÍA-JIMÉNEZ, M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 103–113, 2015.
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. [s.l.: s.n.].
- PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141–150, 1999.
- PIRES, J. L. F. **A importância do trigo para a sustentabilidade da agricultura brasileira - RSS - Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/noticias-rss/-/asset_publisher/HA73uEmvroGS/content/id/23416529>. Acesso em: 5 jan. 2018.
- QIU, G. Y. et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 11, p. 1848–1859, 1 out. 2008.
- QUISENBERRY, K. S.; REITZ, L. P. Wheat and wheat improvement. **Wheat and wheat improvement**, 1967.
- RAUF, S. et al. Breaking wheat yield barriers requires integrated efforts in developing countries. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 8, p. 1447–1474, 2015.
- RICARDO, A. et al. Componentes do balanço de energia da soja estimada por meio Components of soy energy balance estimated by satellite images. p. 59–65, 2014.
- RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 28 jan. 2004.
- RODRIGUES, O. et al. Efeito da deficiência hídrica na produção de trigo 1. **Pesq. agropec. bras.**, v. 33, n. 6, p. 839–846, 1998.
- ROSEGRANT, M. W.; AGCAOILI, M. Global food demand, supply, and price prospects to 2010. **International Food Policy Research Institute, Washington, DC USA**, 2010.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. [s.l.] Wiley, 1983.

- ROSSI, M. R. (COORD. .; NEVES, M. F. (COORD. . **Estratégias para o trigo no Brasil** Editora Atlas S.A., , 2004.
- RUBERT, G. C. D. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA ESTUDO DO BALANÇO DE ENERGIA EM UM CULTIVO DE TRIGO NO SUL DO BRASIL. 2013.
- SADRAS, V. O.; GRASSINI, P.; STEDUTO, P. **Status of water use efficiency of main crops**. Rome: FAO, 2010.
- SAKAI, R. K. et al. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 895–907, 2004.
- SANO, E. E. et al. ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ-CENTRAL NO DISTRITO FEDERAL ENTRE 1992 E 2002. v. 25, n. 2, p. 508–515, 2005.
- SANTOS, D. DOS et al. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 836–842, ago. 2012.
- SILVA, T. J. A. et al. BALANÇO DE ENERGIA E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTURAS IRRIGADAS DE MARACUJAZEIRO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN. v. 27, n. 2, p. 392–403, 2007.
- SOUZA, P. J. O. P. DE et al. **Consumo hídrico da soja no nordeste Paraense**. [s.l: s.n.]. v. 1
- STANHILL, G.; STANHILL, G. A Simple Instrument for the Field Measurement of Turbulent Diffusion Flux. **Journal of Applied Meteorology**, v. 8, n. 4, p. 509–513, ago. 1969.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes III. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, p. 201–213, 1998.
- SUN, H.-Y. et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 85, p. 211–218, 2006.
- SZEICZ, G.; ENDRÖDI, G.; TAJCHMAN, S. Aerodynamic and surface factors in evaporation. **Water Resources Research**, v. 5, n. 2, p. 380–394, abr. 1969.
- TALLEC, T. et al. Crops' water use efficiencies in temperate climate: Comparison of stand, ecosystem and agronomical approaches. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 69–81, 15 jan. 2013.
- TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 335–348, 2000.

- TYAGI, N. K.; SHARMA, D. K.; LUTHRA, S. K. Evapotranspiration and Crop Coefficients of Wheat and Sorghum. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 4, p. 215–222, jul. 2000.
- ÜNLÜ, M.; KANBER, R.; KAPUR, B. **African journal of biotechnology**. [s.l.] Academic Journals, 2010. v. 9
- VALENTE, F. C. P. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA. 2016.
- VIANNA, M. DOS S. **Functional, structural and agrohydrological sugarcane crop modelling: towards a simulation platform for Brazilian farming systems**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2017.
- VIEIRA, P. V. D. et al. African Journal of Agricultural Research Determination of wheat crop coefficient (Kc) and soil water evaporation (Ke) in Maringa, PR, Brazil. **African Journal of Agriculturaç** , v. 11, n. 44, p. 4551–4558, 2016.
- VINICIUS, P. et al. Determination of wheat crop coefficient (Kc) and soil water evaporation (Ke) in Maringa, PR, Brazil. **African Journal of Agricultural**, v. 11, n. 44, p. 4551–4558, 2016.
- WANG, J. et al. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain. **Field Crops Research**, 2017.
- WANG, Y. et al. Cultivar Mixture Cropping Increased Water Use Efficiency in Winter Wheat under Limited Irrigation Conditions. **Plos one**, 2016.

ANEXO

1. DESENVOLVIMENTO FÍSICO-MATEMÁTICO DO FATOR DE DESACOPLAMENTO PARA UMA ÚNICA FOLHA.

Jarvis e MacNaughton (1984) derivaram a equação de Monteith (1965) baseado nos fluxos de energia que ocorrem na superfície da folha, na camada limite e na camada de ar adjacente à camada limite, considerando uma folha anfiestomática como referência.

Admitindo-se que o fluxo de calor latente (LE) possa ser escrito como um somatório do fluxo de ambos os lados da folha tem-se:

$$LE = LE_1 + LE_2 \quad (A1)$$

em que, LE_1 é o fluxo de calor latente para a parte superior da folha e LE_2 é o fluxo de calor latente para o lado inferior da folha, ambos dados em $J.m^{-2}.s^{-1}$. Reescrevendo a Equação A1 em termos de: Temperatura da folha (T), pressão de vapor de água fora da camada limite (ea) em kPa, pressão de saturação de vapor de água (e^*) em kPa, coeficiente psicrométrico (γ) kPa.K⁻¹, calor específico molar de ar seco à pressão constante (cp) dado em $J.mol^{-1}.K^{-1}$, e em função das condutâncias estomática (gs) e da camada limite (gb) dadas em $mol.m^{-2}.s^{-1}$.

$$LE = \frac{cp}{\gamma} \left[\frac{e^*(T_f) - ea}{1/gs_1 + 1/gb_1} \right] + \left[\frac{e^*(T_f) - ea}{1/gs_2 + 1/gb_2} \right] \cdot \frac{cp}{\gamma} \quad (A2)$$

As duas condutâncias, estomática e da camada limite, podem ser escritas como uma condutância total para o fluxo de valor latente (Gv).

$$Gv = \frac{1}{(1/gs_1 + 1/gb_1)} + \frac{1}{(1/gs_2 + 1/gb_2)} \quad (A3)$$

Assim, substituindo a equação A3 em A2, tem-se o fluxo de calor latente como:

$$LE = \frac{cp.Gv[e^*(T_f) - ea]}{\gamma} \quad (A4)$$

Para o fluxo de calor sensível (H) a dedução é similar ao LE, considerando os dois lados da folha. Entretanto apenas há influência da condutância na camada limite, podendo escrever esse termo com uma condutância total ao fluxo de calor latente (G_H).

$$G_H = gb_1 + gb_2 \quad (A5)$$

$$H = H_1 + H_2 = cp.(T_f - T_a).gb_1 + cp.(T_f - T_a).gb_2 = cp.G_H.(T_f - T_a) \quad (A6)$$

em que T_a é a temperatura do ar fora da camada limite.

Agora, expandindo a equação A4 para inserir o termo referente ao déficit de pressão de saturação do ar externo a camada limite (Da), tem-se:

$$LE = \frac{cp \cdot G_v}{\gamma} \cdot [e^*(T_f) - e^*(T_a) + e^*(T_a) - ea] \quad (A7)$$

$$LE = \frac{cp \cdot G_v}{\gamma} \cdot [s(T_f - T_a) + e^*(T_a) - ea] = \frac{cp \cdot G_v}{\gamma} \cdot [s(T_f - T_a) + Da] \quad (A8)$$

em que s é a tangente à curva de pressão de vapor de saturação e Da é a aproximação linear do déficit de saturação. -

$$s = \left[\frac{de^*(T)}{dT} \right]_T = T_f \quad (A9)$$

$$Da = e^*(T_f) - s(T_f - T_a) - ea \quad (A10)$$

A aplicação da equação A8 é limitada por T_f ser uma variável desconhecida. Nesse sentido é necessário utilizar a relação do balanço de energia:

$$Rn = H + LE \quad (A11)$$

em que Rn é o saldo de radiação na mesma unidade de H e LE . Assim substituindo A6 em A10 obtém-se:

$$Rn - LE = cp \cdot G_H \cdot (T_f - T_a) \quad (A13)$$

$$T_f - T_a = \frac{(Rn - LE)}{cp \cdot G_H} \quad (A14)$$

Agora aplicando a equação A14 em A8 para eliminar $T_f - T_a$ tem-se,

$$LE = \frac{cp \cdot G_v}{\gamma} \cdot \left[\frac{s(Rn - LE)}{cp \cdot G_H} + Da \right] \quad (A15)$$

desenvolvendo A15, pode reescreve-la da seguinte maneira:

$$LE = \frac{\varepsilon \cdot Rn + c_p \cdot Da \cdot G_H / \gamma}{\varepsilon + G_H / G_v} \quad (A16)$$

em que $\varepsilon = s/\gamma$ é uma função da temperatura.

Nesta equação assume-se que Rn tem um valor fixo. Isso não é uma verdade absoluta do aspecto físico, uma vez que Rn varia em função da temperatura da folha, não sendo uma variável completamente conhecida. Pode-se resolver isso incluindo na análise uma condutância radiativa, mas as dificuldades algébricas tendem a complicar a análise das

características mais importantes da transpiração das folhas em função da condutância estomática (Monteith, 1973; Jarvis e MacNaughton, 1984).

A equação A16 aparentemente parece simples, porém a quantificação das condutâncias totais (G_H, G_V) e suas análises são complexas. Para simplificar o desenvolvimento do caso geral apenas duas características de folhas são consideradas: folha amfiestomática simétrica, onde considera-se que $g_{b1} = g_{b2} = g_b$ e $g_{s1} = g_{s2} = g_s$; e folha hipoestomática, em que $g_{s2} = 0$. Jarvis e MacNaughton (1984) assumiram que a razão entre $g_{bH}/g_{bV} = 1$, mesmo o valor mais provável para essa razão ser de 0,93, com o objetivo de simplificar o desenvolvimento matemático.

Para uma folha anfiestomática simétrica, a razão das condutâncias totais de calor sensível e calor latente (G_H/G_V) é reduzida à $(1 + g_b/g_s)$, assim a equação A16 é reescrita como:

$$LE = \frac{\varepsilon.Rn + 2.c_p.Da.g_b/\gamma}{\varepsilon + 1 + g_b/g_s} \quad (A17)$$

Se a condutância da camada limite da folha é muito pequena, tendendo a 0, o processo evaporativo é governado principalmente pelo saldo de radiação.

$$E_{eq} = \frac{\varepsilon.Rn}{(\varepsilon + 1)} \quad (A18)$$

Essa é a transpiração para uma folha anfiestomática simétrica considerando um completo desacoplamento com o ar fora da camada limite. Nesta situação o ar é separado por uma camada limite muito grossa. A transpiração expressão por A18 é conhecida como transpiração em equilíbrio (E_{eq}), a qual pode ser obtida de outra maneira desde que o calor e o vapor de água tenham caminhos diferentes. Quando g_b é pequeno, o déficit de saturação na superfície da folha, D_l , deve ser ajustado.

$$LE = (c_p/\gamma)(g_{s1}D_{l1} + g_{s2}D_{l2}) = \left(\frac{c_p}{\gamma}\right)2g_sD_l \quad (A19)$$

Assim o D_l tende a um valor de equilíbrio, o qual é obtido igualando as equações A19 e A18:

$$D_{eq} = \frac{\gamma.\varepsilon.Rn}{(\varepsilon + 1).c_p.2.g_s} \quad (A20)$$

em que Deq é o déficit de saturação de vapor de equilíbrio.

Ao analisar a situação oposta, quando consideramos a g_b muito grande, tendendo ao infinito, a equação A17 é simplificada à:

$$E_{imp} = \left(\frac{c_p}{\gamma}\right).2g_s.Da \quad (A21)$$

em E_{imp} é transpiração imposta. A equação A21 é similar a equação A19, diferenciando apenas na magnitude da condutância da camada limite.

A folha está sobre dois limites de ação, assim pode-se reescrever a equação A17 como:

$$E = \Omega.E_{\text{eq}} + (1 - \Omega).E_{\text{imp}} \quad (\text{A21})$$

e

$$D_l = \Omega.D_{\text{eq}} + (1 - \Omega)D_a \quad (\text{A22})$$

onde

$$\Omega = \frac{(\epsilon + 1)}{(\epsilon + 1 + g_b/g_s)} \quad (\text{A23})$$

Porém, pode-se substituir a condutância estomática e da camada limite pelo seu inverso, utilizando o conceito de resistência. Assim a equação A23 pode ser reescrita da seguinte maneira.

$$\Omega = \frac{(s/\gamma + 1)}{(s/\gamma + 1 + g_b/g_s)} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{s + \gamma} \frac{g_b}{g_s}} \quad (\text{A24})$$

$$\Omega = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{s + \gamma} \frac{r_s}{r_b}} \quad (\text{A25})$$

O Ω pode ser considerado como uma medida de desacoplamento entre as condições na superfície da folha com o ar circundante a ela. Para valores de Ω tendendo a 0, as condições na superfície da folha são muito fortemente acopladas as condições do ar circunvizinho, em que D_l tende a D_a . Por outro lado quando Ω tende a 1, as condições na superfície da folha são muito pouco acopladas à atmosfera livre, e D_l encontra seu próprio valor de equilíbrio local.

2. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MÉTODO DE PREENCHIMENTO DOS DADOS

A análise para o preenchimento de dados foi feita baseado no R^2 , no coeficiente de eficiência (COE) de Nash – Sutcliffe (BALTOKOSKI et al., 2010), no índice BIAS e na raiz quadrada média do erro RQME (MARTINS et al., 2014).

O COE é dado pela seguinte equação:

$$COE = 1 - \frac{\sum (O_i - E_i)^2}{\sum (O_i - E^{med})^2} \quad (A26)$$

em que O_i são os valores observados, E_i os valores estimados e E^{med} o valor médio da simulação. A interpretação desse parâmetro está indicado na Tabela 5.

Tabela 12. Interpretação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Desempenho	Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE)
Muito Bom	$0,75 < COE < 1,0$
Bom	$0,65 \leq COE \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < COE \leq 0,65$
Insatisfatório	$\leq 0,50$

*(MACHADO; MELLO JUNIOR; WENDLAND, 2017)

A RQME indica o erro médio resultante da simulação, neste caso quando mais próximo esse parâmetro estiver de 0 menor é o erro da simulação.

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (A27)$$

O índice BIAS fornece a tendência dos dados simulados perante os dados observados, assim quanto mais próximo de 0 menor é a tendência do modelo. Valores positivos são interpretados como superestimativa, enquanto valores negativos indicam subestimava das simulações.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (A28)$$

Em que E_i são os valores estimados e O_i os valores observados.

3. GRAUS DIAS ACUMULADO POR FASE FENOLÓGICA

Tabela 13. Graus dias acumulado por fase fenológica.

Dias após semeadura	Duração Fase	Graus dia ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$)	Temperatura média do ar por fase ($^{\circ}\text{C}$)	Fase Fenológica
0-9	9	139	19,94	Estabelecimento
10-27	18	369	17,33	Perfilhamento
28-57	30	714	16,33	Emborrachamento
58-77	20	971	18,05	Floração
78-96	19	1210	18,56	Formação de Grãos
97-110	14	1408	21,02	Maturação
0-9	9	139	19,94	Estabelecimento