

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM
CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL**

NEILON DUARTE DA SILVA

CRUZ DAS ALMAS, BAHIA 2021

**BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE
MANDIOCA INDUSTRIAL**

NEILON DUARTE DA SILVA

Mestre em Engenharia Agrícola - UFRB, 2017

Engenheiro Agrônomo - UFRB, 2015

Tese apresentada ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração em Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira

CRUZ DAS ALMAS, BAHIA 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

S586b	<p>Silva, Neilon Duarte da. Balanço de energia e evapotranspiração em cultivo de mandioca industrial / Neilon Duarte da Silva._ Cruz das Almas, Bahia, 2021. 105f.; il.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola. Orientador: Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira.</p> <p>1.Mandioca – Cultivo. 2.Mandioca – Evapotranspiração. 3.Sensoriamento remoto – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 633.682</p>
-------	--

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE
MANDIOCA INDUSTRIAL

Comissão Examinadora da Defesa de Tese de Doutorado
NEILON DUARTE DA SILVA

Aprovada em: 27/08/2021

Prof. Dr. Aureo Silva de Oliveira, UFRB, Orientador

Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo, UFRB

Prof. Dr. Luís Fernando de Souza Magno Campeche, IF Sertão PE

Profa. Dra. Valéria Peixoto Borges, UFPB

Dr. Maurício Antônio Coelho Filho, Embrapa

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Ainda que eu conhecesse todos os mistérios da vida e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida. Aos meus pais Elenita Duarte (*In Memoriam*) e Nelson Pereira.

Agradeço ao professor e amigo Aureo Silva de Oliveira, pela confiança depositada e pelas grandes oportunidades que a mim foram dadas ao longo de 12 anos de trabalhos.

Agradeço aos professores Lucas Melo Vellame e Francisco Adriano de Carvalho Pereira pela confiança e oportunidades dadas. Ao pesquisador Maurício Antônio Coelho Filho (também em nome da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical), pelos ensinamentos e apoio nas visitas ao local do experimento. Também agradeço ao PhD Richard Snyder, e a PhD Kosana Suvocarev, da Universidade da Califórnia Davis, Estados Unidos, que cederam gentilmente seu tempo e suporte na aplicação da metodologia do método de renovação do ar na superfície.

Agradeço ao então gerente de campo, Manoel, da empresa Bahia Amido, pela receptividade, através dele se deu início a abertura do canal de comunicação entre UFRB e a Bahia Amido, em que foi possível o acesso a área e a instalação dos equipamentos.

Agradeço a todos os meus amigos, colegas, professores e funcionários do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRB, pois com esses compartilhei momentos importantes da minha vida pessoal e acadêmica. Em especial, agradeço as minhas primas Jigriola e Cristiane, por sempre se fazerem presentes e terem me apoiado desde a graduação até meu doutorado.

Agradeço a FAPESB pela concessão da bolsa de estudos. Em tempo, agradeço também a CAPES pela bolsa de estudos concedida no período de Doutorado Sanduíche no Exterior, realizado na França.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	10
Revisão de Literatura.....	10
Capítulo I.....	10
Capítulo II.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
Capítulo I.....	11
Capítulo II.....	11
<i>BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL</i>	12
<i>RESUMO</i>	12
<i>ENERGY BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION IN PROCESSING CASSAVA CROP</i>	13
<i>ABSTRACT</i>	13
1. <i>INTRODUÇÃO GERAL</i>	14
2. <i>REVISÃO DE LITERATURA</i>	16
2.1 Balanço de energia em superfícies cultivadas	16
2.1.1 <i>Balanço de radiação</i>	17
2.1.2 <i>Fluxo de calor no solo</i>	18
2.1.3 <i>Fluxos de calor sensível e de calor latente</i>	19
2.1.3.1 <i>Razão de bowen com balanço de energia (estimativa do H e LE)</i>	19
2.1.3.2 <i>Covariância de turbilhões (estimativa do H e LE)</i>	21
2.1.3.3 <i>Renovação do ar na superfície (estimativa do H)</i>	23
2.2 Sensoriamento remoto da evapotranspiração	25
2.3 A cultura da mandioca	28
2.3.1 <i>Aspectos gerais</i>	28
2.3.2 <i>Fases fenológicas e taxa de crescimento da cultura</i>	29
2.3.3 <i>Coeficiente de cultivo (K_c) e evapotranspiração de referência (ET_o)</i>	30

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO I.....	43
FLUXOS DE CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE EM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL COM OS MÉTODOS DA RENOVAÇÃO DO AR NA SUPERFÍCIE E BALANÇO DE ENERGIA.....	43
RESUMO.....	44
ABSTRACT	45
1. INTRODUÇÃO.....	46
2. MATERIAL E MÉTODOS	48
2.1 Local do experimento de campo	48
2.2 Posicionamento da torre meteorológica	49
2.3 Instrumentos e coleta de dados	49
2.4 Determinação dos componentes do balanço de energia.....	51
2.4.1 Fluxo de calor sensível (H)	51
2.4.1.1 Método de Renovação do Ar na Superfície (RAS)	51
2.4.1.2 Método da Covariância de Turbilhões (CT)	54
2.4.2 Radiação líquida e fluxo de calor no solo (R_n e G).....	55
2.4.3 Fluxo de calor latente (LE).....	56
2.5 Análise de footprint.....	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1 Direção do vento e análise de footprint.....	58
3.2 Calibração do método de renovação do ar na superfície	59
3.3 Componentes do balanço de energia.....	63
4. CONCLUSÕES.....	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
CAPÍTULO II.....	72

<i>EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE UM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL VIA MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS E SENSORIAMENTO REMOTO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA</i>	72
<i>RESUMO</i>	73
<i>ABSTRACT</i>	74
<i>1. INTRODUÇÃO</i>	75
<i>2. MATERIAL E MÉTODOS</i>	77
2.1 Local do experimento de campo	77
2.2 Plataforma micrometeorológica de coleta de dados	78
2.3 Determinação dos componentes do balanço de energia.....	79
2.3.1 Fluxo de calor sensível	79
2.3.2 Radiação líquida e fluxo de calor no solo	80
2.3.3 Fluxo de calor latente.....	81
2.4 Evapotranspiração de Referência	81
2.5 Coeficiente de cultivo (K_c).....	82
2.6 Sensoriamento remoto da evapotranspiração	83
2.6.1 Sensoriamento remoto da evapotranspiração via algoritmo METRIC	85
2.6.2 Sensoriamento remoto evapotranspiração via algoritmo SAFER	89
2.7 Sensoriamento remoto simplificado da evapotranspiração (SRSE)	91
<i>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	93
3.1 Evapotranspiração da mandioca industrial	93
3.2 Sensoriamento remoto da evapotranspiração da mandioca industrial	95
3.3 Sensoriamento remoto simplificado da evapotranspiração (SRSE) da mandioca industrial.....	96
<i>4. CONCLUSÕES</i>	99
<i>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	100

LISTA DE TABELAS

Revisão de Literatura

Tabela 1. Resumo dos principais modelos utilizados na literatura para estimativa do fluxo de calor no solo (G). Adaptado de Purdy et. al. (2016).....	19
Tabela 2. Resumo dos principais algoritmos utilizados na literatura para estimativa da ET via sensoriamento remoto. Adaptado de Liou e Kar (2014)	27
Tabela 3. Estudos sobre uso de índices de vegetação na estimativa da ET. Adaptado de Glenn et al. (2010)	28

Capítulo I

Tabela 1. Instrumentos de resposta rápida e lenta instalados na parcela experimental.....	50
Tabela 2. Calibração do método da renovação do ar em função das condições de estabilidade atmosférica e altura dos sensores de resposta rápida.....	59

Capítulo II

Tabela 1. Instrumentos de resposta rápida e lenta instalados na parcela experimental.....	78
Tabela 2. Características das imagens do satélite Landsat-7.....	83
Tabela 3. Características das imagens do satélite Landsat-8.....	83
Tabela 4. Características das imagens do satélite CBERS-4A.....	84
Tabela 5. Datas e fontes das imagens de satélite utilizadas.....	84
Tabela 6. Classes do uso do solo e número de pixels utilizados nos modelos do Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial	93
Tabela 7. Evapotranspiração de mandioca industrial obtidos por diferentes métodos.....	95
Tabela 8. Coeficientes dos modelos do Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial	97

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1. Área de estudo em área de cultivo de mandioca na fazenda da então (à época) empresa Bahiamido S.A	48
Figura 2. Processo idealizado de formação de rampas de temperatura do ar no método de renovação do ar na superfície. Adaptado de McElrone et al. (2013)	52
Figura 3. Modelo linearizado de rampas de temperatura para ambas as condições instável e estável, onde A é amplitude e (d+s) frequência de rampa inversa	53
Figura 4. Torre micrometeorológica (A); rosa dos ventos mostrando a direção predominante na área experimental no período de 17/04 a 25/07/2009 (B); análise de footprint (C).....	58
Figura 5. Processo de calibração do fluxo de calor sensível H 'da análise de renovação de superfície sobre a mandioca sob condições de atmosfera estável e instável para todos os dados medidos. Antes da calibração (A e C) e após a calibração (B e D).....	61
Figura 6. Processo de calibração do fluxo de calor sensível H 'da análise de renovação de superfície sobre a mandioca sob condições de atmosfera estável e instável para todos os dados medidos. Antes da calibração (A e C) e após a calibração (B e D).....	62
Figura 7. Partição horária dos componentes do balanço para dias distintos nos meses de maio e junho em diferentes condições de nebulosidade	63
Figura 8. Relação entre radiação líquida (Rn) e os componentes do balanço de energia (G, H e LE)	64

Capítulo II

Figura 1. Área de estudo em área de cultivo de mandioca na fazenda da então (à época) empresa Bahiamido S.A	77
Figura 2. Localização experimento e cobertura das cenas Landsat para o estado da Bahia	84
Figura 3. Fluxograma das etapas do Saldo de Radiação e Fluxo de Calor no Solo	87
Figura 4. Fluxograma para cálculo da evapotranspiração via metodologia SAFER	91
Figura 5. Imagem do satélite RapidEye (A); Mapa de uso de solo (B).....	92
Figura 6. Correlação entre a evapotranspiração de um cultivo de um cultivo da mandioca industrial dos métodos covariância de turbilhões (ETCT) e renovação do ar da superfície (ETRAS) para os meses de maio e junho	94
Figura 7. Variação do coeficiente de cultivo (Kc) diário de uma área de mandioca industrial	94
Figura 8. Ajustes dos modelos Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial	97

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL

RESUMO

O reduzido número de informações da superfície disponível para estimativas confiáveis da evapotranspiração (ET) tem servido como impulso estudos de demanda hídrica da superfície. O método renovação do ar na superfície (RAS), é um exemplo, baseado em rampas de temperatura do ar medida sob alta frequência por meio de um termopar ultrafino, ele estima o fluxo de calor sensível (H). Como os demais componentes do balanço de energia (saldo de radiação e fluxo de calor no solo) podem ser medidos através de instrumentos de baixa frequência, a solução do balanço fica assim, completa. O objetivo desse trabalho foi realizar estimativas da evapotranspiração de um cultivo industrial de mandioca. O trabalho foi conduzido em uma área de mandioca industrial, no município de Laje, Bahia, Brasil. Uma torre micrometeorológica foi instalada para se avaliar a adequabilidade do método na estimativa de H sobre cultivo de mandioca industrial via calibração em relação a um sistema de covariância de turbilhões (CT), este consistindo de um anemômetro 3D. Foram realizadas modelagens da ET via sensoriamento remoto a partir do METRIC, SAFER e proposto o Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE). O método da RAS mostrou-se adequado para estimativa do fluxo de calor sensível (H) sobre com coeficiente de calibração igual a 0,96. Sob condições atmosféricas instáveis (período diurno) o método da RAS apresentou melhor desempenho para estimativa de H em relação a condições estáveis (período noturno). O método da RAS apresentou resultados coerentes na estimativa do fluxo de calor sensível (H), tendo a CT como referência, em cultivo de mandioca industrial com alto grau de correlação ($R^2 > 0,90$). Em termos quantitativos o total da ET de um cultivo de mandioca industrial em sequeiro, nas condições do recôncavo baiano, foi em média de 160,01 mm na fase de formação dos tubérculos. A partir de medidas da superfície, técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para a avaliação e quantificação espacial da ET. A simplificação da estimativa ET em uma área de mandioca industrial, apresentou resultados coerentes e por utilizar um número reduzido de variáveis, podendo assim ser aplicada com metodologias de coleta com maior resolução temporal e espacial.

ENERGY BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION IN PROCESSING CASSAVA CROP

ABSTRACT

The reduced number of surface information available for the source of evapotranspiration (ET) is driven by surface water demand studies. The surface renewal method (SR) method is an example, based on ramps of air temperature measured at high frequency by means of an ultra-thin thermocouple, it estimates the sensible heat flux (H). As the other components of the energy balance (radiation balance and heat flux in the ground) can be measured using low frequency instruments, the balance solution is thus complete. The objective of this work was the evapotranspiration of a processing cassava crop. The work was carried out in an industrial cassava area in the municipality of Laje, Bahia, Brazil. A micrometeorological tower was installed to assess the suitability of the method in estimating H on industrial cassava cultivation via calibration in relation to a eddy covariance (EC) system, this consisting of a 3D anemometer. Modeling of ET via remote sensing was performed using METRIC, SAFER and proposed Simplified Remote Sensing of Evapotranspiration (SRSE). The SR method was found to be adequate for estimating the sensible heat flux (H) over a calibration coefficient equal to 0.96. Under unstable atmospheric conditions (daytime) the SR method presented better performance for estimating H in relation to stable conditions (nighttime). The SR method presents consistent results in estimating the sensible heat flux (H), having a EC as a reference, in industrial cassava cultivation with a high degree of correlation ($R^2 > 0.90$). In quantitative terms, the total ET of an industrial cassava crop in rainfed, under the conditions of the Bahia Reconcavo, was on average 160.01 mm in the tuber formation phase. From surface measurements, remote sensing techniques can be used for the spatial evaluation and quantification of ET. The simplification of the ET estimation in an industrial cassava area, presented coherent results and for using a reduced number of variables, thus being able to be applied with collection methodologies with greater temporal and spatial resolution.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A superfície terrestre recebe diariamente a energia da radiação solar. Uma parte da radiação é refletida pela superfície (albedo); a segunda parte aquece o ar (fluxo de calor sensível (H), manifestado pela temperatura do ar); e a terceira parte aquece a superfície terrestre (fluxo de calor sensível ao solo, manifestado pela temperatura do solo) e a última parte evapora a superfície terrestre (fluxo de calor latente, manifestado pela evapotranspiração).

Os efeitos dos fatores meteorológicos, tais como radiação solar, temperatura, umidade do ar, vento e pressão na perda de água pela evapotranspiração (ET), juntos, provocam um conjunto dos processos complexos a partir das interações entre esses fatores. Isso de certa forma torna-os difícil separá-los por ordem de importância, pelas complicadas relações entre eles. O conhecimento da ET em áreas agrícolas é essencial ao adequado manejo da água na agricultura irrigada, principalmente em regiões áridas e semiáridas, onde a agricultura lucrativa só é possível com uso da irrigação.

A quantificação dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxo de calor na água e/ou no solo, fluxo de calor latente e sensível) se dá pela importância que o balanço tem para fins agronômicos, hidrológicos, mas principalmente para a modelagem dos processos de troca de massa e energia que ocorrem na interface superfície-atmosfera. O fluxo de calor latente (LE), também parte de R_n , corresponde à energia envolvida na mudança de fase da água no processo de evaporação e evapotranspiração.

O componente H no contexto do balanço de energia à superfície apresenta vários métodos de estimativa. As particularidades de cada método o tornam complexo, pois estes são potencialmente funcionais e fazem uso de variáveis e procedimentos distintos. No campo da micrometeorologia destacam-se o uso dos métodos da razão de Bowen, da covariância de turbilhões e do método da renovação do ar na superfície. Dentro do Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração, são vários os algoritmos que estimam o H. O METRIC e o SEBAL são os modelos mais consistentes e que mais têm sido utilizados nesse tipo de estimativa.

O método de renovação do ar na superfície é uma alternativa simples de se determinar o componente H a partir de medidas de alta frequência de temperatura do ar através de um termopar ultrafino. A teoria do método, muito comum em engenharia

química, foi adaptada em micrometeorologia da atmosfera inferior para estimativas da densidade de fluxo de calor sensível em áreas agrícolas. Apreciando que o H é um componente complexo de se obter, o uso de um único instrumento aliado a uma boa performance do método viabiliza seu uso para determinações da evapotranspiração de culturas agrícolas a partir do balanço de energia.

O objetivo geral deste trabalho foi quantificar o balanço de energia e evapotranspiração em cultivo de mandioca industrial. Em termos mais específicos, os objetivos foram:

a) Calibrar um sistema de renovação do ar na superfície para determinação do fluxo de calor sensível sobre área de mandioca industrial;

b) Quantificar os fluxos de calor sensível e calor latente a partir da cultura com os métodos combinados da renovação do ar na superfície e o balanço de energia;

c) Estudar a partição do saldo de radiação total entre os componentes do balanço de energia;

d) Realizar estimativas da evapotranspiração por sensoriamento remoto, método de renovação do ar e covariância de turbilhões em uma análise comparativa, para propor uma alternativa que demande menos dados de superfície.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Balanco de energia em superficies cultivadas

O sistema terrestre opera próximo a um equilíbrio de energia, o que significa dizer que uma mesma quantidade de energia entra no sistema terrestre, tende a sair dele. São comuns as variações ao longo do tempo e espaço, ao passo que, essas, resultam em mudanças na superfície terrestre e nas alterações do balanço de energia da superfície (LIOU; KAR, 2014). Por isso, quantificar os componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxo de calor na água e ou no solo, fluxo de calor latente e sensível) é importante para propósitos meteorológicos, agrônômicos e hidrológicos, bem como para o manejo de irrigação e modelagem dos processos de troca de massa e energia que ocorrem na superfície da terra.

O método do balanço de energia permite obter as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera (LIMA et al., 2011). O método permite ainda, em função dos estádios de desenvolvimento da cultura e das condições de solo e atmosfera, permite avaliar alterações no microclima da vegetação, (FONTANA et al., 1991). Tem sido bastante empregado por vários pesquisadores em culturas de pequeno porte (MOKATE; VARSHNEYA; NAIDU, 1995; TODD; EVETT; HOWELL, 2000; CUNHA; ESCOBEDO; KLOSOWSKI, 2002; LIMA et al., 2005; YOSHIMOTO; OUE; KOBAYASHI, 2005).

O saldo de radiação (R_n) no sistema solo-planta-atmosfera é repartido entre os três principais processos: aquecimento do ar, aquecimento do solo e evapotranspiração, sendo o conhecimento dos mesmos muito útil para utilização eficiente das técnicas de irrigação (CUNHA; ESCOBEDO; KLOSOWSKI, 2002).

O fluxo calor sensível (H) representa o aquecimento do ar atmosférico, o fluxo de calor na água ou no solo (G) representa o aquecimento do solo e o calor latente (LE) a evaporação da água do sistema solo-planta para a atmosfera. Desse modo, o balanço de energia na superfície é representado pela seguinte expressão:

$$R_n = H + G + LE$$

2.1.1 Balanço de radiação

A quantificação dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa, sob a superfície incididos, são a base dos métodos de estimativa do balanço de energia na superfície, seguido pela quantificação da radiação líquida (R_n), que pode ser estimada ou medida através de instrumentos.

O balanço de radiação (R_n), pode ser estimado usando um saldo radiômetro, é uma variável importante em estudos de evapotranspiração em áreas agrícolas. Quando se trata de medições de R_n em campo, as fontes de erro podem estar associadas com nivelamento e posicionamento do sensor.

A estimativa da radiação líquida recebida na superfície é representada pela expressão abaixo:

$$R_n = (R_S \downarrow - R_S \uparrow) + (R_L \downarrow - R_L \uparrow)$$

A radiação onda curta líquida ($R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow}$) é definida como a diferença entre os fluxos de radiação onda curta incidente e refletida pela superfície terrestre e está em função do albedo (poder refletor da superfície) que é a razão da radiação refletida dividida pela radiação incidente. O balanço de radiação de onda longa é estimado por dois componentes, incluindo a energia emitida ($R_{L\downarrow}$) em forma do aumento da temperatura da superfície e a energia da radiação onda longa refletida ($R_{L\uparrow}$) pela superfície à atmosfera e ao espaço.

O destino de R_n , em termos quantitativos, em um cultivo agrícola difere quanto ao sistema de cultivo. Quando se trata de cultivo em ambiente protegido, onde há maior presença de radiação difusa, o interior da área cultivada recebe menor quantidade de radiação solar global, e assim a conversão da radiação líquida disponível em matéria seca total reflete em uma possível maior eficiência, o que pode aumentar a produtividade. Ao passo que, tal fato foi evidenciado com a cultura de pimentão, obtendo maior produtividade em ambiente protegido, quando comparado ao cultivo no campo, assim relatam Cunha, Escobedo e Klosowski (2002). Os autores ainda afirmam que, nesse caso de cultivo protegido, foi verificado uma menor quantidade de radiação líquida disponível, e com isso, ocorre uma menor perda de energia, principalmente de evaporação, o que acarretou conseqüentemente, maior economia de água no sistema.

Na cultura do girassol, por exemplo, cultivada sob sistema convencional, o R_n medido acima do dossel das plantas representou cerca de 52,85% da radiação solar global, conforme o trabalho de Katul et al. (1996).

Bezerra et al. (2015) verificaram que o aumento do índice de área foliar (IAF) entre os anos de 2008 e 2009 foi responsável pelo aumento da porcentagem de R_n convertida em fluxo de calor latente (LE), de 81% em 2008 e de 63% para 81% em 2009. A redução do IAF, onde a fase da cultura é a da senescência da planta, houve uma redução da razão LE/ R_n de 81% para 75% em 2008 e de 81% para 76% em 2009. De acordo com Zhou et al. (2012), estes valores entre LE/ R_n e IAF são esperados porque alto IAF aumentou amplamente a transpiração, contribuindo então para valores LE/ R_n mais altos e vice-versa.

2.1.2 Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor do solo desempenha um papel importante no balanço de energia de superfície na interface solo-planta-atmosfera. Dentro do balanço de energia, este componente, em termos de contribuição, varia conforme o tipo de cobertura e água disponível no solo. Em áreas com solo nu e com disponibilidade de água no solo baixa, os valores de G podem representar até 50% de R_n . Com pouca água disponível, a compatibilização de R_n fica, em termos quantitativos, representado por G e H (IDSO; AASE; JACKSON, 1975; PAYERO; NEALE; WRIGHT, 2005). Em alguns casos, G contribui com as variações de dossel e taxas fotossíntese (COBOS; BAKER, 2003). Em áreas de floresta densa, o fluxo de calor do solo pode representar entre 30 e 50% de R_n (OGEE et al., 2001).

As medições diretas do fluxo de calor do solo podem ser realizadas a partir uma placa de fluxo de calor do solo, instalada a uma certa profundidade no solo. Portanto, uma temperatura de medição ainda é necessária para calcular o armazenamento de calor nesta profundidade do solo, e conseqüentemente, com base nos processos de difusividade térmica (Tabela 1, PAYERO; NEALE; WRIGHT, 2005). Bennet; Wang e Bras, (2008); Kustas et al. (2000), converteram G medido na profundidade de instalação placa, para a superfície. Em 1930, Falckenberg (FALCKENBERG, 1930) foi o primeiro a utilizar placas de fluxo de calor para medir fluxo de calor no solo. Algumas alternativas para estimativa de G são apresentas na Tabela 1, muitas dessas

técnicas de sensoriamento remoto têm apresentado soluções interessantes para estimativas confiáveis.

Tabela 1. Resumo dos principais modelos utilizados na literatura para estimativa do fluxo de calor no solo (G). Adaptado de Purdy et. al. (2016)

Princípio/Usó	Parâmetros e Equações	Principais Fontes
Difusividade térmica	$G_0 = G_8 + \frac{(T_i - T_{i-1}) \cdot C_s \cdot z}{\Delta t}$	Payero et al. (2005); Bennett, et. al. (2008); Kustas et al. (2000)
Sensoriamento remoto/SEBS	$\frac{G}{R_n} = Tc + (1 - fc)(T_s - Tc)$ $Tc = 0,315 \frac{G}{R_n}$ para áreas com percentual de cobertura alto $Ts = 0,05$ para áreas com solo nu	Su (2002)
Sensoriamento remoto/METRIC	Para IAF $\geq 0,5$ $G = (0,05 + 0,18e^{-0,52IAF})R_n$ Para IAF $< 0,5$ $G = 1,8(T_s - 273,15) + 0,084R_n$	Allen et al. (2007)
GLEAM	$\frac{G}{R_n} = 0,05$, para dosses altos $\frac{G}{R_n} = 0,20$ para dosses curtos $\frac{G}{R_n} = 0,25$ para solo nu	Miralles et. al. (2011)
Modelo para vinhedos	$G = 0,26R_n - 21$	Reicosky et al. (1994)
Sensoriamento remoto/Índices de Vegetação	$G = R_n(0,583 e^{-2,13NDVI})$ $G = 0,4(e^{0,5IAF})R_n$	Sene (1994) Choudhury et al. (1987)

R_n - Radiação líquida de superfície; G - Densidade do fluxo de calor do solo; G₀ - Densidade do fluxo de calor do solo na superfície; G₈ - Densidade do fluxo de calor do solo à 8cm de profundidade; C_s - Calor específico do solo; z - Profundidade da placa; ΔT - Intervalo de tempo; IAF - Índice de área foliar; T_s - Temperatura da superfície; T_c - Temperatura do dossel da vegetação;

2.1.3 Fluxos de calor sensível e de calor latente

2.1.3.1 Razão de bowen com balanço de energia (estimativa do H e LE)

O método Razão de Bowen (BOWEN, 1926) é um método micrometeorológico desenvolvido por Ira Bowen, considerado prático e relativamente confiável, quando comparado com outros métodos que demandam de outras variáveis (ALLEN et al., 2011). O método permite resolver o equilíbrio de energia medindo gradientes simples

de temperatura do ar e pressão de vapor na camada próxima à superfície acima da superfície. O método funciona melhor quando a água do solo não é limitante a ET, (PAYERO et al. 2003). Trata-se de uma técnica que merece destaque e que tem sido utilizada por vários autores para se fazer estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração (MEIRELLES et al., 2011; AZEVEDO et al., 2014; SHARMA et al., 2017).

Segundo Perez et al. (1999), resultados seguros para obtenção da evapotranspiração depende da acurácia dos equipamentos para obtenção da razão de Bowen (β). Alguns requisitos devem ser tomados para demonstrar fielmente a área de amostragem. Payero et al. (2003), como forma de criar uma metodologia para atender os requisitos para análise dos dados de Bowen, publicou o trabalho guia de validação dos dados de razão de Bowen com uma metodologia de análise de dados de radiação líquida, fluxos turbulentos e requerimento de bordadura para análise dos dados.

Este método baseia-se na teoria de que fluxos unidimensionais de calor sensível e latente podem ser descritos em termos de relações fluxo-gradiente (TANNER, 1960).

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

Em linhas gerais, calor latente (LE) negativo significa que a superfície está perdendo energia na forma de evapotranspiração, condição considerada normal no período diurno. À noite pode haver orvalho o que pode representar liberação de calor latente pela condensação do vapor d'água, logo seu valor será positivo. Nesse sentido o valor de β dependerá apenas do sinal do H. Logo, quando β for negativo implica dizer que há uma contribuição extra de H no ar transportado de áreas mais quentes e secas, isso é denominado processo de advecção. Rearranjando a equação do balanço de energia, e considerando-se $\beta \neq -1$:

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

Dados inconsistentes podem ser obtidos por diferentes razões, incluindo a limitação da precisão dos instrumentos, mal funcionamento do instrumento, problemas de instalação dos instrumentos, limitação do próprio método em determinadas condições (PAYERO et al., 2003). Os autores chegaram à conclusão, após medidas realizadas em intervalos de 20 minutos, que devem ser descartados os resultados quando $-1,25 < \beta < -0,75$.

2.1.3.2 Covariância de turbilhões (estimativa do H e LE)

A turbulência em decorrência das flutuações irregulares e aleatórias na velocidade do vento, temperatura do ar e concentração de gases em torno de seus valores médios no tempo e espaço, desempenha um papel importante na alteração das propriedades do ar e na criação de perturbação nos fluxos escalares na camada limite atmosférica (por exemplo, calor sensível e calor latente) (ARYA, 2001). As principais características da turbulência são que os gradientes de concentração são produzidos por vórtices e ocorrem em todas as direções. A turbulência é não-linear e constitui-se fortemente de redemoinhos ou turbilhões (*eddies*) tridimensionais, bem como os fluxos são difusivos e intermitentes (PANOFSKY; DUTTON, 1994). Os movimentos na camada limite atmosférica são sempre turbulentos. A turbulência é contínua na camada superficial e desaparece ou é periodicamente insignificante na parte superior da camada limite atmosférica (ARYA, 2001).

O método da covariância de turbilhões (*Eddy Covariance*) é uma técnica micrometeorológica que permite obter os fluxos atmosféricos (H e LE) por meio de medidas em alta frequência em uma grande variedade de sistemas ecológicos e em áreas de cultivo (DING et al., 2010). De acordo com Aguiar (2013), o método baseia-se em um princípio de determinação direta dos fluxos que calcula a covariância entre os desvios do vento vertical e os desvios de temperatura do ar (calor sensível), umidade do ar (calor latente) e concentração de dióxido de carbono (fotossíntese, respiração e fotorrespiração). Por esse método, é possível realizar medidas de transferência de energia e massa. Seu uso remonta à década de 50, sendo que atualmente é um dos mais aceitos e largamente utilizados para medir fluxos de CO₂, vapor d'água, metano e calor sensível (BALDOCCHI et al., 2001; LEE et al., 2004; IBRON et al., 2007; KRISHNAN et al., 2012).

Para que os dados de covariância de turbilhões sejam satisfatórios, algumas suposições devem ser atendidas: o ponto de medida deve representar uma área contrária ao sentido do vento; as medidas devem ser feitas no interior da área limite de interesse; os fluxos devem ser completamente turbulentos, pois a maior parte da transferência vertical é feita por vórtices em turbilhão (*eddies*); o terreno não deve apresentar declividade acentuada; as divergências e convergências dos fluxos devem ser insignificantes; os instrumentos devem detectar alterações pequenas com frequências elevadas e as flutuações de densidade reduzidas (BURBA; ANDERSON, 2007).

A técnica da covariância de turbilhões vem se tornando cada vez mais comum, por sua facilidade de aplicação, tanto na instalação em campo quanto também no processamento dos dados, pelos reduzidos custos dos sensores e possibilidade de mensurar H, LE, bem como fluxos de CO₂, dependendo da configuração do equipamento (ALLEN et al., 2011). Segundo Lee, Massman e Law (2004), essa técnica é fundamental para o estudo de fluxos turbulentos devido à sua robustez e à utilização de sensores modernos para sua aplicação.

Medições meteorológicas dos fluxos turbulentos, como calor sensível e latente, entre a superfície subjacente e a atmosfera dependem frequentemente da determinação de uma área de contribuição para esses fluxos em um ponto acima da superfície.

Todos os métodos micrometeorológicos se baseiam em sua teoria na suposição de uma superfície ideal homogênea (DREXLER et al., 2004). Na prática, a maioria das superfícies, especialmente superfícies vegetadas, mostra variabilidade espacial em suas atividades de troca. Além disso, a superfície é geralmente cercada por diferentes tipos de coberturas, sejam elas agrícolas ou naturais. Assim sendo, a estimativa da área de contribuição (*footprint*) para os fluxos turbulentos é crucial para a execução adequada de medidas micrometeorológicas, uma vez que o *footprint* determina a influência relativa da área subjacente a esses fluxos. O *footprint* é definido como o espaço contexto da medição dos fluxos da camada superficial (SCHMID, 2002).

2.1.3.3 *Renovação do ar na superfície (estimativa do H)*

A teoria do método do *Surface Renewal* aqui traduzido como *Renovação do Ar na Superfície (RAS)*, teve sua origem no campo da engenharia química. Inicialmente o objetivo foi examinar o transporte de calor entre o gás e o líquido, a partir do conceito de estruturas coerentes (KATUL, et al., 1996). O método da RAS é baseado na teoria de que uma parcela de ar se move rapidamente para a superfície e permanece em contato com a superfície por um breve período, após o qual pode ser resfriada devido à troca de calor sensível entre o ar e os elementos do dossel da planta. A parcela de ar então se move para cima e é renovada por outra parcela que se move em direção à superfície (CASTELLVÍ; SNYDER; BALDOCCHI, 2008; PAW U et al., 2005).

Antes dessa adaptação do método RAS para cálculos de fluxos micrometeorológicos, o método passou por algumas modificações ao longo dos anos. Em 1955, Danckwerts apresentou o conceito de intervalo de tempo variável. Posteriormente, o conceito de que havia uma camada de líquido quiescente na superfície separando os volumes elementares do fluido renovado e a superfície foi adicionado (DANCKWERTS, 1955). Dobbins (1956) e Torr e Marchello (1958) adicionaram o volume elementar finito ao método RAS. Em 1961, as estatísticas de redemoinhos foram introduzidas no método RAS por Perlmutter, assim relatou Paw U et al. (2005). Posteriormente, Harriott (1962) retirou o método dos volumes do elemento de fluido a partir de distâncias arbitrárias da superfície para lacunas (espaços) irregulares.

Somente a partir da década de 1990, que o método RAS foi adaptado para estudos de fluxos em micrometeorologia e pesquisas foram realizadas na estimativa do fluxo de calor sensível (H) usando o método RAS por Paw U e Brunet (1991); Paw U, Brunet e Collineau, (1992) e Qiu, et al. (1995). Nessa transição do uso na engenharia química para cálculos de fluxos micrometeorológicos, o método fica estabelecido pela troca turbulenta do fluxo de calor sensível entre o dossel da planta e a atmosfera, causada pela substituição instantânea de uma parcela de ar que quando aquecida (variações na temperatura do ar) interage com a superfície. A parcela de ar que entra em contato com o dossel da planta troca energia entre o ar e os elementos do dossel; então, o pacote de ar sai da superfície e é substituído por um novo, ocorrendo assim, substituições sucessivas, em alta frequência (PAW U; BRUNET, 1991; SNYDER; SPANO; PAW U, 1996; SPANO et al., 1997).

O método RAS para estimativa de fluxos micrometeorológicos sob dossel das plantas envolve medições de temperatura do ar em altas frequências, que podem variar de 2 a 10 Hz, a partir de um termopar de fio fino. O sinal da temperatura do ar exibe estruturas coerentes que se assemelham a eventos de rampa (PAW U; BRUNET; COLLINEAU, 1992). As estruturas coerentes são responsáveis pela troca de massa, energia, momento e outros fluxos escalares (PAW U; BRUNET, 1991; PAW U; BRUNET; COLLINEAU, 1992). Uma vez o H determinado com o método da renovação do ar, o fluxo de calor latente a partir da superfície em questão pode ser estimado como resíduo do balanço de energia [$LE = R_n - H - G$].

Nessas aplicações em micrometeorologia, o método tem sido usado sobre vegetação com ampla variação em suas características como altura da planta, idade, e densidade de plantio bem como abertura da copa e arquitetura do dossel.

Inicialmente, em 1991, Paw U e Brunet (1991) adaptaram o método da renovação do ar à superfície (RAS) para estimar o fluxo de calor sensível sobre superfícies naturais usando medições de alta frequência de temperatura do ar em uma única altura superfície vegetada, por meio de termopares de fio fino com ventilação natural. Castellví e Snyder (2009), em trabalho sobre o desempenho do método para estimar o fluxo de calor sensível em dois campos de arroz, constaram que o fluxo de calor sensível estimado foi semelhante ao medido usando um sistema de covariância de turbilhões como referência. Castellví, Snyder e Baldocchi (2008) relataram que o método da RAS estimou adequadamente os fluxos de calor sensível e calor latente como resíduos de medições na subcamada inercial sob a influência de advecção regional/local. Dentre trabalhos relevantes e que incluem os mais variados tipos de superfície, estão o de Paw U et al. (1995) em um pomar de nozes, Paw U et al. (1995) em área de pastagem, Snyder, Spano e Paw U, (1996) e Snyder et al., (2008), com videira; Rosa; Dicken e Tanny, (2013) com algodão; Zapata e Martínez-Cob, (2002); Pozníková et al. (2019) com trigo, milho com Paw U et al. (1995) e Xue et al. (2020), entre outras.

Uma descrição completa da teoria do método e sua aplicação também podem ser encontradas em: Snyder Spano e Paw U, (1996); Paw U et al., 2005; Mengistu, (2008); Mengistu e Savage, (2010). Esses autores ainda relatam algumas limitações, como por exemplo a necessidade de calibração com um método robusto, como por

exemplo a covariância de turbilhões, e ainda, sobre a necessidade do uso de um termopar de fio fino, que por ser sensível, está propenso a se romper.

Atualmente, é possível obter o H via método RAS sem a necessidade de calibração. Ainda em 2004, Castellví (2004) propôs combinar o método RAS com a teoria da similaridade para realizar uma auto calibração, a partir de medições de velocidade média do vento. Essa auto calibração, parte da prerrogativa da não necessidade de dados medidos de H, para então ajuste do H obtido com RAS.

2.2 Sensoriamento remoto da evapotranspiração

As informações do consumo de água em grandes áreas e particularmente em áreas agrícolas irrigadas são importantes para o planejamento de recursos hídricos, mitigação de impactos pela escassez hídrica, gestão de direitos de água e regulação da água (ALLEN et al., 2011).

Entre diversos métodos existentes para se determinar o consumo hídrico pela vegetação, ultimamente, a estimativa via sensoriamento remoto tem sido amplamente estudada. Segundo Allen et al. (2011), os métodos que determinam a evapotranspiração a partir de imagens de satélite apresentam a vantagem de possibilitar a análise da variação espacial, como também de apresentarem menor custo, em comparação aos métodos pontuais de campo. Apesar disso, os autores advertem sobre pixels das imagens em áreas de vegetação esparsa, como pequenos campos agrícolas, podem ser na verdade uma grande mistura de diferentes tipos vegetais e outras superfícies distintas, tornando sua interpretação difícil (BORGES, 2011).

Atualmente existem duas linhas de pesquisa principais para determinação da evapotranspiração via sensoriamento remoto, quais sejam, o balanço de água no solo e o balanço de energia (GONZALEZ-PIQUERAS et al., 2015). No segundo, os dados de sensoriamento remoto utilizam-se da cobertura vegetal através da determinação de parâmetros biofísicos, principalmente os coeficientes de cultivo (K_c) e a fração de cobertura. Esse modelo utiliza dados meteorológicos para determinar a evapotranspiração de referência (ET_o) e combina com o coeficiente de cultivo ajustado pela disponibilidade de água no solo e estima a evapotranspiração da cultura, ET_c (ALLEN et al., 2006).

O sensoriamento remoto tem alcançado nos últimos anos grande importância no monitoramento dos recursos naturais aliado com os mais diversos fenômenos e variáveis meteorológicas. Dentre os produtos oferecidos pelo sensoriamento remoto, o saldo de radiação tem surgido como uma ferramenta importantíssima na geração de modelos hidrológicos que maximizam um melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Nele é expresso as relações entre a quantidade de energia que é retida e que é utilizada principalmente pelas plantas na fotossíntese e nos processos de aquecimento do solo, bem como na evaporação da água e transpiração das plantas.

O algoritmo de *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), é um modelo que aplica técnicas de micrometeorologia e sensoriamento remoto para determinação da ET usando como base a solução do balanço de energia. Foi desenvolvido na Holanda por Bastiaanssen et al. (1998).

O modelo *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) é uma variante do SEBAL. É também uma ferramenta de processamento de imagem para mapear a ET regional ou local através também da solução do balanço de energia.

O METRIC e o SEBAL, são dois dos modelos mais consagrados no uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimativa da ET. Existem algumas diferenças entre eles:

- a) No pixel frio, o METRIC não assume $H_{\text{Pixel Frio}} = 0$ ou $LE_{\text{Pixel Frio}} = (R_n - G)$. Em vez disso, o equilíbrio da água do solo é usado para garantir que ET seja zero e definido como $1,05 \cdot E_{Tr}$ (evapotranspiração de referência, tendo como cultura a alfafa);
- b) No METRIC, os pixels frios são selecionados em áreas agrícolas;
- c) Em vez da fração evaporativa real, a interpolação da ET instantânea para o valor diário é baseada na fração da E_{Tr} (E_{TrF}) da alfafa;

As comparações dos diferentes modelos de estimativa da ET via sensoriamento remoto estão resumidas na Tabela 2, adaptada de Liou e Kar (2014).

Tabela 2. Resumo dos principais algoritmos utilizados na literatura para estimativa da ET via sensoriamento remoto. Adaptado de Liou e Kar (2014)

Algoritmo	Parâmetros	Condições básicas	Diretrizes básicas	Limitações
SEBI	$T_{PBL}, h_{PBL}, v, T_s, R_n, G$	<ul style="list-style-type: none"> ET_{pixel quente}=0 ET_{pixel frio}= Superfície potencialmente evaporante 	<ul style="list-style-type: none"> Relaciona os efeitos de T_s e r_a diretamente no LE. 	<ul style="list-style-type: none"> Requer medidas na superfície
SEBS	T_a, h_a, v, T_s, R_n, G	<ul style="list-style-type: none"> ET_{pixel quente}=0 ET_{pixel frio}= Taxa potencialmente evaporante da superfície 	<ul style="list-style-type: none"> As incertezas nas estimativas de T_s e alguns parâmetros meteorológicos pode ser parcialmente resolvido; Altura de rugosidade da superfície para calor a transferência é computada explicitamente em vez de usar valores fixos. 	<ul style="list-style-type: none"> Requer muitos parâmetros; A derivação dos fluxos de calor turbulentos
S-SEBI	T_s, a_s, R_n, G	<ul style="list-style-type: none"> $(E_F)\alpha=(T_H-T_s)/(T_H-T_{LE})$ $T_H=(LE)_{min}$ $T_{LE} = (LE)_{max}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Medições baseadas no solo não são necessárias 	<ul style="list-style-type: none"> É necessária uma grande amplitude de temperaturas da superfície
SAFER	$T_s, NDVI, R_n, IAF$	<ul style="list-style-type: none"> ET, ETo 	<ul style="list-style-type: none"> Algoritmo simplificado 	<ul style="list-style-type: none"> Baseado em regressões múltiplas; Calibração local
SEBAL	v, h_a, T_s, VI, R_n, G	<ul style="list-style-type: none"> $dT=cT_s+d$ (ET)_{pixel quente} = 0; (ET)_{pixel quente} → Considera a energia disponível 	<ul style="list-style-type: none"> Requer medidas mínimas na superfície; Calibração automática interna; Correções atmosféricas não são tão necessárias. 	<ul style="list-style-type: none"> Aplicado sobre superfícies planas; Possui incertezas na determinação de pixels quente e frio
METRIC	v, h_a, T_s, VI, R_n, G	<ul style="list-style-type: none"> (ET)_{pixel quente} = 0 (LE)_{pixel frio} = 1,05ETr 	<ul style="list-style-type: none"> Semelhante ao SEBAL, mas podem ser incluídas na análise declividade e orientação do terreno 	<ul style="list-style-type: none"> Possui incertezas na determinação de pixels quente e frio
TSM	$v, h_a, T_s, T_c, F_r, IAF, R_n, G$	<ul style="list-style-type: none"> Os fluxos de componentes são paralelos a uns aos outros; Equação de Priestley-Taylor é usada para calcular a transpiração do dossel 	<ul style="list-style-type: none"> Elimina a necessidade de correções empíricas para o “excesso” das resistências da superfície 	<ul style="list-style-type: none"> Necessário várias medições na superfície

T_{PBL} - Temperatura média da camada limite planetária; h_{PBL} - Altura do PBL; v - velocidade do vento; T_s - Temperatura da superfície; T_c - Temperatura do dossel da vegetação; R_n - radiação líquida de superfície; G - densidade do fluxo de calor do solo; h_a - Altura de medição da velocidade do vento e temperatura do ar; VI - Vegetação Índice; IAF - Índice de área foliar; F_r - cobertura vegetal fracionada; α_s - Albedo de ondas curtas de superfície; T_a - temperatura medida a uma altura de referência.

Wang et al. (2007) propuseram estimativas da ET através de regressões utilizando dados de Rn, temperatura da superfície e dois índices de vegetação (NDVI – Índice de vegetação por diferença normalizada, e o EVI – índice de vegetação aprimorado). Os resultados apontaram que os coeficientes de correlação entre a ET estimada com Rn, foram melhores, seguido das estimativas feitas com a temperatura da superfície e por último, as estimativas feitas com os índices de vegetação.

Glenn, Nagler e Huete (2010) apresentaram uma abordagem sobre o uso de Índices de Vegetação na estimativa da ET com base em estudos conduzidos em áreas agrícolas e naturais, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Estudos sobre uso de índices de vegetação na estimativa da ET. Adaptado de Glenn et al. (2010)

Local	Tipo de Superfície	Variáveis principais	Autor
Amazônia, Brasil	Floresta tropical	MODIS, EVI, Rn	Juarez et. al. (2008)
Austrália	Florestas, savanas, lagos	MODIS, EVI, índice de umidade, ETo	Guerschman et. al. (2009)
América do Norte	Florestas	MODIS, EVI, Ts, Rs, Mapa de uso e cobertura do solo	Yang et al. (2006)
Região ártica - América do Norte	Florestas boreais, pastagens, tundra	MODIS, IAF, NDVI, Dados meteorológicos da superfície	Mu et al. (2009)

2.3 A cultura da mandioca

2.3.1 *Aspectos gerais*

No Brasil, o cultivo da mandioca é uma das atividades agrícolas mais antigas e tradicionais. Sua importância vem sendo registrada desde a época da colonização portuguesa (SILVA e MURIETTA, 2014). Estatísticas publicadas no ano de 2017, apresentaram o Brasil como o quinto maior produtor mundial de mandioca, com produção próxima a 19 milhões de toneladas e valor da produção próximo a 11 bilhões de reais (IBGE, 2019a). Em 2018, a cultura foi avaliada como a sexta mais importante, em termos de valor econômico para o País, ficando atrás das culturas da soja, cana-de-açúcar, milho, café e algodão, respectivamente. No mesmo ano, o Estado da Bahia foi o décimo maior produtor de raízes, com produção avaliada em 440 milhões de

reais. A mandioca foi a sétima cultura agrícola em termos de valor econômico para o Estado, ficando atrás das culturas da soja, algodão, café, milho, cacau e banana, respectivamente (IBGE, 2019b).

O principal produto da mandiocultura são as raízes de reserva, que são ricas em compostos amiláceos, vitaminas e minerais. As raízes são usadas na alimentação humana e animal. São insumos básicos para uma diversidade de aplicações industriais nos ramos alimentício, farmacêutico, têxtil, de fibras, de biopolímeros, de adesivos, de etanol e destilados e outros (PARMAR; STURM E HENSEL, 2017). Nas últimas décadas, algumas indústrias também têm aproveitado os resíduos do processamento da mandioca para produção de gás, biocombustíveis, energia elétrica e biofertilizantes (SÁNCHEZ et al., 2017).

2.3.2 Fases fenológicas e taxa de crescimento da cultura

Alves (2006) descreveu as fases do ciclo de desenvolvimento da mandioca em dias após o plantio (DAP) das manivas e ficou caracterizado que aos 15 DAP ocorre o desenvolvimento das primeiras raízes adventícias e brotos da estaca com início ao processo de emergência. Dos 15 aos 90 DAP, ocorre a formação do sistema radicular e desenvolvimento das folhas. Nesse período a taxa fotossintética aumenta contribuindo para o rápido crescimento da planta ao passo que as raízes adventícias vão sendo substituídas pelas raízes fibrosas. Algumas dessas raízes irão se transformar em raízes de armazenamento.

A mandioca, tal como as outras culturas agrícolas, responde à interferência das oscilações ambientais e dentre as variáveis meteorológicas, a temperatura do ar é uma das principais a afetar o desenvolvimento da cultura e da maioria das espécies vegetais (HODGES, 1991; MATTHEWS; HUNT, 1994; STRECK, 2002).

A redução no número de folhas na cultura da mandioca pode estar relacionada à abscisão das folhas por conta da produção de raízes (PERESSIN, 1998). O comportamento, em relação à altura, é um fator importante, tanto na competição com plantas infestantes quanto na escolha de cultivares para consorciação com outras culturas e definição de espaçamento adequado. Em geral, a cultura da mandioca independente da variedade apresentou a taxa de crescimento quadrática conforme abordado por Rós et al. (2011).

2.3.3 Coeficiente de cultivo (K_c) e evapotranspiração de referência (ET_o)

A planta de mandioca é considerada tolerante às condições de seca e de baixa fertilidade do solo. Em condições de restrição hídrica, a mandioca apresenta aumento de produtividade quando irrigada (KERALA AGRICULTURAL UNIVERSITY, 2002; OLIVEIRA et al., 2006), embora a elevada disponibilidade hídrica associada a altas concentrações de nitrogênio no solo, normalmente, resulte em excessivo desenvolvimento da parte aérea e baixa produção de raízes (HOWELER, 1982).

Dentre as abordagens disponíveis para a cálculo do consumo de água pelas plantas, destaca-se o uso do coeficiente de cultura associado a estimativa da evapotranspiração de referência (MENDOÇA; DANTAS, 2010). A determinação da água necessária para as culturas é requisito básico que precisa ser conhecido para se planejar e manejar de forma adequada um projeto de irrigação. O K_c representa a integração de três fatores 1) a altura da cultura 2) a resistência de superfície relativa (IAF, fração de cobertura do solo, idade da planta, umidade do solo); 3) o albedo da superfície (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Em 1977, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) publicou o manual de número 24 através de Doorenbos e Pruitt (1977). Foi uma tentativa inicial de padronizar o cálculo da lâmina de irrigação para as culturas agrícolas. Em 1998, a FAO, já no seu manual 98, através de Allen et al. (1998), incorporou algumas modificações de forma a melhorar o manual de 1977. Allen et al. (1998) apresentaram uma revisão para determinação das necessidades hídricas das culturas, recomendando o uso do método FAO Penman-Monteith, como padrão para estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o), apresentando novos valores de K_c para diferentes culturas e propondo um novo método de aproximação dos coeficientes de cultura, em apenas três valores de K_c (inicial, intermediário e final).

Assim determinação do consumo de água em uma área agrícola ficou condicionada a parametrização e cálculo da ET_o , principalmente em função das condições climáticas locais, características fisiológicas e morfológicas das culturas, que assim seriam representadas pelo seu coeficiente (K_c).

Por fim, estabeleceu-se, três principais fatores que afetam a evapotranspiração: (1) meteorológicos, (2) características da cultura e (3) manejo da cultura. A influência desses três fatores é representada pela seguinte equação conceitual:

Fatores Meteorológicos + Cultura de Referência = ETo

Para a maioria das culturas, o valor de K_c aumenta desde um valor mínimo que ocorre na germinação até um valor máximo, quando a cultura atinge o seu pleno desenvolvimento e voltando a diminuir a partir do início da maturação. Segundo Sedyama, Ribeiro e Leal (1998) o valor de K_c varia no período vegetativo à medida que a cultura cresce e desenvolve, assim como sofre variação da fração de cobertura da superfície do solo.

Em relação ao Brasil, não há estudos que abordem a evapotranspiração da cultura da mandioca. Muito embora a mandioca seja considerada uma espécie tolerante ao déficit hídrico, há uma redução considerável do crescimento e do rendimento com períodos de seca prolongados. Um dos mecanismos de reduzir o efeito da falta de água é a abscisão foliar e conseqüentemente a redução da superfície transpirante e o que resulta na redução da taxa de crescimento.

A queda no rendimento de raízes está em função da duração do déficit hídrico em particular pelo estágio desenvolvimento da planta. O período crítico para o efeito do déficit hídrico em mandioca é de 1 a 5 meses após o plantio, período que corresponde aos estádios de iniciação e tuberização das raízes. Um déficit hídrico de dois meses pode reduzir o rendimento de raízes de 32% a 60% (ALVES, 2006). O efeito mais severo do déficit hídrico ocorre no período de 1 a 5 meses após o plantio, ou seja, no período de tuberização e de rápido crescimento foliar.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R. G. Balanço de energia em ecossistema amazônico por modelo de regressão robusta com bootstrap validação cruzada. (**Tese de doutorado**). Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, MT, 85 p., 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. 310p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4), 380–394, 2007.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWEL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 921-929, 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Paper 56. Roma: FAO, 2006.

ALVES, A. A. C. Fisiologia da Mandioca. IN: SOUZA, L.S. et al. **Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. p. 138-169.

ARYA, P. Introduction to Micrometeorology, Volume 79, Second Edition (**International Geophysics**), 446, p. 2001.

AZEVEDO, P. V.; SABOYA; L. M. F.; NETO, J. D.; OLIVEIRA, F. S.; BEZERRA, J. R. C.; FARIAS, C. H. A. Disponibilidade energética para a cultura da cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1031–1038, 2014.

BALDOCCHI, D.; FALGE, E.; GU, L.; OLSON, R.; HOLLINGER, D.; RUNNING, S.; ANTHONI, P.; BERNHOFER, CH.; DAVIS, K.; EVANS, R.; FUENTES, J.; GOLDSTEIN, A.; KATUL, G.; LAW, B., LEE, X.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MUNGER, W.; OECHEL, W.; PAW U, K. T.; PILEGAARD, K., SCHMID, H. P.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 82(11), 2415-2434, 2001.

BASTIAANSSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; ROERINK, G.J.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal Hydrology**, 212-213, 198-212, 1998.

BENNETT, W. B.; WANG, J.; BRAS, R. L. Estimation of global ground heat flux, **J. Hydrometeorol.**, 9, 744–759, 2008.

BEZERRA, B. G.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, B. B.; SANTOS, C. A. C. Surface energy exchange and evapotranspiration from cotton crop under full irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State, Brazilian Semi-Arid. **Agrometeorology Bragantia** 74 (1) Mar, 2015.

BORGES, T. K. S. Evaporação em superfície de água livre com baixa turbidez, 2017. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil, 2017.

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface, **Physical Review**, Ithaca, v.27, p.779-787, 1926.

BURBA, G.; ANDERSON, D. **Introduction to the Eddy Covariance Method: General Guidelines and Conventional Workflow**. 10.13140/RG.2.1.3723.5683, 2007.

CASTELLVÍ, F. Combining surface renewal analysis and similarity theory: A new approach for estimating sensible heat flux. **Water Resource Research**, v. 40, n. 5, p. 1147-1160, 2004.

CASTELLVÍ, F.; MARTÍNEZ-COB, A. Estimating sensible heat flux using surface renewal analysis and flux variance method: A case study over olive trees at Sagunto (NE of Spain). **Water Resource Research**, v. 41, n. 9, p. 1-10, 2005.

CASTELLVÍ, F.; MARTÍNEZ-COB, A.; PEREZ-COVETA, O. A comparison of a new existing equations for estimating sensible flux using surface renewal and similarity concepts. **Water Resource Research**, v. 42, n. 8, p. 213-220, 2006.

CASTELLVÍ, F.; SNYDER, R.L. Sensible heat flux using surface renewal analysis. A study case over a peach orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 9, p. 1397–1402., 2009.

CASTELLVÍ, F.; SNYDER, R.L.; BALDOCCHI, D.D. Surface energy-balance closure over rangeland grass using the eddy covariance method and surface renewal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6-7, p. 1147-1160, 2008.

CHOUDHURY, B. J.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an

infrared temperature-based energy balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, 39(4): 283-297, 1987.

COBOS, D. R.; BAKER, M. B. In situ measurement of soil heat flux with the gradient method; **Vadose Zone J.** 2 589–594, 2003.

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J.F.; KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 735-743, 2002.

DANCKWERTS, P. V. Gas absorption accompanied by chemical reaction. **AIChE Journal**, vol. 1, no. 4, pp. 456–463, 1955.

DING, R.; KANG, S.; LI F.; ZHANGA, Y.; TONGA, L.; SUN, Q. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 87-95, 2010.

DOBBINS, W.E. **Nature of oxygen transfer coefficient in aeration systems**. In Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, eds., McCabe J. and W. W. Eckenfelder, Reinhold Publ, New York, 1956.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2nd ed. Rome: FAO, 1977. 179p.

DREXLER, J. Z.; SNYDER, R. L.; SPANO, D.; PAW U, K. T. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. **Hydrological Processes**, vol. 18, no. 11, pp. 2071–2101, 2004.

EMBRAPA - **Congresso de Mandioca**, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>. Acesso em: 10 de outubro de 2019.

FALCKENBERG, G. Apparatur zur Bestimmung des momentanen nächtlichen Wärmeaustausches zwischen Erde und Luft, **Meteorology**. Z. 47 154–156, 1930.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não-irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 03, p. 403-410, 1991.

GLENN, E.; NAGLER, P.; HUETE, A. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. **Surveys in Geophysics** 31 531-555, 2010.

GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; VILLODRE, J.; CAMPOS, I.; CALERA, A.; BALBOTÍN, C. Seguimiento de los flujos de calor sensible y calor latente en vid

mediante la aplicación del balance de energía METRIC. **Revista de Teledetección**, v.43, p.43-54, 2015. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.2310>

GUERSCHMAN, J. P.; VAN DIJK, A. I. J. M.; MATTERS DORF, G.; BERINGER, J.; HUTLEY, L.B.; LEUNING, R.; PIPUNIC, R. C.; SHERMAN, B. S. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia. **Journal of Hydrology** 369:107–119, 2009.

HARRIOTT, P. A random eddy modification of the penetration theory. **Chemical Engineering Science**, vol. 17, no. 3, pp. 149–154, 1962.

HELDWEIN, ARNO B ET AL. Estimation of net radiation in sunflower as a function of solar radiation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [online]. 2012, v. 16, n. 2 [Accessed 20 June 2021], pp. 194-199. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200010>>. Epub 30 Jan 2012. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200010>.

HIGBIE, R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. **Transaction American Institute Chemical Engineers**, v. 31, p. 365-388, 1935.

HODGES, T.F. **Predict crop phenology**. Boca Raton: CRC, 1991. 233p.

HOWELER, R.H. Nutricion mineral y fertilizacion de la yuca . In: **Manual de producción de yuca**. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Programa de Yuca, Cali, CO. p. F-1/F-48,1979.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**, 2019a. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, 2019b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/188>>.

IBRON, A.; DELLWIK, E.; FLYVBJERG, H.; JENSEN, N.O.; PILEGAARD, K. Strong low-pass filtering effects on water vapour flux measurements with closed-path eddy correlation systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, p. 140–156, 2007.

IDSO, S. B.; AASE, J.K.; JACKSON, R. D. (Net radiation–soil heat flux relations as influenced by water content variations. **Boundary Layer Meteorol** 9:113–122, 1975.

JUAREZ, R. I. N.; GOULDEN, M.L.; MYNENI, R. B.; FU, R.; BERNARDES, S.; GAO, H. Estimating catchment evapotranspiration and runoff using MODIS leaf area index and the Penman–Monteith equation. **International Journal of Remote Sensing**, 29:7045–7063, 2008.

KATUL, G.; HSIEH, C.I.; OREN, R.; ELLSWORTH, D.; PHILLIPS, N. Latent and sensible heat flux predictions from a uniform pine forest using surface renewal and flux variance methods. **Boundary Layer Meteorology**, vol. 80, no. 1-2, pp. 249–282, 1996.

KERALA AGRICULTURAL UNIVERSITY. Package of practices recommendations: crops. 12th ed. Trichur: **Kerala Agricultural University**, 2002.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T.P.; SCOTT, R.L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semiarid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 153, p. 31-44, 2012.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, 103: 249-264, 2000.

LEE, X.; MASSMAN, W.; LAW, B. **Handbook of Micrometeorology – A guide for surface flux measurement**. Kluwer Academic Publishers. 250 p., 2004.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

LIMA, J.R.S.; ANTONIO, A.C.D.; SOARES, W.A.; BORGES, E.; SILVA, I.F.; LIRA, C.A.B. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 09, n. 04, p. 527-534, 2005.

LIU, Y.A.; KAR, S.K. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms — A Review. **Energies**. 7, 2821-2849, 2014.

MATTHEWS, R.B.; HUNT, L.A. GUMCAS: A model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz). **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.6984, 1994.

MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; FARIAS, S. E. M.; BRACHO, R. Evapotranspiration and plant-atmospheric coupling in a *Brachiaria brizantha* pasture in the Brazilian savannah region. **Grass and Forage Science**, v. 66, p. 206-213, 2011.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. 2010, v. 14, n. 2 [Acessado 20 Junho 2021], pp. 196-202. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200011>>. Epub 15 Jan 2010.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; SUGAWARA, M.T.; PEÇANHA, A.L.; GOTTARDO, R.D. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.11, n.5, p.471–475, 2007.

MENGISTU, M. G. Heat and energy exchange above different surfaces using surface renewal. **PhD thesis**, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa. 151 p., 2008.

MENGISTU, M.G.; SAVAGE, M.J. Open water evaporation estimation for a small shallow reservoir in winter using surface renewal. **Journal of Hydrology**, v. 380, p. 27-35.

MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evapotranspiration estimated from satellite-based observations, **Hydrology and Earth System Sciences**, 15(2), 453–469, 2011.

MOKATE, A. S.; VARSHNEYA, M. C.; NAIDU, T. R. V. Evapotranspiration and energy balance studies over wheat crop by Bowen ratio energy balance method. **Journal Maharashtra Agricultural Universities**, v.20, n.2, p.273-276, 1995.

MU, Q. Z.; JONES, L. A.; KIMBALL, J. S.; MCDONALD, K. C.; RUNNING, S. W. Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain. **Water Resources Research** 45: Art. No. W09420, 2009.

OGEE, J.; LAMAUD, E.; BRUNET, Y.; BERBIGIER, P.; BONNEFOND, J. M. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. **Agricultural and Forest Meteorology** 106:173–186, 2001.

OLIVEIRA, S.L.; COELHO, E.F.; NOGUEIRA, C.C.P. Irrigação. In: SOUZA, L. S.; FARIAS, A.R.; MATTOS, P.L.P.; FUKUDA, W.M.G. (eds.). **Aspectos**

socioeconômicos e agronômicos da mandioca. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. cap. 11, p. 291-300.

PANOFISKY, H.A.; DUTTON, J.A. Atmospheric Turbulence: models and methods for engineering applications. **John Wiley and Sons**, New York, USA. 397p.,1994

PARMAR, A.; STURM, B.; HENSEL, O. Crops that feed the world: production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. **Food Security**, v. 9, n. 5, p. 907-927, 2017.

PAW U, K.T., SNYDER, R.L., SPANO, D., SU, H.B. Surface renewal estimates of scalar exchange. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M. (Eds), Micrometeorology in Agricultural Systems. **Agronomy Monograph** no. 47. Amer. Soc. Agron., Madison. pp.455-483., 2005.

PAW U, K.T.; BRUNET, Y. A surface renewal measure of sensible heat flux density. In: Preprints, 20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 10-13 September, Salt Lake City, Utah, **American Meteorological Society**, Boston, MA, pp. 52-53., 1991.

PAW U., K.T.; QIU, J.; SU, H.B.; WATANABE, T.; BRUNET, Y. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 74, p. 119-137,1995.

PAW U, K. T.; BRUNET, U, Y.; COLLINEAU S. On coherent structures in turbulence above and within agricultural plant canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 61, no. 1-2, pp. 55–68, 1992.

PAYERO, J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. Estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass; **Applied Engineering in Agriculture** 21(3) 401–409, 2005.

PAYERO, J.O., NEALE, C.M.U., WRIGHT, J.L., ALLEN, R.G. Guidelines for validating Bowen ratio data. **Trans. ASAE**, v.46, p.1051–1060, 2003

PERESSIN, V. A. Acúmulo de matéria seca na presença e na ausência de plantas infestantes no cultivar de mandioca SRT 59 Branca de Santa Catarina. **Bragantia** [online]. 1998, v. 57, n. 1 [Acessado 26 junho 2021], pp. 135-148. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0006-87051998000100016>>.

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

POZNÍKOVÁ, G.; FISCHER, M.; VAN KESTEREN, B.; ORSÁG, M.; HLAVINKA, P.; ŽALUD, A.; TRNKA, M. Quantifying turbulent energy fluxes and evapotranspiration in agricultural field conditions: a comparison of micrometeorological methods. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 249-263, 2018.

PURDY, A. J.; FISHER, J. B.; GOULDEN, M. L.; FAMIGLIETTI, J. S. Ground heat flux: An analytical review of 6 models evaluated at 88 sites and globally, **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, 121, 3045–3059, 2016.

QIU, J.; SU, H. B.; WATANABE, T.; BRUNET, Y. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 74, no. 1-2, pp. 119–137, 1995.

REICOSKY, D. C.; BROWN, P. W.; MORAN, M. S. Diurnal trends in wheat canopy temperature, photosynthesis, and evapotranspiration. **Remote Sensing of Environment** 49(3): 235-245, 1994.

RÓS, A. B.; HIRATA, A. C. S.; ARAÚJO, H. S.; NARITA, N. Crescimento, fenologia e produtividade de cultivares de mandioca. *Pesquisa Agropecuária Tropical* [online]. 2011, v. 41, n. 4 [Acessado 26 junho 2021], pp. 552-558. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/pat.v41i4.11075>>.

ROSA, R.; DICKEN, U.; TANNY, J. Estimating evapotranspiration from processing tomatoes using the surface renewal technique. **Biosystems Engineering**, v. 114, p. 406-413, 2013.

SÁNCHEZ, A. S.; SILVA, Y. L.; KALID, R. A.; COHIM, E.; TORRES, E. A. Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1265-1275, 2017.

SAUER, T.S.; HATFIELD, J.C.; PRUEGER, J.H.; NORMAN, J.M. Surface energy balance of a corn residue-covered field. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, p. 155- 168. 1998.

SAVAGE, M.J., EVERSON, C.S., ODHIAMBO, G.O., MENGISTU, M.G., JARMAIN, C. Theory and practice of evaporation measurement, with spatial focus on SLS as an operational tool for the estimation of spatially-averaged evaporation. **Water**

Research Commission Report No. 1335/1/04, ISBN 1-77005-247-X. Pretoria, South Africa. 204 p., 2004.

SAVAGE, M.J.; EVERSON, C.S.; METELERKAMP, B.R. Evaporation measurement above vegetated surfaces using micrometeorological techniques. **Water Research Commission** Report No. 349/1/97, ISBN 1-86845-363-4. Pretoria, South Africa. 248 p., 1997.

SCHMID, H.P. Footprint modelling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 113, p. 159-183. 2002.

SEDIYAMA, C.G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B.G. Relações clima-água-plantas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas. **Resumos...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 46-85.

SENE, K. J. Parameterizations for energy transfers from a sparse vine crop. **Agricultural and Forest Meteorology** 71(1-2): 1-18, 1994.

SHARMA, H.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chili peppers. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 81-91, 2017.

SILVA, H. A.; MURRIETA, R. S. S. Mandioca, a rainha do Brasil? Ascensão e queda da Manihot esculenta no estado de São Paulo. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 9, n. 1, p. 37-60, 2014.

SIMMONS, L.J.; WANG, J.; SAMMIS, T.W.; MILLER, D.R. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques for measuring water use in flood-irrigated pecans. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 181-191, 2007.

SNYDER, R.L.; SPANO, D.; DUCE, P.; PAW U, K.T.; RIVERA, M. Surface renewal estimation of pasture evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. 6, p. 716-721, 2008

SNYDER, R.L.; SPANO, D.; PAW U, K. T. Surface renewal analysis for sensible heat and latent heat flux density. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 77, p. 249-266, 1996.

SPANO, D.; SNYDER, R. L.; DUCE, P.; PAW U, K. T. Surface renewal analysis of sensible heat flux density using structure functions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 86, p. 259-271, 1997.

SPANO, D.; SNYDER, R.L.; DUCE, P.; PAW U, K.T. Estimating sensible and latent heat flux densities from grape vine canopies using surface renewal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p.171-183, 2000.

SPANO, D.; SYNDER, R.L.; DUCE, P.; PAW U, K.T.; FALK, M. Surface renewal determination of scalar fluxes over and old-growth forest. In: 25th **Conference on Agricultural Forest Meteorology**, 19-25 May, Norfolk, Virginia, USA, 2002.

STRECK, N.A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 105-111, 2002.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for turbulent heat fluxes, **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, 6(1), 85–100, 2002.

TANNER, C. B. Energy balance approach to evaporation from crops. **Proceedings of the Soil Sciences Society of America**, v. 24, p. 1-9, 1960.

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**, Amsterdam, v. 103, p. 335-348, 2000.

TORR, H.L.; MARCHELLO, J. M. Film-penetration model for mass and heat transfer. **Amer. Industrial & Engineering Chemistry**. J. 4:97-101, 1958.

WANG, K.; WANG, P.; LI, Z.; CRIBB, M.; SPARROW, M. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature, **Journal of Geophysical Research**., 112, 2007.

XUE, J.; BALI, K. M.; LIGHT, S. HESSELS, T., KISEKKA, I. Evaluation of remote-sensing based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. **Agricultural Water Management**, v. 238, 106228., 2020.

YANG, F.; WHITE, M.; MICHAELIS, A.; ICHII, K.; HASHIMOTO, H.; VOTAVA, P. ZHU, S.; NEMANI, R. Prediction of continental-scale evapotranspiration by combining MODIS and Ameriflux data through support vector machine. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 44:3452–3461, 2006.

YOSHIMOTO, M.; OUE, H.; KOBAYASHI, K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, p. 226-246, 2005.

ZAPATA, N.; MARTÍNEZ-COB, A. Evaluation of the surface renewal method to estimate wheat evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 55, n. 141-157, 2002.

ZHOU, S.; WANG, J.; LIU, J.; YANG, J.; XU, Y.; LI, J. Evapotranspiration of a drip-irrigated film-mulched cotton field in northern Xinjiang, China. **Hydrological Processes**, 26, 1169-1178, 2012.

CAPÍTULO I

FLUXOS DE CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE EM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL COM OS MÉTODOS DA RENOVAÇÃO DO AR NA SUPERFÍCIE E BALANÇO DE ENERGIA

FLUXOS DE CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE EM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL COM OS MÉTODOS DA RENOVAÇÃO DO AR E BALANÇO DE ENERGIA

Autor: Neilon Duarte da Silva

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO

Vários são os métodos de determinação do fluxo de calor sensível (H) em superfícies naturais ou agrícolas. Entre eles está a renovação do ar na superfície (RAS) baseado em rampas de temperatura do ar medida sob alta frequência por meio de um termopar ultrafino. Uma torre micrometeorológica foi instalada (13° 6' 39" S, 39° 16' 46" W, 154 m anm) para se avaliar a adequabilidade do método na estimativa de H sobre cultivo de mandioca industrial via calibração em relação a um sistema de covariância de turbilhões (CT), este consistindo de um anemômetro 3D. Em ambos os sistemas as medições foram feitas a frequência de 10 Hz e compreenderam o período de 17/04 a 25/07/2019 (100 dias). Além de medições de alta frequência de temperatura do ar e temperatura do sônico, medições de radiação líquida e fluxo de calor no solo também foram feitas e todos os dados agrupados em intervalos de 30 min, para obtenção do fluxo de calor latente (LE) via solução do balanço de energia. Verificou-se que: (a) o método da RAS mostrou-se adequado para estimativa do fluxo de calor sensível (H) com coeficiente de calibração igual a 0,96; (b) sob condições atmosféricas instável (período diurno) o método da RAS apresentou melhor desempenho para estimativa de H em relação a condições estáveis (período noturno); (c) o método da RAS mostrou-se adequado para estimativa do fluxo de calor latente (LE), tendo a CT como referência, em cultivo de mandioca industrial com alto grau de correlação ($r^2 > 0,90$); e (d) na área cultivada com mandioca industrial, verificou-se que o fluxo de calor no solo (G) correspondeu em média a 6% do saldo de radiação. No caso dos fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (LE), os percentuais foram em média 22% e 72%, respectivamente.

Palavras-chave: Estruturas coerentes, rampas de temperatura, Manihot esculenta

SENSIBLE AND LATENT HEAT FLUXES OVER A PROCESSING CASSAVA CROP WITH THE SURFACE RENEWAL AND ENERGY BALANCE METHOD

Author: Neilon Duarte da Silva

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT

There are several methods for determining the sensible heat flux (H) on natural or agricultural surfaces. One such method is the surface renewal (SR) based on ramps of air temperature measured at high frequency by means of an ultra-thin thermocouple. A micrometeorological tower was installed (13° 6' 39" S, 39° 16' 46" W, 154 m anm) to assess the suitability of the method in estimating H on industrial cassava cultivation via calibration in relation to the eddy covariance (EC), this consisting of a 3D anemometer. In both systems, measurements were made at a frequency of 10 Hz and comprised the period from 17/04 to 25/07/2019 (100 days). In addition to high-frequency measurements of air temperature and sonic temperature, measurements of net radiation and ground heat flux were also made, and all data grouped at 30-min intervals for determination of latent heat flux (LE) via balance solution power. It was found that (a) the SR method was adequate to estimate the sensible heat flux (H) over industrial cassava with a calibration coefficient equal to 0.96; (b) under conditions of unstable atmospheric stability (daytime) the SR method showed better performance for estimating H compared to stable atmospheric conditions (nighttime); (c) the SR method proved to be adequate for estimating the latent heat flux (LE), in the industrial cassava cultivation with a high degree of correlation ($r^2 > 0.90$), with the EC method as a reference; and (d) in the area cultivated with industrial cassava, it was found that the heat flux in the soil (G) corresponded on average to 6% of the radiation balance. In the case of turbulent flows of sensible heat (H) and latent heat (LE), the percentages were on average 22% and 72%, respectively.

Keywords: coherent structures, temperature ramps, *Manihot esculenta*

1. INTRODUÇÃO

A compreensão do destino das trocas radiativas entre a superfície e o ar é fundamental para modelagem dos processos turbulentos de troca de massa e energia que ocorrem na atmosfera inferior (BONAN, 2016). Ao nível da superfície, o saldo total de radiação (R_n) é a fonte de energia para aquecimento do ar (H), aquecimento do meio abaixo da superfície (G) e para a evaporação da água (LE). Essa partição é comumente representada pela equação simplificada do balanço de energia [$R_n = G + H + LE$], onde teoricamente a diferença ($R_n - G$) é a energia disponível para os fluxos turbulentos ($H + LE$).

Em áreas vegetadas, LE representa a energia envolvida no processo da evapotranspiração (ET), um conceito fundamental no contexto dos requerimentos de água das culturas e manejo da água de irrigação. R_n e G podem ser facilmente medidos com instrumentos apropriados em condições de campo (SNYDER et al., 2008). Obter H e LE , por outro lado, é mais desafiador, pois demanda o uso de instrumentação complexa e de custo elevado e requer um método de observação da turbulência que domina esses dois processos na camada limite atmosférica (MONTEITH; UNSWORTH, 1990). Descrição detalhada de sensores micrometeorológicos e procedimentos para determinação de fluxos turbulentos podem ser encontrados em Hatfield e Baker (2005), incluindo o balanço de energia com razão de Bowen, a técnica da covariância de turbilhões (*Eddy Covariance*) e o método da renovação do ar na superfície (*Surface Renewal Analysis*).

O método da renovação do ar na superfície (RAS) é uma técnica micrometeorológica concebida para estimativa de grandezas escalares na atmosfera e tem sido muito utilizado na determinação do componente H do balanço de energia. O método foi inicialmente proposto por Paw U e Brunet (1991). Paw U et al. (1995) demonstraram a eficiência do método em estimar H a partir de flutuações da temperatura do ar sobre um cultivo de milho, um pomar de nozes e sobre floresta. O método é baseado na existência de estruturas turbulentas coerentes que ocorrem próximas a superfícies rugosas. Maiores detalhes sobre o método da renovação do ar e seu desenvolvimento são encontrados em Paw U et al. (2005) e Shaw; Paton; Finnigan, (2013).

O método tem sido usado sobre um amplo espectro de superfícies. Mengistu e Savage (2010) usaram a RAS para estimar a evaporação de um lago na África do Sul.

O método tem sido usado sobre vegetação com ampla variação em suas características como altura da planta, idade, orientação e densidade de plantio bem como abertura e arquitetura do dossel. Algumas superfícies vegetadas incluem floresta (PAW U et al., 1995; ZERI; ABREU; NOBRE, 2013), pomar de nozes (PAW U et al., 1995), SHAPLAND et al. 2012, POBLETE-ECHEVERRÍA; SEPÚLVEDA-REYES; ORTEGA-FARÍAS, 2014; PARRY et al., 2019), SUVOČAREV et al., 2014), tomate (ROSA; DICKEN; TANNY, 2013; XUE et al., 2020), algodão (ROSA; DICKEN; TANNY, 2013), POZNÍKOVÁ et al., 2019), milho (PAW U et al., 1995; XUE et al., 2020), pomar de laranja (CASTELLVÍ; CONSOLI e PAPA, 2012), e abacate (MORÁN et al, 2020), entre outras. Uma vez o H determinado com o método da renovação do ar, o fluxo de calor latente a partir da superfície em questão pode ser estimado como resíduo do balanço de energia [$LE = R_n - H - G$].

A área plantada com mandioca no Brasil em 2017 foi de 1,4 milhão de hectares com produtividade média variando de 9,8 to 21,9 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2018) e média nacional em torno de 15 t ha⁻¹. A mandioca é tipicamente cultivada sob regime de chuva, mas quando irrigada pode render duas vezes mais (COELHO FILHO, 2020). Até o presente, não há relatos do uso do método da renovação do ar para medição do fluxo de calor sensível H sobre a cultura da mandioca seja em regime de irrigação seja em regime de chuva.

Os objetivos desse trabalho foram (1) calibrar um sistema de renovação do ar na superfície para determinação do fluxo de calor sensível sobre área de mandioca industrial; (2) quantificar os fluxos de calor sensível e calor latente a partir da cultura com os métodos combinados da renovação do ar na superfície e o balanço de energia; e (3) estudar a partição do saldo de radiação total entre os componentes do balanço de energia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento de campo

O trabalho de campo foi conduzido na Fazenda Novo Horizonte (13°06'39" S, 39°16'46" W, 154 m anm) no município de Laje, Bahia, Brasil. A área total da fazenda é de aproximadamente 1000 ha e na época desta pesquisa (2019) era de propriedade da Bahiamido, uma agroindústria especializada no processamento de mandioca para produção de amido, com uma capacidade de processamento em torno de 150.000 toneladas de raízes por ano.

Variedades de mandioca são cultivadas na fazenda principalmente devido à precipitação anual de pelo menos 1000 mm em média e bem distribuída, o que favorece o cultivo não irrigado. O clima da região é de transição entre Af (tropical sem estação seca) e Am (tropical de monção) de acordo com o sistema de Köppen (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual é em torno de 24 °C e a umidade relativa 70%.

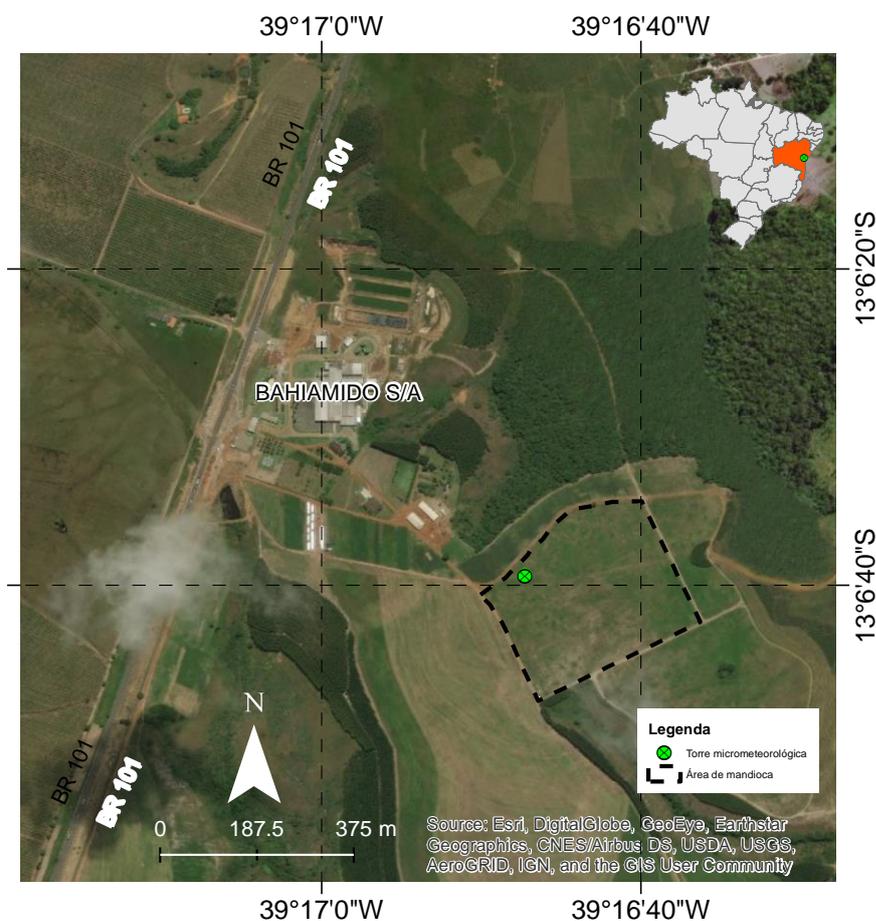


Figura 1. Área de estudo em área de cultivo de mandioca na fazenda da então (à época) empresa Bahiamido S.A

2.2 Posicionamento da torre meteorológica

A parcela onde esse estudo foi conduzido tem uma área de aproximadamente 10 ha, cultivada com a variedade de mandioca industrial BRS Novo Horizonte, que sob condições agronômicas ótimas pode apresentar rendimento de até 40 ton ha⁻¹. A cultura era conduzida sob regime de chuva com espaçamento de plantio de 90 cm entre fileiras e 80 cm entre plantas na fileira. A instalação de um tripé com a instrumentação meteorológica foi feita em duas visitas à área (11 e 16 de abril de 2019). A semana que se seguiu à segunda visita foi de teste para se ter certeza que o painel solar, o *dataloguer* e os sensores estavam funcionando adequadamente, o que foi confirmado na visita de 23 de abril. Visitas semanais à área experimental ficaram agendadas para *download* de dados e manutenção da torre.

O principal critério para escolha de um ponto no interior da área para posicionamento da torre foi garantir suficiente bordadura na direção contrária do vento (*upwind direction*). Considerou-se também como critério a facilidade de acesso à torre tendo em vista o crescimento das plantas que dificultaria a movimentação de pessoal. Uma vez definido o ponto de instalação da torre, as distâncias lineares da torre até uma estrada não pavimentada que circulava a área foram 40 m na direção norte (0° do norte geográfico), 300 m na direção leste (90°), 175 m na direção sul (180°), e 39 m na direção oeste (270°). A menor distância da torre à estrada foi de 23 m (azimute de 314°). Importante destacar que o cultivo da mandioca não estava restrito a essa parcela apenas, mas se estendia além da estrada por pelo menos mais 100 m. Na direção sudeste (135°), o cultivo da mandioca alcançava uma distância de até 700 m.

Historicamente, os ventos sopram do setor leste-sul no leste da Bahia de acordo com análises de dados de estações meteorológicas dessa região pertencentes à rede do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). De qualquer forma, durante a coleta de dados para esse estudo, a velocidade horizontal do vento e a direção medidas com um anemômetro sônico foram usadas para se acessar a direção predominante do vento no campo experimental.

2.3 Instrumentos e coleta de dados

Os sensores de resposta rápida e resposta lenta levados ao campo para coleta de dados estão listados na Tabela 1. Placa de fluxo de calor no solo, termopar de solo

e medidor de umidade do solo são instrumentos enterrados e para estes a Tabela 1 mostra a profundidade de instalação. Para os demais, a mesma tabela mostra a altura a partir da superfície.

Tabela 1. Instrumentos de resposta rápida e lenta instalados na parcela experimental

Instrumento	Modelo	Fabricante	Altura ou profundidade (cm)	Parâmetro medido
Resposta rápida				
Anemômetro sônico 3D	81000	RM Young	230 ^(a)	Vel. do vento e temperatura do sônico (u, v, w, Ts)
Termopar ultrafino	FW3 (76 µm)	Campbell Scientific	180 ^(b)	Temperatura do ar
Resposta lenta				
Saldo radiômetro	NRLite	Kipp & Zonen	270	Saldo de radiação
Piranômetro	SPLite	Kipp & Zonen	270	Radiação solar
Placa de fluxo de calor	HFP01	Hukseflux	8	Fluxo de calor no solo
Termopar de solo	TCAV	Campbell Scientific	2 e 6	Temperatura do solo
Medidor de umidade do solo	GS1	Decagon	4	Umidade do solo

(a), (b) Altura inicial; (c) Instalação em 01 de junho

Conforme mostrado na Tabela 1, a altura inicial do anemômetro 3D foi 230 cm acima do solo e para o termopar ultrafino foi de 180 cm. Para manter esses dois instrumentos acima da copa da vegetação e evitar danos ao termopar ultrafino eles tiveram que ser movimentados para cima à medida que a cultura crescia e para isso ambos foram montados numa barra de tubo metálico apontando para o leste na direção predominante do vento (300 m de bordadura). Na barra os sensores foram alinhados verticalmente com o sônico posicionado a 50 cm acima do termopar. Os dados dos sensores de resposta rápida juntamente com os dados do saldo radiômetro, placas de fluxo de calor, termopares de solo e medidores de umidade do solo foram usados nos cálculos do balanço de energia. As alturas dos instrumentos de resposta lenta não sofreram alteração.

Dados experimentais foram continuamente coletados por meio de um dataloguer (modelo CR1000, Campbell Scientific, USA) alimentado por um painel de 90 W

conectado a uma bateria recarregável de 50 Ah. Os sensores de resposta rápida foram escaneados a uma frequência de 10 Hz e os dados resumidos em intervalos de 30 minutos. Este também foi o intervalo de integração para os dados dos sensores de resposta lenta, exceto que estes foram escaneados a cada 5 s. O código usado no *datalogger* foi adaptado de uma versão gentilmente cedida por Richard Snyder da Universidade da Califórnia em Davis, USA. Descrição detalhada e resultados de teste do referido código podem ser encontrados em Shapland et al. (2013).

2.4 Determinação dos componentes do balanço de energia

2.4.1 Fluxo de calor sensível (H)

No presente estudo, a densidade de fluxo de calor sensível H (W m^{-2}) foi determinada por dois métodos: (1) renovação do ar na superfície (RAS) e (2) covariância de turbilhões (doravante designado por CT). O segundo foi usado como referência para calibração do primeiro.

2.4.1.1 Método de Renovação do Ar na Superfície (RAS)

Aqui, esse trabalho o então *Surface Renewal* foi traduzido como método da renovação do ar na superfície. Outras formas de se obter o coeficiente de calibração α é através de parâmetros físicos da atmosfera inferior, não necessitando, portanto, de um outro método de referência para calibração da RAS (CASTELLVÍ, 2004; SHAPLAND et al., 2012a, 2012b; SUVOCAREV et al., 2014).

A Figura 1, adaptada de McElrone et al. (2013), ilustra a formação teórica de rampas de temperatura do ar. Quando uma parcela de ar entra em contato com os elementos do dossel assume-se que um período de quiescência ocorre no qual não há variação da temperatura da parcela (Figuras 1a, e). Se a parcela é mais fria que a vegetação então ela ganha energia e experimenta um aumento gradual de temperatura que é então detectado pelo termopar ultrafino acima da copa (Figuras 1b, f). Na sequência a parcela ejeta e é substituída (renovada) por uma outra mais fria que a vegetação produzindo um brusco declínio no traço de temperatura (Figuras 1c, g). Deste ponto, o ciclo eventualmente se repete (Figure 1d, h).

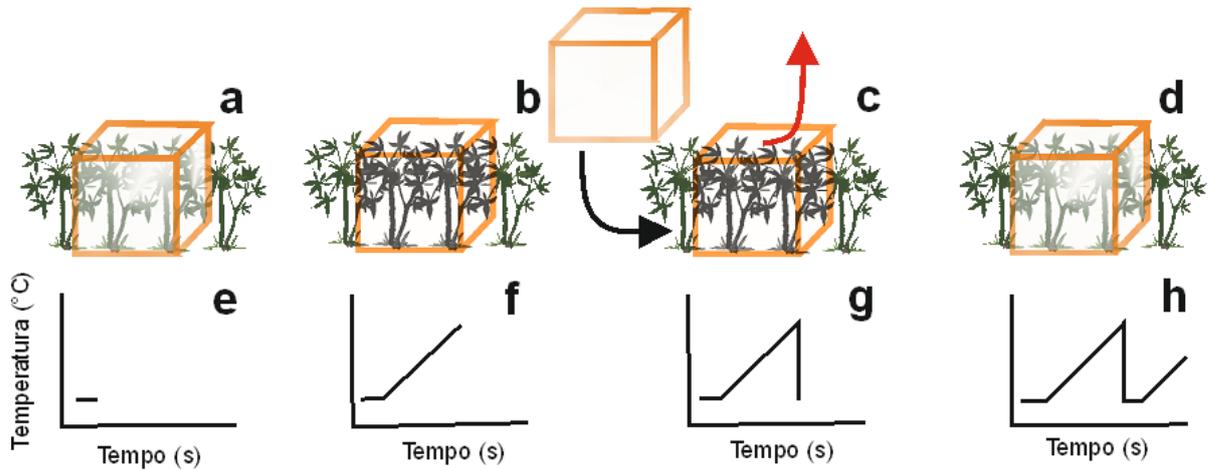


Figura 2. Processo idealizado de formação de rampas de temperatura do ar no método de renovação do ar na superfície. Adaptado de McElrone et al. (2013)

Na representação teórica da Figura 1, calor é transferido da superfície (vegetação) para o ar devido a uma diferença de temperatura e o fluxo de calor sensível H é então positivo, o que caracteriza ar instável. Quando a porção de ar que entra em contato com a vegetação é mais quente, calor é então transferido do ar para a vegetação e o H é negativo, o que caracteriza ar estável.

As rampas de temperatura são caracterizadas por uma amplitude (A) e pelo inverso da frequência de rampa ($d + s$), como mostrado na Figura 2, para ambas as condições de estabilidade atmosférica. A densidade de fluxo de calor sensível é calculada a partir destas características usando-se uma rampa média representativa de um dado intervalo de tempo, por exemplo 30 minutos, de acordo com a Equação 1.

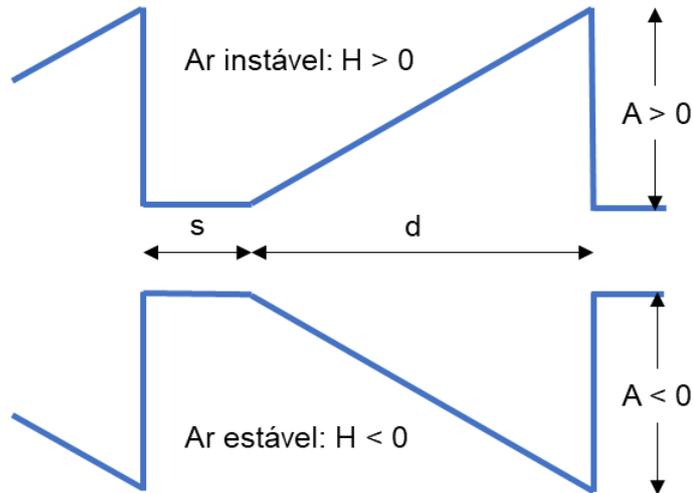


Figura 3. Modelo linearizado de rampas de temperatura para ambas as condições instável e estável, onde A é amplitude e (d+s) frequência de rampa inversa

$$H_{RAS} = \alpha \cdot H' = \alpha \cdot \left[\rho C_p \frac{A}{d+s} z \right] \quad (1)$$

onde: H_{RAS} é a densidade de fluxo de calor sensível após calibração ($W m^{-2}$); H' é a densidade de fluxo de calor sensível antes da calibração ($W m^{-2}$); α é o fator de calibração; ρ é a densidade do ar ($kg m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$); A é a amplitude da rampa ($^\circ C$); $1 / (d + s)$ é a frequência da rampa (s^{-1}) e z é a altura de medição da temperatura do termopar (m).

Snyder et al. (1996) usaram momentos estatísticos e a função de estrutura de Van Atta (1977) (Equação 2) para calcular as características A e $(d + s)$ da rampa média, como se segue:

$$S^n(r) = \frac{1}{m-j} \sum_{i=1+j}^m (T_i - T_{i-j})^n \quad (2)$$

onde: m é o número de pontos de dados no intervalo de 30 minutos medidos na frequência f em Hz; n é o expoente da função; j é o intervalo de amostragem (*sample lag*) entre pontos de dados correspondendo a uma fração de tempo (*time lag*) r dada pela razão (j / f) ; e T_i é a i -ésima amostra de temperatura na série de 30 minutos. No código do dataloguer, um único valor de $r = 0,50$ s foi usado na função de estrutura e nenhum outro valor foi testado, a exemplo de 0,25 s, 0,75 s e 1,00 s como já fizeram

vários outros autores (SPANNO et al., 1997; POBLETE-ECHEVERRÍA; SEPÚLVEDA-REYES; ORTEGA-FARÍAS, 2014). De acordo com Snyder et al. (1996) uma condição no modelo linearizado de Van Atta (1977) é que a fração de tempo r deve ser bem menor do que $(d + s)$.

Uma estimativa do valor da amplitude média A é obtida resolvendo-se Equação 3 para raízes reais.

$$A^3 + pA + q = 0 \quad (3)$$

onde:

$$p = 10S^2(r) - \frac{S^5(r)}{S^3(r)} \quad (4)$$

e

$$q = 10S^3(r) \quad (5)$$

Uma vez conhecida a amplitude da rampa, o inverso da frequência de rampa $(d + s)$ é calculada conforme a Equação 6.

$$d + s = -\frac{A^3 \cdot r}{S^3(r)} \quad (6)$$

Com os valores de A e $(d + s)$, valores médios de 30 minutos de H' são calculados dentro do programa do dataloguer de acordo com a Equação 1. Um valor igual 1 para o coeficiente de calibração α é assumido inicialmente, de maneira que a necessidade de calibração pode ser posteriormente avaliada.

2.4.1.2 Método da Covariância de Turbilhões (CT)

No segundo método, o fluxo de calor sensível H foi obtido usando a técnica da covariância de turbilhões de acordo com a Equação 7.

$$H_{CT} = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (7)$$

onde: H_{CT} é a densidade de fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) via covariância de turbilhões; ρ é a densidade do ar ($kg\ m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$); w' é o desvio instantâneo da velocidade vertical do vento em torno da média ($m\ s^{-1}$); e T' é o desvio instantâneo da temperatura do anemômetro sônico em torno da média ($^\circ C$). H_{CT} também foi integrado como média de intervalos de 30-min para assim ficar compatível com o mesmo intervalo de integração de H' .

Como previamente mencionado, a covariância de turbilhões foi usada para calibração do método da renovação do ar na superfície, constituindo este o procedimento clássico, e o coeficiente de calibração α foi obtido como a inclinação de uma regressão linear através da origem em que H_{CT} (eixo Y) foi plotado em função de H' (eixo X) (SPANNO et al., 2000; SNYDER et al., 2008; SHAPLAND et al., 2012). Após obtenção de α , o fluxo de calor sensível calibrado H_{RAS} é calculado de acordo com a Equação 1, ou seja, $H_{RAS} = \alpha \cdot H'$.

2.4.2 Radiação líquida e fluxo de calor no solo (R_n e G)

Como mostrado na Tabela 1, a radiação líquida R_n ao nível da vegetação foi medida com um saldo radiômetro posicionado a 270 cm acima do solo e montado em um braço metálico apontando para o norte geográfico.

Duas placas de fluxo de calor foram usadas para medição do fluxo de calor a 8 cm de profundidade e a 200 cm de distância do tripé da torre. Uma das placas foi instalada entre plantas na fileira e a outra entre fileiras para melhor representatividade das medições. A variação da temperatura do solo acima de cada placa foi monitorada com termopares de solo inseridos a 2 e 6 cm de profundidade enquanto a umidade do solo dentro da camada superficial foi medida com um sensor FDR conforme descrito na Tabela 1.

O fluxo de calor na superfície do solo foi calculado de acordo com a Equação 8.

$$G = G_8 + C_s \left(\frac{T_{s(i)} - T_{s(i-1)}}{\Delta t} \right) z_s \quad (8)$$

onde: G é o fluxo de calor no solo na superfície ($W\ m^{-2}$); G_8 é o fluxo de calor no solo medido a 8 cm de profundidade; $T_{s(i)}$ e $T_{s(i-1)}$ são as temperaturas médias do solo acima da placa no início e final do intervalo de tempo Δt , respectivamente; Δt é o intervalo

de tempo (1800 s); z_s é profundidade de instalação da placa de fluxo de calor (m); e C_s é a capacidade calórica do solo ($J m^{-3} °C^{-1}$) calculada com a Equação 9 assumindo-se para a área experimental um solo mineral com densidade de partícula de $2,65 Mg m^{-3}$ e conteúdo desprezível de matéria orgânica.

$$C_v = 2.01 * 10^6 \rho_s / 2.65 + 4.19 * 10^6 \theta \quad (9)$$

onde: ρ_s é a densidade do solo ($1.30 Mg m^{-3}$) e θ é a umidade do solo ($m^3 m^{-3}$).

2.4.3 Fluxo de calor latente (LE)

A densidade de fluxo de calor latente foi obtida como resíduo do balanço de energia (Equação 10).

$$LE = R_n - G - H \quad (10)$$

onde: LE é a densidade de fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) oriunda da vegetação; R_n é o saldo de radiação total ($W m^{-2}$); G é a densidade de fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); e H é a densidade de fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$). Desde que medições de H com a renovação do ar e a covariância de turbilhões foram obtidas independentemente, o balanço de energia pôde ser resolvido para ambos os métodos de forma a se obter, respectivamente, LE_{RAS} e LE_{CT} .

Na Equação 10, R_n é um número positivo quando o fluxo líquido é orientado para baixo, o que significa que energia é adicionada à superfície, LE e H são números positivos quando o fluxo é orientado para cima (energia adicionada ao ar) e G é um número positivo quando o fluxo é orientado para baixo (energia adicionada ao solo) (SNYDER et al., 2008).

2.5 Análise de footprint

Uma análise de *footprint* em torno da torre micrometeorológica para delimitar a área contribuição para fluxos turbulentos foi determinada baseada no modelo de Kljun et al. (2015) por meio da ferramenta FFPOne (v.1.22) encontrada em <http://footprint.kljun.net/download.php>. O modelo requer um arquivo de dados de

entrada (.csv) com os seguintes parâmetros e formato: ano (yyyy); mês do ano (mm) [1-12]; dia do mês (day) [1-31]; hora (HH) [0-23] ou [1-24] em UTC; minutos (MM), por exemplo [0 30]; altura de medição acima do solo, z_m [m]; altura do plano zero de deslocamento, d [m]; comprimento de rugosidade, z_0 [m]; velocidade média do vento em z_m , u_{mean} [m s^{-1}]; comprimento de Monin-Obukhov, L [m]; desvio padrão das flutuações da velocidade lateral do vento após rotação, σ_v [m s^{-1}]; velocidade de fricção, u_{star} [m s^{-1}]; e direção do vento em graus para rotação do *footprint*. Alguns desses parâmetros puderam ser obtidos diretamente da tabela de saída do programa rodando no dataloguer. Outros parâmetros tiveram que ser entrados pelo usuário, como z_m , d , e L .

Devido a mudanças na altura dos sensores de resposta rápida devido ao crescimento da cultura, uma análise de *footprint* foi inicialmente proposta para cada um dos três intervalos em que o período de medições foi dividido. O plano zero de deslocamento (d) foi calculado como 2/3 da altura da cultura (h_c). Os valores de z_m e h_c usados no modelo de Kljun et al. (2015) foram, por intervalo, respectivamente, 230 cm e 100 cm de 17/04 a 27/05; 250 cm e 150 cm de 28/05 a 01/07 e 300 cm e 200 cm de 02/07 a 25/07. O comprimento de Monin-Obukhov, que é utilizado para se caracterizar as condições de estabilidade atmosférica, foi calculado de acordo com a Equação 13.

$$L = -\frac{\rho C_p \mu_*^3 T}{kgH} \quad (13)$$

onde: ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), u_* é a velocidade de fricção (m s^{-1}), T é a temperatura do ar (K), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), e H é a densidade de fluxo de calor sensível (W m^{-2}).

Entre muitos arquivos, a ferramenta FFPOne gera um mapa da área da torre de fluxo com base em imagem do Google com um *footprint* em duas dimensões e linhas de contorno de 10 a 90%, em intervalos de 10%, delimitando a área de contribuição de onde o fluxo turbulento é originado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Direção do vento e análise de footprint

A Figura 3 mostra diferentes aspectos do local do experimento. A Figura 3A é uma figura da torre obtida em 30/04/2019, mostrando a posição relativa dos instrumentos, incluindo o anemômetro sônico 3D e o termopar ultrafino (TPUF). A Figura 3B mostra a rosa dos ventos feita a partir de dados médios de 30 minutos obtidos com o anemômetro sônico no período de 17/04 a 25/07.

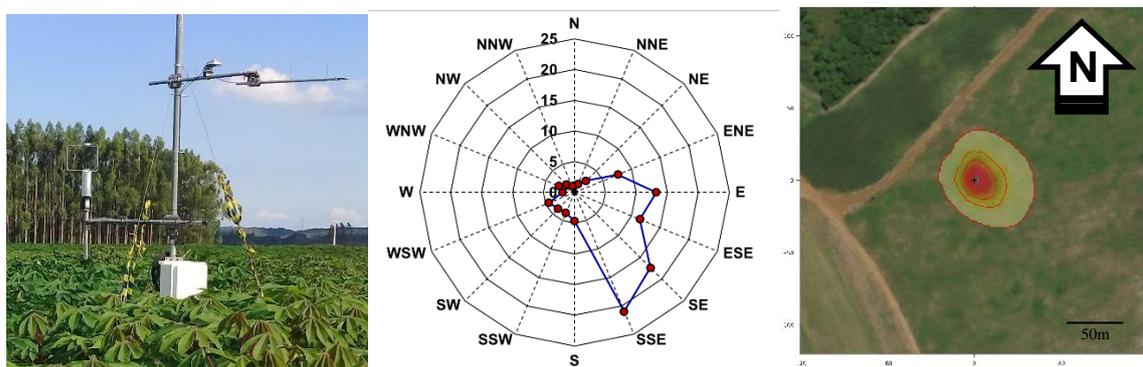


Figura 4. Torre micrometeorológica (A); rosa dos ventos mostrando a direção predominante na área experimental no período de 17/04 a 25/07/209 (B); análise de footprint (C)

A rosa dos ventos na Figura 3B mostra que o vento soprou predominantemente (63% da frequência) do setor leste-sul com a seguinte distribuição: 21% da direção sul-sudeste (SSE), 17,4% da direção SE, 11,5% da direção leste-sudeste (ESE) e 13,2% da direção E. Em cada direção, as velocidades médias do vento foram de 1,13 m s^{-1} (SSE e SE), 1,23 m s^{-1} (ESE) e 1,5 m s^{-1} (E). A Figura 3C mostra um *footprint* médio para todo o período de medição sobre uma imagem da área experimental obtida do Bing, independente da alteração na altura do anemômetro sônico durante o período. No geral, a rosa dos ventos e a área de contribuição (*footprint*) dos fluxos turbulentos estão em concordância.

A distância “vista” pelo anemômetro sônico na direção à montante (*upwind*) totaliza aproximadamente 50 m em média a partir da torre micrometeorológica. Na direção predominante do vento (SSE) a área de contribuição de 90% dos fluxos turbulentos é mais pronunciada.

3.2 Calibração do método de renovação do ar na superfície

A Tabela 2 mostra o fator de calibração (α), o coeficiente de determinação (R^2) para as regressões através da origem quando H da covariância de turbilhões (H_{CT}) foi plotado contra o H estimado pela renovação do ar (H'). Os dados são apresentados separadamente para cada condição de estabilidade atmosférica de acordo com o crescimento da cultura e mudança nas alturas dos sensores de resposta rápida, além de serem apresentados também para todo o período de medição.

Tabela 2. Calibração do método da renovação do ar em função das condições de estabilidade atmosférica e altura dos sensores de resposta rápida

Condição atmosférica	Altura das plantas (cm)	Altura do TP (cm)	Fator de calibração	r^2 ($H_{EC} \times H'$)
Instável	60 - 150 ^(a)	180	1,11	0,918
	150 - 200 ^(b)	200	0,99	0,917
	200 ^(c)	250	0,87	0,931
	Todo período ^(d)	-	0,98	0,912
Estável	60 - 150	180	0,60	0,783
	150 - 200	200	0,87	0,756
	200	250	0,78	0,669
	Todo período	-	0,74	0,713
Ambas	60 - 150	180	1,05	0,886
	150 - 200	200	0,98	0,897
	200	250	0,86	0,897
	Todo período	-	0,96	0,887

^(a) 17 abril a 27 maio; ^(b) 28 maio a 01 julho; ^(c) 02 julho a 25 julho; ^(d) 17 abril a 25 julho

Sob condições de atmosfera estável ($H < 0$), a RAS superestimou o fluxo de calor sensível H' relativamente a H_{CT} obtido via covariância de turbilhões, resultando em valores de α consistentemente inferiores a 1 nos três intervalos (Tabela 2) e 0,74 para todo o período de medição. Para condições de atmosfera instável ($H > 0$), α foi maior que 1 no primeiro intervalo, aproximadamente 1 no segundo intervalo e inferior a 1 no terceiro intervalo com um valor sazonal de 0,98. Segundo vários autores (HU et. al., 2018; McELRONE et. al., 2013; PARRY et. al., 2019), um fator de calibração α para corrigir H obtido via renovação do ar na superfície é necessário quando ocorre aquecimento desuniforme da parcela de ar da superfície do solo até a altura de medição das flutuações de temperatura. Portanto, baseado nos valores sazonais de

α mostrados na Tabela 2, pode-se dizer que o método da renovação do ar na superfície sobre a cultura da mandioca apresentou melhor desempenho para estimativa de H quando predominaram condições de atmosfera instável. A tendência da RAS em apresentar melhor desempenho sob tais condições foi primeiramente verificada pelos proponentes do método (PAW U et al., 1995) e tem sido confirmado em vários outros estudos.

No geral, o coeficiente de determinação (r^2) foi maior do que 0,90 sob atmosfera instável em comparação à atmosfera estável. Outros autores relataram valores até maiores que os da Tabela 2 (MEKHMANDAROV et. al., 2012; HOLWERDA et. al., 2021). Quando se considera ambas as condições (instável + estável) e, portanto, todo o período de medições, o valor de α variou de 0,86 a 1,05 com média de 0,96, este muito próximo a 1 e entre aqueles encontrados separadamente para cada condição de estabilidade atmosférica. O mesmo ocorreu com os valores de r^2 .

A Figura 4 ilustra graficamente a calibração sazonal do método clássico da RAS sobre a cultura da mandioca industrial sob ambas as condições instável e estável. As Figuras 4A e 4B mostram que a concordância entre H_{CT} e H' foi excelente mesmo antes da calibração, com um coeficiente α de 0,98 como previamente mostrado na Tabela 2. Sob condição de atmosfera estável (Figuras 4A e 4B), a RAS consistentemente superestimou H ($\alpha = 0,74$) com erros mais altos associados a valores mais negativos de H' . Mas após a calibração, H_{RAS} tornou-se altamente correlacionado com H_{CT} , como esperado.

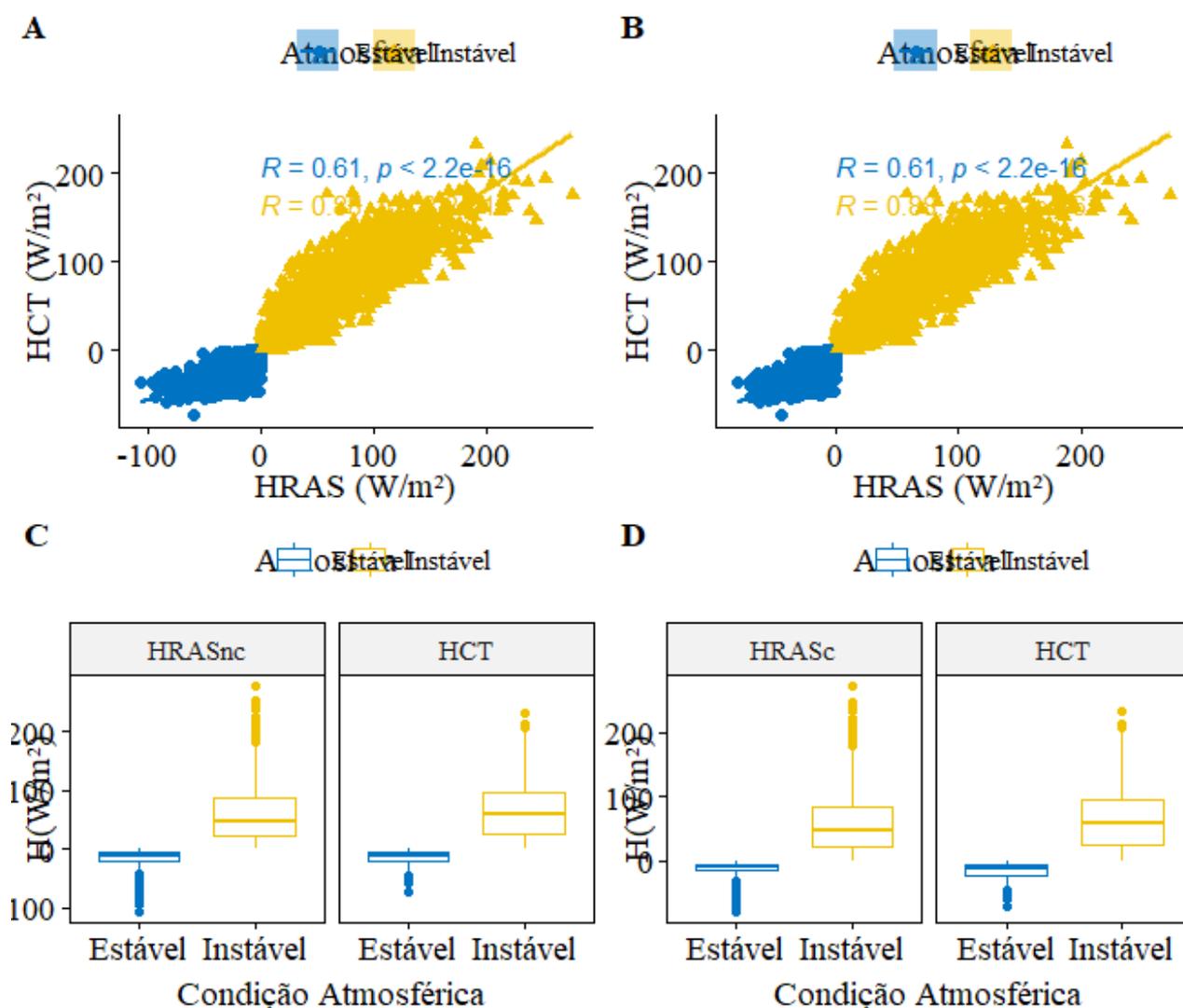


Figura 5. Processo de calibração do fluxo de calor sensível H' da análise de renovação de superfície sobre a mandioca sob condições de atmosfera estável e instável para todos os dados medidos. Antes da calibração (A e C) e após a calibração (B e D)

A presença de valores de H' que se diferenciam das demais observações (outliers) (Figura 4C e 4D) foi mais presente no método RAS, em ambas as condições atmosféricas, com destaque para condição instável, com maior número de outliers. A nível de mediana, os valores foram semelhantes, mesmo antes e depois da calibração, $-0,783 W m^{-2}$ e $49,347 W m^{-2}$ para condição estável e instável com o método RAS e $-0,878 W m^{-2}$ e $48,312 W m^{-2}$ para o método CT.

A Figura 5 mostra o processo de calibração do método da renovação do ar na superfície em relação à covariância de turbilhões. Como mencionado anteriormente, a Figura 5A destaca um coeficiente de calibração α próximo de 1 antes da calibração, o que indica forte tendência de aquecimento e resfriamento uniforme da massa de ar

da superfície do solo até às alturas de medição da temperatura do ar com o termopar ultrafino, conforme destacado por Shapland et. al. (2012a, 2012b); Shapland et. al. (2013). A Figura 5B mostra o resultado da calibração com excelente concordância entre H_{CT} e H_{RAS} .

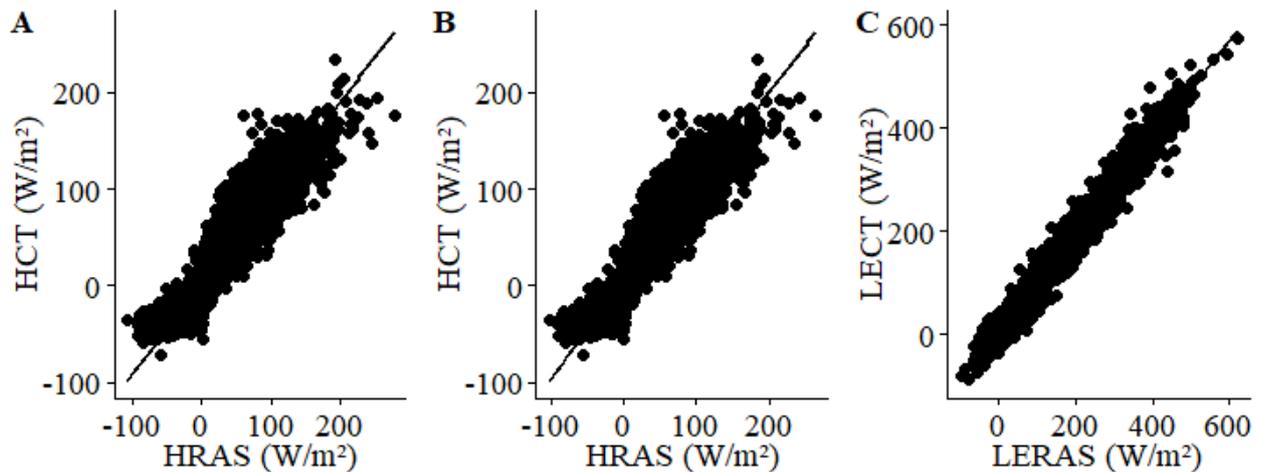


Figura 6. Processo de calibração do fluxo de calor sensível H' da análise de renovação de superfície sobre a mandioca sob condições de atmosfera estável e instável para todos os dados medidos. Antes da calibração (A e C) e após a calibração (B e D)

A correlação entre LECT e LERAS é alta ($R^2 > 0,95$) (Figura 5C) como era esperado na medida em que a concordância entre H_{CT} e H_{RAS} também foi alta e tanto LE_{CT} e LE_{RAS} são calculados a partir do mesmo conjunto de valores de R_n e G . Os dados sugerem que um coeficiente de calibração único e igual a 0,96 pode ser usado para condições de cultivo e clima semelhantes as apresentadas nesse trabalho, com fito de estimativa do fluxo de calor sensível (H_{RAS}) em outros anos de plantio desde que as condições sejam aproximadamente as mesmas, ou seja, a mesma variedade é cultivada no mesmo espaçamento conduzida sob regime de sequeiro.

Acresce que sendo muito próximo de 1 o valor encontrado para o coeficiente de calibração α , existe a possibilidade de se utilizar o método da renovação do ar na superfície com esta cultura e nas condições acima mencionadas sem a necessidade de calibração, o que a princípio seria suficiente um termopar ultrafino instalado em torno de 50 cm acima da cultura para coleta de dados de temperatura do ar e aplicação direta do método da renovação do ar para determinação de H .

3.3 Componentes do balanço de energia

As variações diurnas desses componentes para os meses de maio e junho estão representadas na Figura 7. Para os meses em estudo, os valores máximos de LE foram observados nos dias 03/05/2019 e 16/06/2019, respectivamente na ordem de 460,56 e 332,45 $W m^{-2}$. A partir dos dados de radiação solar global, foram identificados dias (13/05 e 17/06) distintos aos anteriormente citados, estes apresentam alta nebulosidade, cujo valores de LE representam os menores para o período, 180,34 e 65,23 $W m^{-2}$. Para os dias 13/05/2019 e 17/06/2019, os fluxos de calor sensível praticamente se equivalem ao fluxo de calor no solo, o que indica que havia pouca energia disponível para aquecer o ar e o solo, e que 90% de R_n foi utilizado para os processos de perda de água para a atmosfera, o que está de acordo com Jensen e Allen, (2016) e Gao et. al. (2020).

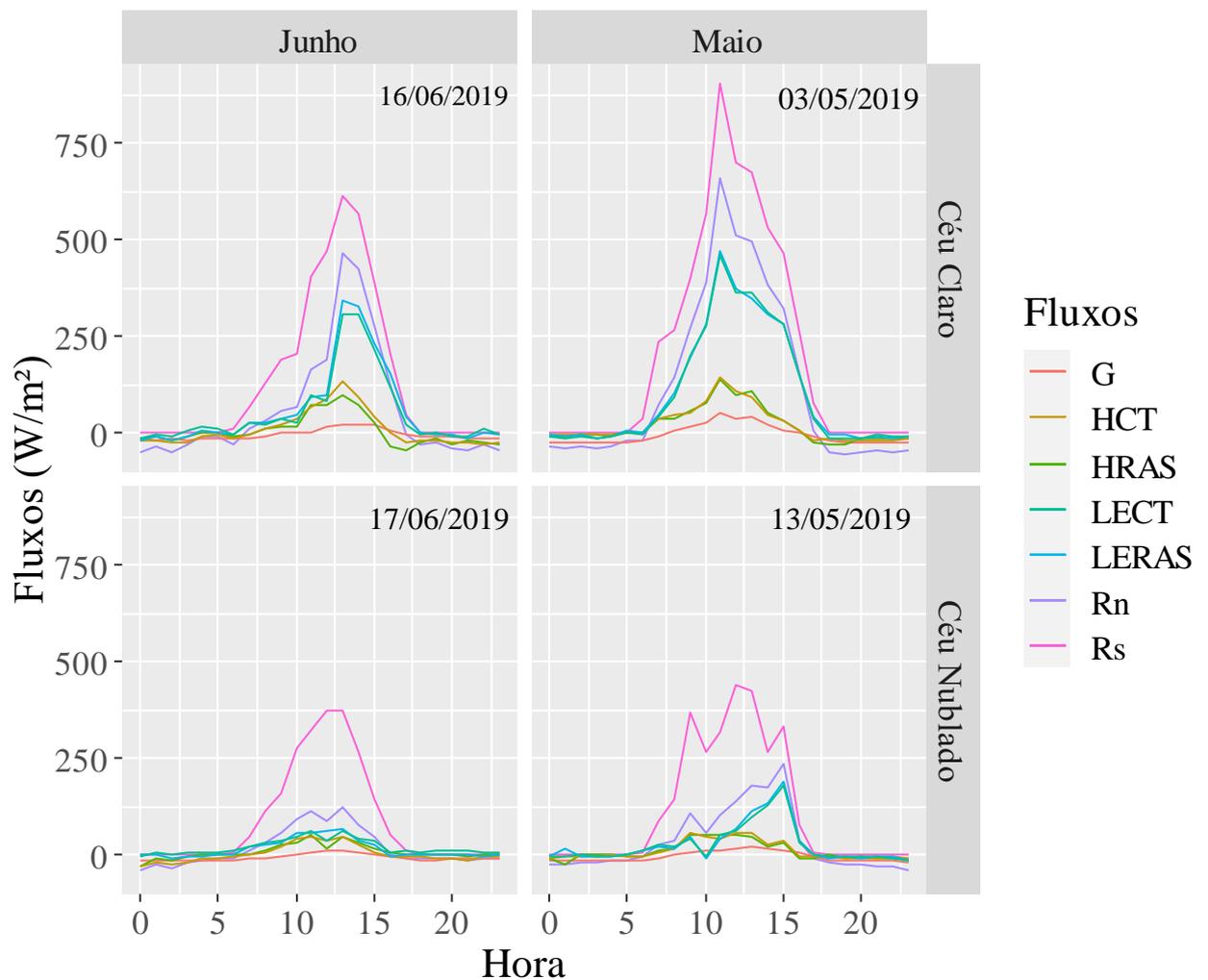


Figura 7. Partição horária dos componentes do balanço para dias distintos nos meses de maio e junho em diferentes condições de nebulosidade

Para ambas as datas 03/05/2019 e 16/06/2019 observadas na Figura 7, média diária de G foi negativa, logo, todo o calor foi liberado para o solo. A situação oposta ocorreu nas datas de 13/05 e 17/05 em que maior porção de R_s não foi convertida em LE , que representou cerca de 17,45% e 14,34%, correspondendo a uma (EF) Fração Evaporativa, $EF = LE/(R-G)$ em torno de 56,72% e 51,95%, respectivamente. Para as datas de 03/05/2019 e 16/06/2019 a maior energia disponível resultou em fração evaporativa 79,64% e 69,22% respectivamente.

A Figura 8 mostra a relação entre componentes do balanço de radiação/energia na cultura da mandioca industrial a partir de médias horárias do período de coleta de dados na área experimental

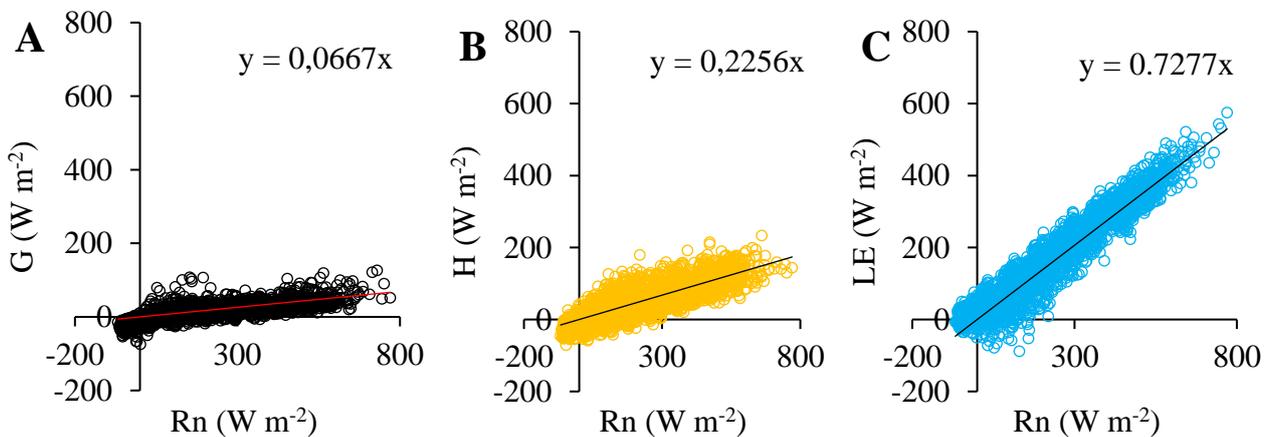


Figura 8. Relação entre radiação líquida (R_n) e os componentes do balanço de energia (G , H e LE)

A Figura 8B mostra a relação entre o fluxo de calor no solo (G) e a radiação líquida (R_n). Durante todo o período de coleta de dados, que coincidiu com a fase vegetativa da cultura da mandioca, o grau de cobertura do solo foi significativo visualmente, especialmente porque as medições começaram quando as plantas apresentavam altura média de 60 cm e predominância de dias nublados. O valor médio encontrado para a relação G/R_n foi de apenas 6%, o que se explica não somente pela cobertura do solo pela cultura, mas também pela proliferação de ervas daninhas tendo em vista que a cultura foi conduzida sob regime de chuva. Além da alteração do conteúdo de água no solo, o tipo da cobertura é um fator responsável pelas variações do fluxo de calor no solo.

A Figura 8C mostra a relação entre o fluxo de calor sensível obtido via renovação do ar na superfície H_{RAS} e a radiação líquida R_n . A relação média H/R_n com esse método foi em torno de 22%, indicando que a maior parte da energia disponível deve ter sido utilizada para evaporação da água, cuja relação LE/R_n foi em torno de 72%, tendo em vista que a cultura foi conduzida sob regime de chuva. O período de março a setembro é o mais chuvoso na região com mais 70% da precipitação anual concentrada nesses meses. Dados de chuva não foram coletados durante o período experimental.

Do ponto de vista de partição da energia disponível para os fluxos de calor sensível, os valores aqui apresentados são coerentes com aqueles encontrados por Lima et al. (2011) em trabalho realizado com feijão em condição de sequeiro. A relação H/R_n encontrada pelos autores variou entre 0,23 e 0,34. Em trabalho que envolvia diferentes tipos de cobertura e associados ao cultivo da mandioca, Attarod et al. (2005) fazendo uso da Razão de Bowen verificaram que no fechamento do balanço de energia a relação LE/R_n foi de 0,72 em período com alta disponibilidade hídrica e 0,54 nos períodos de baixa disponibilidade hídrica.

De acordo com Zhou et al. (2012) essa relação alta de LE/R_n é esperada pois sem restrição hídrica e com IAF alto (fase atual da cultura, 150 DAP) há um aumento da transpiração, contribuindo então para valores LE/R_n mais altos e vice-versa.

Em uma área de algodão irrigado Bezzera et. al. (2015) trabalhando em período de alta disponibilidade hídrica, verificaram que a razão LE/R_n foi de 0,70, com os valores mais elevados ocorrendo quando o solo se encontrava mais úmido. Nesse mesmo trabalho os autores que verificaram que por dois anos consecutivos (2008 e 2009) as relações G/R_n foram de 10% e para H/R_n 17% em 2008 e 16% em 2009. Gao et. al. (2020) realizaram uma comparação de evapotranspiração e partição de energia relacionado aos principais controladores bióticos e abióticos em vinhedos usando diferentes métodos de irrigação. Os autores verificaram que a relação LE/R_n foi de 0,75, H/R_n 0,13 e G/R_n igual a 0,12.

Valores próximos, para outra cultura, a do feijão, foram relatados por Lima et al. (2005), cuja razão LE/R_n foi de 0,71. Ao passo que Neves et al. (2008), em condição oposta de disponibilidade hídrica, ao quantificar os componentes do balanço de energia em feijão caupi encontraram valores médios de LE/R_n igual a 0,21, devido, principalmente, à baixa disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussão acima e conforme os objetivos estabelecidos para esse capítulo pode-se concluir que:

a) O método da renovação do ar na superfície (RAS) usando-se a covariância de turbilhões (CT) como referência mostrou-se adequado para estimativa do fluxo de calor sensível (H) na área cultivada com mandioca industrial, com coeficiente de calibração igual a 0,96 para todos os 100 dias de medições;

b) Sob condições de estabilidade atmosférica instável (período diurno) o método da RAS apresentou melhor desempenho para estimativa de H comparado a condições estáveis da atmosfera (período noturno);

c) O método da RAS mostrou-se adequado para estimativa do fluxo de calor latente (LE), tendo a covariância de turbilhões como referência, em cultivo de mandioca industrial com alto grau de correlação ($R^2 > 0,90$);

d) Na área cultivada com mandioca industrial, verificou-se que o fluxo de calor no solo (G) correspondeu em média a 6% do saldo de radiação. No caso dos fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (LE), os percentuais foram em média 22% e 72%, respectivamente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ATTAROD P., KOMORI D., HAYASHI K., AOKI M., ISHIDA T., FUKUMURA K., BOONYAWAT S., POLSAN P., TONGDEENOK P., SOMBOON P., PUNKNGUM S. Comparison of the evapotranspiration among a paddy field, cassava plantation and teak plantation in Thailand. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 60, p. 789–792. 2005.

BEZERRA, BERGSON GUEDES et al. Surface energy exchange and evapotranspiration from cotton crop under full irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State, Brazilian Semi-Arid. **Bragantia** [online]. 2015, v. 74, n. 1 [Accessed 12 September 2021] , pp. 120-128. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1678-4499.0245>>.

BONAN, G. **Ecological climatology: concepts and applications**. 3rd ed. New York: Cambridge University Press. 2016. 740 p.

CASTELLVÍ, F.; CONSOLI, S.; PAPA, R. Sensible heat flux estimates using two different methods based on surface renewal analysis. A study case over an orange orchard in Sicily, **Agricultural and Forest Meteorology**, v 152, p. 58-64, 2012

COELHO FILHO, M.A. **Irrigação da cultura da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa. (Comunicado Técnico 172). 2020. 12 p.

EMBRAPA. **Mandioca em números**. (<https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>) Accessed on 12/22/2020.

GAO, L., ZHAO, P., KANG, S., LI, S., TONG, L., DING, R., LU, H. Comparison of evapotranspiration and energy partitioning related to main biotic and abiotic controllers in vineyards using different irrigation methods. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 2020, 7(4): 490–504 <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019310>.

HATFIELD, J.L.; BAKER, J.M. **Micrometeorology in agricultural systems**. ASA Monograph No. 47. Madison, WI: ASA-CSSA-SSA. 2005. 583p.

HOLWERDA, F., GUERRERO-MEDINA, O., MEESTERS, A. G.C.A. Evaluating surface renewal models for estimating sensible heat flux above and within a coffee agroforestry system. **Agricultural and Forest Meteorology**, Volumes 308–309, 2021.

HU, Y., BUTTAR, N. A., TANNY, J., SNYDER, R. L., SAVAGE, M. J., LAKHIAR, I. A. Surface Renewal Application for Estimating Evapotranspiration: **A Review Advances in Meteorology**, 11p, 2018.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineers, 2^a ed., 2016, 744 p.

KLJUN, N., CALANCA, P., ROTACH, M. W., AND SCHMID, H. P.: A simple twodimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP), **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 3695–3713, 2015.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

LIMA, J. R. S.; ANTONIO, A. C. D.; SOARES, W. A.; BORGES, E.; SILVA, I. F.; LIRA, C. A. B. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 09, n. 04, p. 527-534, 2005.

MCELDRONE, A. J., SHAPLAND, T. M., CALDERON, A., FITZMAURICE, L., PAW U, K. T., SNYDER, R. L. Surface Renewal: An Advanced Micrometeorological Method for Measuring and Processing Field-Scale Energy Flux Density Data. **J Vis Exp**. 2013.

McELDRONE, A.J.; SHAPLAND, T.M.; CALDERON, A.; FITZMAURICE, L.; PAW U, K.T.; SNYDER, R.L. Surface renewal: and advanced micrometeorological method for measuring and processing field-scale energy flux density data. **Journal of Visualized Experiments**. (82), e50666, doi: 10.3791/50666 (2013).

MEKHMANDAROV, Y., PIRKNER, M., DICKEN, U., TANNY, J., Examination of the surface renewal technique for sensible heat flux estimates in screenhouses. **Acta horticulturae**, 923-929, 2012.

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

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

MORÁN, A.; FERREYRA, R.; SELLÉS, G.; SALGADO, E. CÁCERES-MELLA, A.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C. Calibration of the surface renewal method (SR) under

different meteorological conditions in an avocado orchard. **Agronomy**, v. 10, 730. doi:10.3390/agronomy10050730, 2020.

NEVES, L. O. et al. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 01, p. 21-30, 2008.

PARRY, C. K.; SHAPLAND, T. M.; WILLIAMS, L. E.; CALDERON-ORELLANA, A. SNYDER, R. L.; PAW U, K. T.; McELRONE, A. J. Comparison of a stand-alone surface renewal method to weighing lysimetry and eddy covariance for determining vineyard evapotranspiration and vine water stress. **Irrigation Science**, v. 37, p. 737-749, 2019.

PARRY, C.K., SHAPLAND, T.M., WILLIAMS, L.E. et al. Comparison of a stand-alone surface renewal method to weighing lysimetry and eddy covariance for determining vineyard evapotranspiration and vine water stress. **Irrig Sci** 37, 737–749, 2019.

PAW U, K.T., SNYDER, R.L., SPANO, D., SU, H.B. Surface renewal estimates of scalar exchange. In: Hatfield, J.L., Baker, J.M. (Eds), *Micrometeorology in Agricultural Systems*. **Agronomy Monograph** no. 47. Amer. Soc. Agron., Madison. pp.455-483., 2005.

PAW U, K.T.; BRUNET, Y. A surface renewal measure of sensible heat flux density. In: Preprints, 20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 10-13 September, Salt Lake City, Utah, **American Meteorological Society**, Boston, MA, pp. 52-53., 1991.

PAW U., K.T.; QIU, J.; SU, H.B.; WATANABE, T.; BRUNET, Y. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 74, p. 119-137, 1995.

POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; SEPÚLVEDA-REYES, D.; ORTEGA-FARÍAS, S. Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages. **Agricultural Water Management**, v. 141, p. 74-83, 2014.

POZNÍKOVÁ, G.; FISCHER, M.; VAN KESTEREN, B.; ORSÁG, M.; HLAVINKA, P.; ŽALUD, A.; TRNKA, M. Quantifying turbulent energy fluxes and evapotranspiration in agricultural field conditions: a comparison of micrometeorological methods. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 249-263, 2018.

ROSA, R.; DICKEN, U.; TANNY, J. Estimating evapotranspiration from processing tomatoes using the surface renewal technique. **Biosystems Engineering**, v. 114, p. 406-413, 2013.

ROSA, R.; TANNY, J. Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. **Biosystems Engineering**, v. 136, p. 149–161, 2015.

SHAPLAND, T. M.; McElrone, A. J.; Paw U, K. T.; SNYDER, R. L. A turnkey data logger program for field-scale energy flux density measurements using eddy covariance and surface renewal. **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 18, p. 5-16, 2013.

SHAPLAND, T. M.; SNYDER, R. L.; SMART, D. R.; WILLIAMS, L. E. Estimation of actual evapotranspiration in winegrape vineyards located on hillside terrain using surface renewal analysis. **Irrigation Science**, v. 30, p. 471-484, 2012.

SHAPLAND, T.M.; McELRONE, A.J.; SNYDER, R.L.; PAW U, K.T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part I: Theory and modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, 2012a

SHAPLAND, T.M.; McELRONE, A.J.; SNYDER, R.L.; PAW U, K.T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part II: Ramp characteristics and surface renewal flux estimation. **Boundary-Layer Meteorology**, 2012b.

SHAW, R.H.; PATON, E. G.; FINNIGAN, J. J. Coherent eddy structures over plant canopies. In: VENDITTI, J. G. et al. (eds). **Coherent Flow Structures at Earth's Surface**. New York: John Wiley & Sons, 2013. 401p.

SNYDER, R.L., SPANO, D., PAW U, K.T. Surface renewal analysis for sensible heat and latent heat flux density. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 77, p. 249-266, 1996.

SUVOCAREV, K.; SHAPLAND, T.M.; SNYDER, R. L., MARTÍNEZ-COB, A. Surface renewal performance to independently estimate sensible and latent heat fluxes in heterogeneous crop surfaces. **Journal of Hydrology** 509 (2014) 83–93, 2014.

VAN ATTA, C.W. Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. **Archives of Mechanics**, v. 29, p. 161-171, 1977.

XUE, J.; BALI, K. M.; LIGHT, S. HESSELS, T., KISEKKA, I. Evaluation of remote sensing based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. **Agricultural Water Management**, v. 238, 106228. 2020

ZERI, M.; ABREU SÁ, L. D.; NOBRE, C. A. Estimating buoyancy heat flux using the surface renewal technique over four Amazonian Forest sites in Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 149, p. 179-196, 2013.

ZHOU, S., WANG, J., LIU, J., YANG, J., XU, Y., LI, J. Evapotranspiration of a drip-irrigated film-mulched cotton field in northern Xinjiang, China. **Hydrological Processes**, 26, 1169-1178, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8208>.

CAPÍTULO II

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE UM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL VIA MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS E SENSORIAMENTO REMOTO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE UM CULTIVO DE MANDIOCA INDUSTRIAL VIA MÉTODOS MICROMETEOROLÓGICOS E SENSORIAMENTO REMOTO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Autor: Neilon Duarte da Silva

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

RESUMO

O reduzido número de informações da superfície disponíveis para estimativas confiáveis da Evapotranspiração (ET) tem servido como impulso para apresentação de novas metodologias e soluções para estudos de demanda hídrica de superfícies (hídricas ou agricultáveis). Outrossim, tais estimativas têm ganhado aplicações em diversos setores, além de incluir técnicas advindas de outras áreas da ciência. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo realizar estimativas da evapotranspiração a partir de três métodos: sensoriamento remoto, método de renovação do ar (RAS) e covariância de turbilhões (CT), em uma análise comparativa estimativa da ET por sensoriamento remoto via METRIC e SAFER, com fito de propor uma alternativa que demande um número reduzido de informações da superfície. O trabalho de campo foi conduzido na Fazenda Novo Horizonte (13°6'39" S, 39°16'46" W, 154 m anm) no município de Laje, Bahia, Brasil. Em termos quantitativos o total da ET de um cultivo de mandioca industrial em sequeiro, nas condições do recôncavo baiano, foi em média de 160,01 mm na fase de formação dos tubérculos. O método RAS tem potencial, depois de calibrado, para estimar a ET de uma área de mandioca cultivada em sequeiro nas condições climáticas do recôncavo baiano. A partir de medidas da superfície, técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para a avaliação e quantificação espacial da ET. A simplificação da ET apresentou resultados coerentes e por se tratar de uma metodologia que faz uso de um número reduzido de variáveis, pode assim ser aplicada com processos de coleta de dados com maior resolução temporal e espacial, a exemplo do uso de drones.

Palavras-chave: Método de renovação do ar, cassava, fluxo de calor latente

EVAPOTRANSPIRATION OF A PROCESSING CASSAVA CROP WITH MICROMETEOROLOGICAL METHODS AND REMOTE SENSING: A COMPARATIVE ANALYSIS

Autor: Neilon Duarte da Silva

Advisor: Aureo Silva de Oliveira

ABSTRACT

The reduced amount of surface information available for reference to evapotranspiration (ET) has served as an impetus to present new methodologies and solutions for studies of water demand on surfaces (water or agricultural). Furthermore, such responsibilities have gained applications in various sectors, in addition to including techniques from other areas of science. In this context, this work aimed to carry out evapotranspiration using three methods: remote sensing, air renewal method (RAS) and eddy covariance (CT), in a comparative analysis of ET estimation by remote sensing via METRIC and SAFER, with the aim of proposing an alternative that requires a reduced amount of surface information. Fieldwork was conducted at Fazenda Novo Horizonte (13° 6'39"S, 39°16'46"W, 154 m) in the municipality of Laje, Bahia, Brazil. In quantitative terms, the total ET of an industrial cassava crop in rainfed, under the conditions of the Bahia Reconcavo, was on average 160.01 mm in the tuber formation phase. The RAS method has the potential, after being calibrated, to estimate the ET of an area of cassava cultivated in rainfed under the climatic conditions of the Bahia Recôncavo. From surface measurements, remote sensing techniques can be used for the spatial evaluation and quantification of TE. The simplification of ET presents coherent results and because it is a methodology that makes use of a reduced number of variables, it can thus be applied with data collection processes with greater temporal and spatial resolution, an example of the use of drones.

Keyword: Surface renewal method, cassava, latent flux.

1. INTRODUÇÃO

A área plantada com mandioca no Brasil em 2017 fora de 1,4 milhão de hectares com produtividade média variando de 9,8 a 21,9 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2018) e média nacional em torno de 15 t ha⁻¹. A mandioca é tipicamente cultivada sob regime de chuva, mas quando irrigada pode render duas vezes mais (COELHO FILHO, 2020).

Dados meteorológicos de qualidade são imprescindíveis para estimativas confiáveis da Evapotranspiração, que em áreas agrícolas representa a variável chave para quantificação do consumo hídrico das culturas. Para contornar esse problema, deficiência ou má qualidade dos dados, se faz necessário o uso de tecnologias que permitam contornar esse problema.

Sobre informações agrometeorológicas de qualidade, frisa-se que a Evapotranspiração (ET) talvez seja o fluxo hidrológico relativamente complexo de estimar ou modelar, especialmente em escalas regionais ou locais. Abordagens tradicionais de estimativa de ET (como por exemplo, lisímetros de pesagem, razão de Bowen de balanço de energia, técnicas de covariância de turbilhões, fluxo de seiva, cintilômetria etc.) são baseadas principalmente em uma variedade de modelos complexos.

As estimativas ditas como “precisas” de ET em uma área homogênea podem ser feitas por essas técnicas convencionais. No entanto, tais medições não podem ser estendidas diretamente em grande escala devido à heterogeneidade natural da superfície da terra e complexidade dos processos hidrológicos e devido à necessidade de uma variedade de medições de superfície e parâmetros da superfície da terra (JENSEN; ALLEN, 2016).

O balanço de energia ($R_n = LE + H + G$) por exemplo, do ponto de vista matemático, quando objetivo é determinar o Fluxo de calor latente (LE), apresenta uma solução simples, tendo o componente H (Fluxo de calor sensível) também é considerado complexo em termos de medição ou estimativa. Para tanto, alguns métodos de estimativa do H são comumente utilizados, tal como covariância de vórtices turbulentos como apontam Perez-Priego et. (2017); Foltýnová et. al. (2020); Burba (2013); Cao et. al. (2018) e a renovação do ar na superfície (RAS) PAW U et al, (1995); Hu et. al. (2018); McElrone et. al. (2013); Parry et. al. (2019). O RAS uma técnica micrometeorológica concebida para estimativa de grandezas escalares na

atmosfera e tem sido muito utilizado na determinação do componente H do balanço de energia. O método foi inicialmente proposto por Paw U et al. (1995).

Diversas metodologias têm sido aplicadas para estimativa da ET via sensoriamento remoto, a exemplo do algoritmo SEBAL Bastiaanssen (2000), o METRIC é um modelo derivado das primeiras versões do SEBAL. Outros modelos como o S-SEBI conforme abordado por Kumar et. al. (2020); Danodia et. al. (2019); Borges et. a. (2021); e o modelo SEBS com resultados interessantes abordados por Ferreira et. al. (2016); Zhao et. al. (2019); Rwasoka, W. Gumindoga, J. Gwenzi, (2011); Ma, et. Al. (2013) podem ser citados como aqueles que tem como base a teoria da conservação da energia. Uma aproximação mais simples foi proposta por Teixeira et al. (2012) com o algoritmo SAFER, que se propõe solucionar o balanço utilizados dados de índices de vegetação e temperatura da superfície.

Nesse contexto, a partir de cultivo de mandioca industrial, o objetivo deste trabalho foi realizar estimativas da evapotranspiração por sensoriamento remoto, método de renovação do ar e covariância de turbilhões em uma análise comparativa, para propor uma alternativa que demande menos de dados de superfície.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento de campo

O trabalho de campo foi conduzido na Fazenda Novo Horizonte ($13^{\circ}06'39''\text{S}$, $39^{\circ}16'46''\text{W}$, 154 m anm) no município de Laje, Bahia, Brasil. A área total da fazenda é de aproximadamente 1000 ha e na época desta pesquisa (2019) era de propriedade da Bahiamido, uma agroindústria especializada no processamento de mandioca para produção de amido, com uma capacidade de processamento em torno de 150.000 toneladas de raízes por ano. O clima da região é de transição entre Af (tropical sem estação seca) e Am (tropical de monção) de acordo com o sistema de Köppen (Alvares et al., 2013). A temperatura média anual é em torno de 24°C e a umidade relativa 70%.

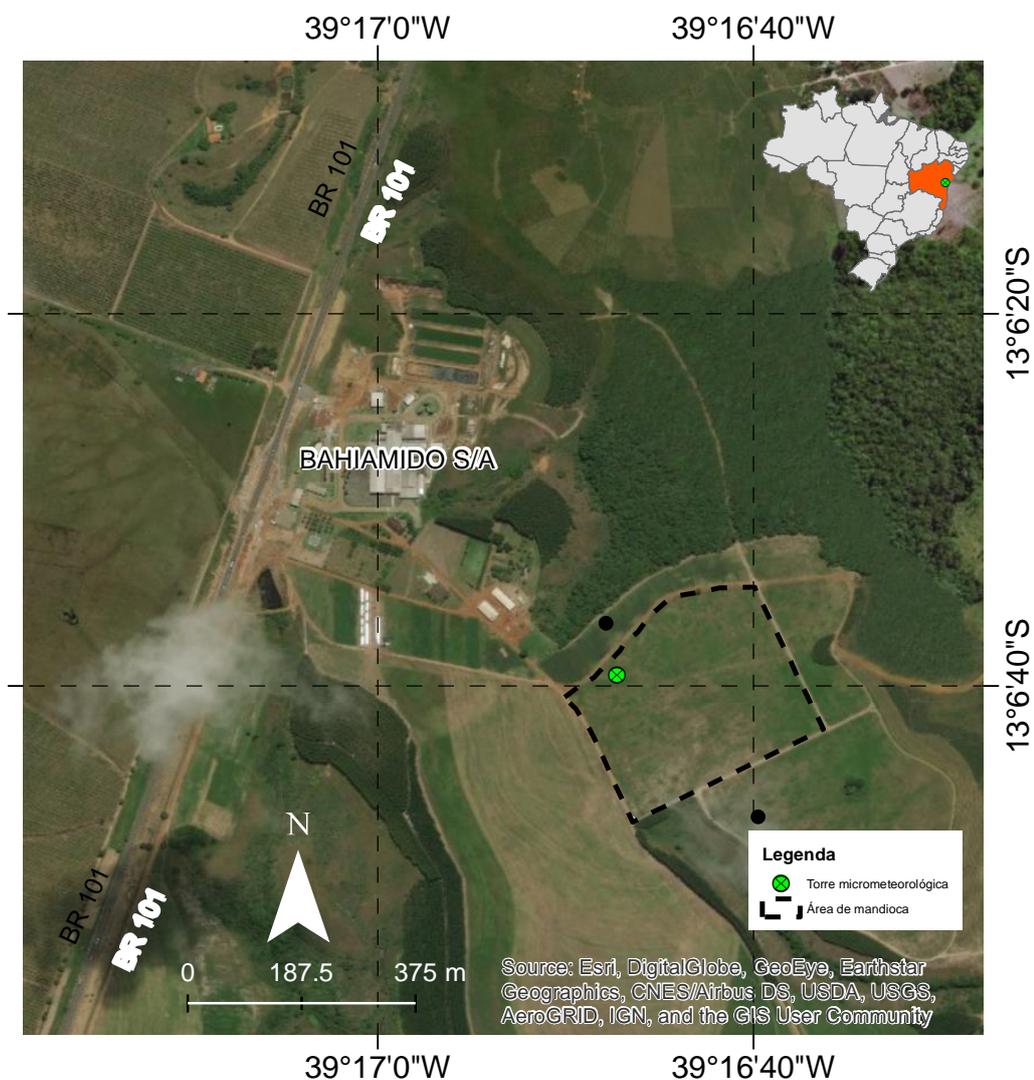


Figura 1. Área de estudo em área de cultivo de mandioca na fazenda da então (à época) empresa Bahiamido S.A

2.2 Plataforma micrometeorológica de coleta de dados

Sensores de resposta rápida e resposta lenta foram levados ao campo para coleta de dados estão listados na Tabela 1. Placa de fluxo de calor no solo, termopar de solo e medidor de umidade do solo são instrumentos enterrados e para estes a Tabela 1 mostra a profundidade de instalação. Para os demais, a mesma tabela mostra a altura a partir da superfície. O principal critério para escolha de um ponto no interior da área para posicionamento da torre foi garantir suficiente bordadura na direção contrária do vento (*upwind direction*). Considerou-se também como critério a facilidade de acesso à torre tendo em vista o crescimento das plantas que dificultaria a movimentação de pessoal.

Tabela 1. Instrumentos de resposta rápida e lenta instalados na parcela experimental

Instrumento	Modelo	Fabricante	Altura ou profundidade (cm)	Parâmetro medido
Resposta rápida				
Anemômetro sônico 3D	81000	RM Young	230 ^(a)	Vel. do vento e temperatura do sônico (u, v, w, Ts)
Termopar ultrafino	FW3 (76 µm)	Campbell Scientific	180 ^(b)	Temperatura do ar
Resposta lenta				
Saldo radiômetro	NRLite	Kipp & Zonen	270	Saldo de radiação
Piranômetro	SPLite	Kipp & Zonen	270	Radiação solar
Placa de fluxo de calor	HFP01	Hukseflux	8	Fluxo de calor no solo
Termopar de solo	TCAV	Campbell Scientific	2 e 6	Temperatura do solo
Medidor de umidade do solo	GS1	Decagon	4	Umidade do solo

(a), (b) Altura inicial; (c) Instalação em 01/07/2021

Conforme mostrado na Tabela 1, a altura inicial do anemômetro 3D foi 230 cm acima do solo e para o termopar ultrafino foi de 180 cm, ambos foram montados numa barra de tubo metálico apontando para o leste na direção predominante do vento (300 m de bordadura). Na barra os sensores foram alinhados verticalmente com o sônico posicionado a 50 cm acima do termopar. O código usado no datalogger foi adaptado de uma versão gentilmente cedida por Richard Snyder da Universidade da Califórnia

em Davis, USA. Descrição detalhada e resultados de teste do referido código podem ser encontrados em Shapland et al. (2013).

2.3 Determinação dos componentes do balanço de energia

2.3.1 Fluxo de calor sensível

A densidade de fluxo de calor sensível H ($W m^{-2}$) foi determinada por dois métodos: (1) renovação do ar na superfície (RAS) e (2) covariância de turbilhões (doravante designado por CT). O segundo foi usado como referência para calibração do primeiro. Aqui, esse procedimento é conhecido como método clássico da renovação do ar na superfície. Outras formas de se obter o coeficiente de calibração α é através de parâmetros físicos da atmosfera inferior, não necessitando, portanto, de um outro método de referência para calibração da RAS (CASTELLVÍ, 2004; SHAPLAND et al., 2012a, 2012b; SUVOCAREV et al., 2014).

$$H_{RAS} = \alpha \cdot H' = \alpha \cdot \left[\rho C_p \frac{A}{d + s} z \right] \quad (1)$$

onde: H_{RAS} é a densidade de fluxo de calor sensível após calibração ($W m^{-2}$); H' é a densidade de fluxo de calor sensível antes da calibração ($W m^{-2}$); α é o fator de calibração; ρ é a densidade do ar ($kg m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} °C^{-1}$); A é a amplitude da rampa ($°C$); $1 / (d + s)$ é a frequência da rampa (s^{-1}) e z é a altura de medição da temperatura (m).

Snyder et al. (1996) usaram momentos estatísticos e a função de estrutura de Van Atta (1977) (Equação 2) para calcular as características A e $(d + s)$ da rampa média, como se segue:

Com os valores de A e $(d + s)$, valores médios de 30 minutos de H' são calculados dentro do programa do dataloguer de acordo com a Equação 1. Um valor igual 1 para o coeficiente de calibração α é assumido inicialmente, de maneira que a necessidade de calibração pode ser posteriormente avaliada.

No segundo método, o fluxo de calor sensível H foi obtido usando a técnica da covariância de turbilhões de acordo com a Equação 2.

$$H_{CT} = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

onde: H_{CT} é a densidade de fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$) via covariância de turbilhões; ρ é a densidade do ar ($kg\ m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$); w' é o desvio instantâneo da velocidade vertical do vento em torno da média ($m\ s^{-1}$); e T' é o desvio instantâneo da temperatura do anemômetro sônico em torno da média ($^\circ C$). H_{CT} também foi integrado como média de intervalos de 30-min para assim ficar compatível com o mesmo intervalo de integração de H' .

Como previamente mencionado, a covariância de turbilhões foi usada para calibração do método da renovação do ar na superfície, constituindo este o procedimento clássico, e o coeficiente de calibração α foi obtido como a inclinação de uma regressão linear através da origem em que H_{CT} (eixo Y) foi plotado em função de H' (eixo X) (SPANNO et al., 2000; SNYDER et al., 2008; SHAPLAND et al., 2012). Após obtenção de α , o fluxo de calor sensível calibrado H_{RAS} é calculado de acordo com a Equação 1, ou seja, $H_{RAS} = \alpha \cdot H'$.

2.3.2 Radiação líquida e fluxo de calor no solo

Como mostrado na Tabela 1, a radiação líquida R_n ao nível da vegetação foi medida com um saldo radiômetro posicionado a 270 cm acima do solo e montado em um braço metálico apontando para o norte geográfico.

Duas placas de fluxo de calor foram usadas para medição do fluxo de calor a 8 cm de profundidade e a 200 cm de distância do tripé da torre. Uma das placas foi instalada entre plantas na fileira e a outra entre fileiras para melhor representatividade das medições. A variação da temperatura do solo acima de cada placa foi monitorada com termopares de solo inseridos a 2 e 6 cm de profundidade enquanto a umidade do solo dentro da camada superficial foi medida com um sensor FDR conforme descrito na Tabela 1.

O fluxo de calor na superfície do solo foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$G = G_8 + C_s \left(\frac{T_{s(i)} - T_{s(i-1)}}{\Delta t} \right) z_s \quad (3)$$

onde: G é o fluxo de calor no solo na superfície ($W\ m^{-2}$); G_8 é o fluxo de calor no solo medido a 8 cm de profundidade; $T_{s(i)}$ e $T_{s(i-1)}$ são as temperaturas médias do solo acima

da placa no início e final do intervalo de tempo Δt , respectivamente; Δt é o intervalo de tempo (1800 s); z_s é profundidade de instalação da placa de fluxo de calor (m); e C_s é a capacidade calórica do solo ($J m^{-3} ^\circ C^{-1}$) calculada com a Equação 4 assumindo-se para a área experimental um solo mineral com densidade de partícula de $2,65 Mg m^{-3}$ e conteúdo desprezível de matéria orgânica.

$$C_s = 2.01 * 10^6 \rho_s / 2.65 + 4.19 * 10^6 \theta \quad (4)$$

onde: ρ_s é a densidade do solo ($1,30 Mg m^{-3}$) e θ é a umidade do solo ($m^3 m^{-3}$).

2.3.3 Fluxo de calor latente

A densidade de fluxo de calor latente foi obtida como resíduo do balanço de energia (Equação 5).

$$LE = R_n - G - H \quad (5)$$

onde: LE é a densidade de fluxo de calor latente ($W m^{-2}$) oriunda da vegetação; R_n é o saldo de radiação total ($W m^{-2}$); G é a densidade de fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); e H é a densidade de fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$). Desde que medições de H com a renovação do ar e a covariância de turbilhões foram obtidas independentemente, o balanço de energia pôde ser resolvido para ambos os métodos de forma a se obter, respectivamente, LE_{RAS} e LE_{CT} .

Na Equação 5, R_n é um número positivo quando o fluxo líquido é orientado para baixo, o que significa que energia é adicionada à superfície, LE e H são números positivos quando o fluxo é orientado para cima (energia adicionada ao ar) e G é um número positivo quando o fluxo é orientado para baixo (energia adicionada ao solo) (SNYDER et al., 2008).

2.4 Evapotranspiração de Referência

A demanda hídrica de culturas agrícolas é comumente determinada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e um coeficiente de cultivo (K_c) representativo da espécie cultivada (ALLEN et al., 1998).

Neste estudo foi utilizado o programa computacional REF-ET v. 4.1 (ALLEN et al., 2015) para cálculo da ET_o diária via modelo Penman–Monteith padronizado pela FAO 56 (PM56). O PM56 tem sido recomendado (JENSEN; ALLEN, 1990; 2016) como o método que melhor simula a transferência de água na forma de vapor a partir de uma extensa superfície de grama de porte baixo, cobrindo totalmente o solo e com adequado suprimento de água. O modelo PM56 é dado pela Equação 6.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_a + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (6)$$

onde: ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n – Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G – Fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), sendo $G=0$ em um período de 24h; Δ – Declinação da curva de saturação do vapor da água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); u_2 – Velocidade do vento à 2m de altura (m s^{-1}); T_a – Temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); e_s – Pressão de saturação do vapor d'água na atmosfera (kPa); e_a – Pressão atual do vapor d'água na atmosfera (kPa); γ – Constante psicométrica (MJ kg^{-1}).

Por não dispor de um termo-higrômetro na torre micrometeorológica (Tabela 1), foram utilizados dados de umidade relativa do ar (UR) de uma estação meteorológica de Valença ($13^\circ 20' 24''\text{S}$, $39^\circ 07' 48''\text{W}$, 93,12m anm), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 30km de distância.

2.5 Coeficiente de cultivo (K_c)

A determinação do K_c pelo método de covariância de turbilhões e Surface Renewal nos diferentes estádios fenológicos da mandioca consistirá por meio do quociente entre a ET e a ET_o , a qual baseia-se na definição fundamental do coeficiente de cultura, como representado na Equação 7.

$$K_c = \frac{ET}{ET_o} \quad (7)$$

onde: ET – Evapotranspiração de um cultivo de mandioca industrial (mm dia^{-1}); ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

2.6 Sensoriamento remoto da evapotranspiração

Para a estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto foram utilizadas imagens dos satélites Landsat-7, Landsat-8 e CBERS-4A. Especificamente para os satélites da série Landsat será aplicado o algoritmo METRIC, haja vista que esta dispõe da banda termal, necessária e indispensável para aplicação do método.

Para a parametrização do algoritmo SAFER além dos satélites Landsat-7 e Landsat-8, foram ainda usados dados do satélite CBERS-4A referente as bandas do Vermelho e do Infravermelho próximo, necessárias para a obtenção do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), de forma, a aumentar a resolução temporal da estimativa da evapotranspiração.

Tabela 2. Características das imagens do satélite Landsat-7

Banda	Faixa espectral	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
1	Azul	0,45 – 0,52	30
2	Verde	0,52 – 0,60	30
3	Vermelho	0,63 – 0,69	30
4	Infravermelho próximo	0,76 – 0,90	30
5	Infravermelho médio	1,55 – 1,75	30
6	Banda termal	10,40 – 12,50	60
7	Infravermelho médio	2,08 – 2,35	30

Tabela 3. Características das imagens do satélite Landsat-8

Banda	Faixa espectral	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
1	Aerosol	0,43 – 0,45	30
2	Azul	0,45 – 0,51	30
3	Verde	0,53 – 0,59	30
4	Vermelho	0,64 – 0,67	30
5	Infravermelho próximo	0,85 – 0,88	30
6	Infravermelho médio	1,57 – 1,65	30
7	Infravermelho médio	2,11 – 2,29	30
8	Pancromática	0,50 – 0,68	15
9	Cirrus	1,36 – 1,38	30
10	Banda termal 1	10,60 – 11,19	30
11	Banda termal 2	11,50 – 12,51	30

Tabela 4. Características das imagens do satélite CBERS-4A

Banda	Faixa espectral	Sensor	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
1	Azul	WPM	0,45 – 0,52	8
2	Verde		0,52 – 0,59	8
3	Vermelho		0,63 – 0,69	8
4	Infravermelho próximo		0,77 – 0,89	8
P	Pancromática		0,45 – 0,90	2
5	Azul	MUX	0,45 – 0,52	16,5
6	Verde		0,52 – 0,59	16,5
7	Vermelho		0,63 – 0,69	16,5
8	Infravermelho próximo		0,77 – 0,89	16,5

Tabela 5. Datas e fontes das imagens de satélite utilizadas

Data	Satélites		
	<i>Landsat-7</i>	<i>Landsat-8</i>	<i>CBERS-4A</i>
2019-05-08	X		X
2019-05-24		X	
2019-05-31			X
2019-06-03			X
2019-06-09		X	
2019-06-25		X	
2019-06-26			X
2019-06-29			X

As imagens utilizadas correspondem órbita e ponto 216/69 Figura 2

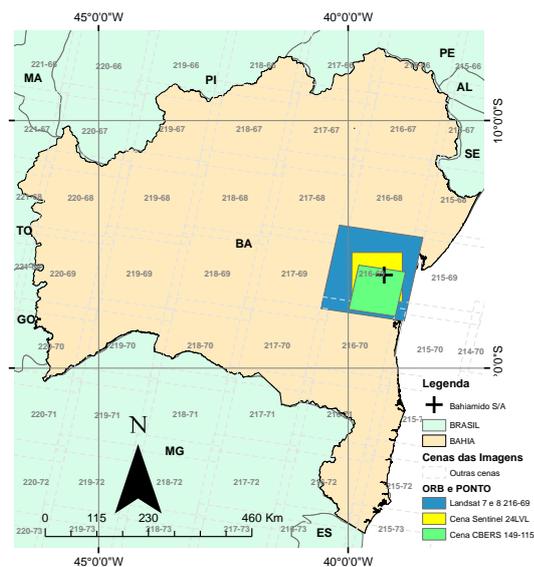


Figura 2. Localização experimento e cobertura das cenas Landsat para o estado da Bahia

2.6.1 Sensoriamento remoto da evapotranspiração via algoritmo METRIC

O METRIC (ALLEN et al., 2010) é um modelo derivado da primeira versão do SEBAL, calibrado inicialmente para as condições do oeste dos Estados Unidos (TASUMI, 2003), e depois usado nas mais diversas condições de clima, com forte aplicação para agricultura irrigada. É uma ferramenta baseada no processamento digital de imagens de satélite para estimativa da ET como resíduo do balanço de energia à superfície. O METRIC determina, portanto, a ET atual da superfície imageada no instante da passagem do satélite. Através de procedimentos apropriados de interpolação, a ET instantânea é integrada para períodos maiores (diários e mensais), gerando a ET estacional, durante o período de cultivo.

A ET instantânea é determinada através de uma série de cálculos que estimam a radiação líquida (R_n), o fluxo de calor no solo (G), e o fluxo de calor sensível no ar (H) pixel-a-pixel. Ao subtrair G e H de R_n à superfície evaporante, um fluxo de energia “residual” que representa a energia consumida pela ET é então estimado (Equação 5) (ALLEN et al., 2010).

O saldo de radiação no modelo METRIC para cada pixel pode ser obtida a partir da Equação 8:

$$R_n = (1-\alpha)R_g - R_{atm} - R_{sup} - (1 - \varepsilon_0)R_{atm} \quad (8)$$

onde: ε_0 é a emissividade da atmosfera (adimensional);

O albedo, α (Equação 9) foi calculado a partir dos dados de refletividade para as bandas 1 a 5 e 7, no modelo proposto por Tasumi et al. (2008):

$$\alpha = 0,254\rho_1 + 0,149\rho_2 + 0,147\rho_3 + 0,311\rho_4 + 0,103\rho_5 + 0,036\rho_7 \quad (9)$$

R_g foi estimado utilizando o modelo descrito por Allen et al. (2007a, 2007b), a partir do tempo, dias juliano, localização, declive do terreno e aspecto, assumindo que as condições de céu claro como o céu limpo é um pré-requisito para a imagem de satélite ser utilizado (ALLEN et al., 2011). Para obter a radiação emitida pela atmosfera foi utilizado a Equação 10:

$$R_{atm} = \varepsilon_0 \sigma T_{ar} \quad (10)$$

onde: σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$) e a T_{ar} é a temperatura do ar (K).

A emissividade da atmosfera foi obtida a partir da Equação 11:

$$\varepsilon_0 = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (11)$$

O fluxo de calor no solo (G) presente na Equação 12 e 13 foi determinada como uma fração de radiação líquida (ALLEN et al., 2007).

$$\text{Para } IAF \geq 0,5 \quad G = (0,05 + 0,18e^{-0,52IAF})R_n \quad (12)$$

$$\text{Para } IAF < 0,5 \quad G = 1,8(T_s - 273,15) + 0,084R_n \quad (13)$$

onde: IAF é o índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$).

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973) é obtido pela razão entre a diferença das refletividades das bandas do infravermelho próximo (ρ_{iv}) e do vermelho (ρ_v), conforme a Equação 14.

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (14)$$

onde: ρ_4 e ρ_3 correspondem, respectivamente, a reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo.

O fluxograma da Figura 3 compõe as etapas necessárias para a obtenção do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo.

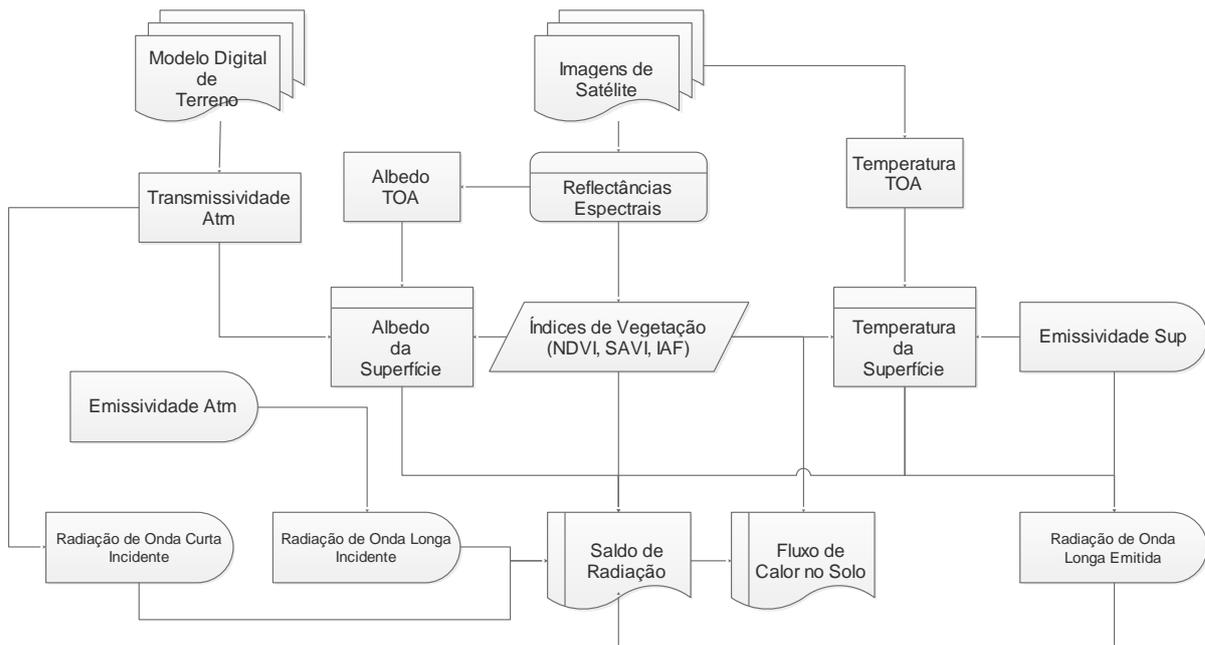


Figura 3. Fluxograma das etapas do Saldo de Radiação e Fluxo de Calor no Solo

Para cada pixel foi determinado o IAF a partir do índice SAVI (Equação 15):

$$IAF = \frac{-\ln \left[\frac{(0,69 - SAVI)}{0,59} \right]}{0,91} \quad (15)$$

onde: SAVI é o índice de vegetação ajustado ao solo.

O fluxo de calor sensível (H) obtém para cada pixel a partir da Equação 16:

$$H = \rho_{ar} C_p \frac{\Delta T}{r_{ah}} \quad (16)$$

onde: ρ_{ar} é a densidade do ar (kg m^{-3}); C_p é o calor específico a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); r_{ah} é o arrasto entre duas alturas perto da superfície (normalmente entre 0,1 e 2 m) calculado como uma função para cada pixel.

Para obter r_{ah} faz uma extrapolação da velocidade do vento para 200 m, em que a temperatura é independente de H com base na teoria Monin-Obukhov. ΔT é obtido a partir do modelo proposto Bastiaansen et al. (1998), como mostrado pela Equação 17.

$$\Delta T = b + aT_{s_{datum}} \quad (17)$$

onde: a e b são os coeficientes empíricos que se obtêm de forma empírica; $T_{s_{datum}}$ é a temperatura da superfície ajustada a uma altitude em comum, utilizando o modelo digital do terreno e um gradiente vertical de temperatura. Calcula-se a partir de T_s incorporando todos os efeitos de instabilidade do fator de rugosidade aerodinâmica r_{ah} .

A determinação empírica dos fatores que estabelecem a relação linear (Equação 17) é feita a partir da seleção de dois pixels de calibração.

Para o caso de pixel quente, deve ser escolhido dentro de uma imagem em que o pixel pode ser estabelecido após um balanço de água no solo que o valor de LE é zero. Estes pixels são tipicamente de solos sem vegetação com maior valor de temperatura, portanto, chamado de pixel quente. Para selecionar o pixel frio deve-se escolher uma superfície coberta com alto grau de cobertura e muito bom estado hídrico, de modo que possa ser considerada como tendo uma evapotranspiração 5% mais elevada do que a evapotranspiração referência, tendo a alfafa como uma cultura de referência ($LE_{frio}=1,05*ET_o$). Esse pixel marca geralmente as temperaturas mais baixas na imagem e é chamado de pixel frio. Portanto em ambos os pixels quente e frio deve-se cumprir a equação do balanço de energia respectivamente (Equações 18 e 19):

$$\text{Pixel quente} \quad H_{quente} = (R_n - G)_{quente} \quad (18)$$

$$\text{Pixel frio} \quad H_{frio} = (R_n - G)_{frio} - LE_{frio} \quad (19)$$

O fator ΔT , obtém-se aplicando o modelo METRIC (ALLEN et al., 2007a) sobre cada um dos pixels a partir da média dos pixels selecionados que representam uma área de 30x30m, assim ΔT_{quente} é representado pela Equação 20 e ΔT_{frio} pela Equação 21, respectivamente para cada data de passagem do satélite. Os detalhes para os cálculos podem ser observados no modelo METRIC (ALLEN et al., 2007b):

$$\Delta T_{quente} = \frac{(R_n - G)_{quente} r_{ah\ quente}}{\rho_{ar\ quente} C_p} \quad (20)$$

$$\Delta T_{frio} = \frac{(R_n - G - LE)_{frio} r_{ah\ frio}}{\rho_{ar\ frio} C_p} \quad (21)$$

Os coeficientes da Equação 17 são obtidos a partir da Equações 22 e 23:

$$a = \frac{\Delta T_{quente} - \Delta T_{frio}}{Ts_{quente} - Ts_{frio}} \quad (22)$$

$$b = \Delta T_{quente} - a Ts_{quente} \quad (23)$$

A evapotranspiração na hora da passagem do satélite ET instantânea (mm h⁻¹), calcula-se para cada pixel pelo quociente de LE (W m⁻²) pelo calor latente de vaporização, e depois multiplicado pelo fator 3600 (para converter de segundos em hora). A razão ET_{inst}/ET_{oinst} pode ser considerada constante, em relação ao instante exato dada passagem do satélite, sendo ET_{oinst}, a evapotranspiração de referência em escala horária (ALLEN et al. 2007). A partir disso, a evapotranspiração de cultivo determina-se a partir da Equação 24.

$$ET = \frac{ET_{inst}}{ET_{o\ inst}} ET_0 \quad (24)$$

2.6.2 Sensoriamento remoto evapotranspiração via algoritmo SAFER

O algoritmo simples para recuperação de evapotranspiração (SAFER), se propõe através dos seus autores como sendo uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos, baseia-se na modelagem da relação ET/ET₀ (TEIXEIRA et al., 2015a) e foi ajustado inicialmente para o noroeste São Paulo (HERNANDEZ et al., 2014) e calibrado para outras regiões (TEIXEIRA et al., 2015c).

A correção radiométrica das imagens, são realizadas de acordo com a metodologia de Teixeira et al. (2015b) e o albedo planetário no topo da atmosfera (α_{TOA}) foi obtido diretamente do serviço geológico americano enquanto o brilho a temperatura do sensor (T_{bri}) foi obtida através da metodologia de Teixeira et al. (2015b).

Os dados de α_{TOA} e T_{bri} foram corrigidos para obter os valores de albedo (α₀) e temperatura da superfície (K), segundo Teixeira et al. (2015b):

$$\alpha_0 = 0,61 \alpha_{TOA} + 0,08 \quad (25)$$

$$T_0 = 1,0 T_{bri} - 20,17 \quad (26)$$

O fluxo de calor no solo pode ser obtido em função da razão de G e R_n que está em função do albedo da superfície, assim como sugere Teixeira et al. (2015c), Equação 27.

$$\frac{G}{R_n} = 3,98 \exp(-31,89 \alpha_0) \quad (27)$$

A cálculo da evapotranspiração a partir do algoritmo SAFER pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$\left(\frac{ET}{ET_0}\right) = \exp\left[a + b \cdot \left(\frac{T_0}{\alpha_0 * NDVI}\right)\right] \quad (28)$$

Serão aplicados os valores 1,0 para o coeficiente “a” (HERNANDEZ et al., 2014; COAGUILA et al., 2017) e -0,008 para o coeficiente “b” (TEIXEIRA, 2010). Em seguida a relação (ET/ET₀) será multiplicada pela ET₀ de Penman-Monteith da FAO 56 para obtenção da evapotranspiração atual (ET).

$$ET = \left(\frac{ET_{inst}}{ET_0 inst}\right) \cdot ET_0 \quad (29)$$

Em resumo da Figura 4, o fluxograma a seguir descreve as etapas.

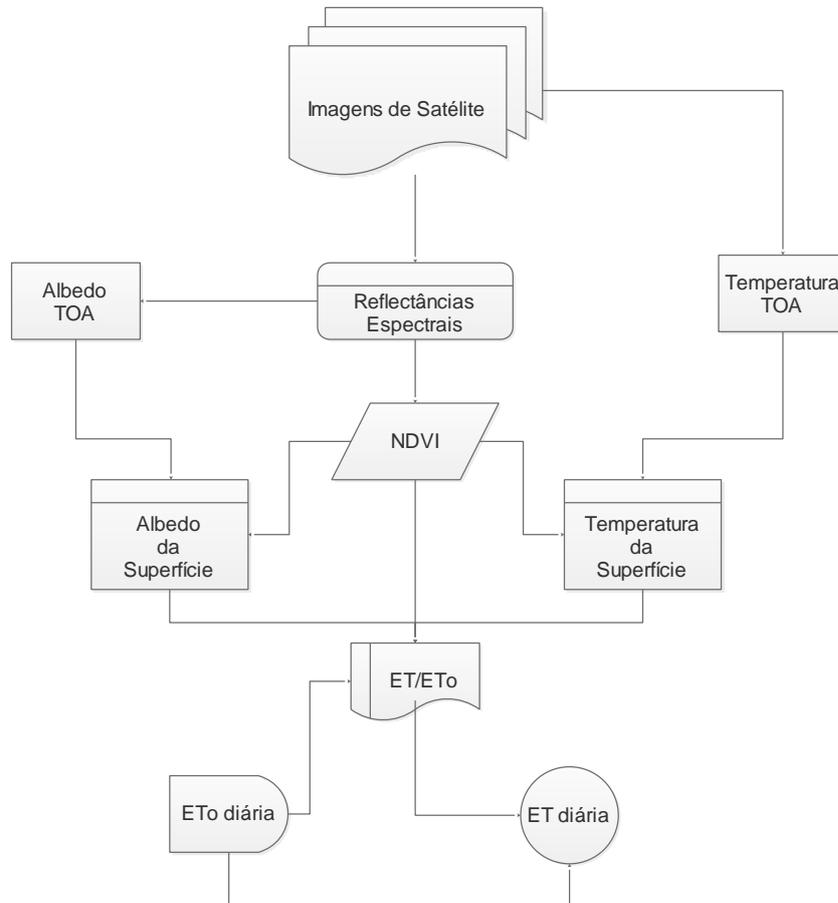


Figura 4. Fluxograma para cálculo da evapotranspiração via metodologia SAFER

2.7 Sensoriamento remoto simplificado da evapotranspiração (SRSE)

Este trabalho apresenta e propõe regressões simplificadas para tornar o processo de cálculo da ET mais acessível do ponto de vista de execução dos algoritmos. O uso desses modelos poderá tornar viável a obtenção de resultados em maior resolução espaciotemporal.

$$ET = \exp \left[a \exp \left\{ b \left(\frac{NDVI}{R_n} \right) + c \right\} \right] \quad (30)$$

$$\frac{ET}{R_n} = \exp \left\{ a + b \left(\frac{NDVI}{T_s} \right) \right\} \quad (31)$$

$$\frac{LE}{R_n} = \exp \left\{ a + b \left(\frac{NDVI}{IAF} \right) \right\} \quad (32)$$

onde: ET – Evapotranspiração (mm); R_n – Saldo de Radiação (mm); IAF – Índice de Área Foliar; T_s – Temperatura da superfície.

A partir de amostras com conjunto de pixels feitas nas mesmas coordenadas em diferentes tipos de superfície identificadas a partir de um mapa de uso de solo confeccionado com imagem de alta resolução espacial (5m) do satélite RapidEye, cedida pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) através do acervo do Geo Catálogo (Figura 1A). A validação dos modelos foi realizada com amostras de pixels diferentes em coordenadas diferentes, conforme o mapa de uso do solo (Figura 1B).

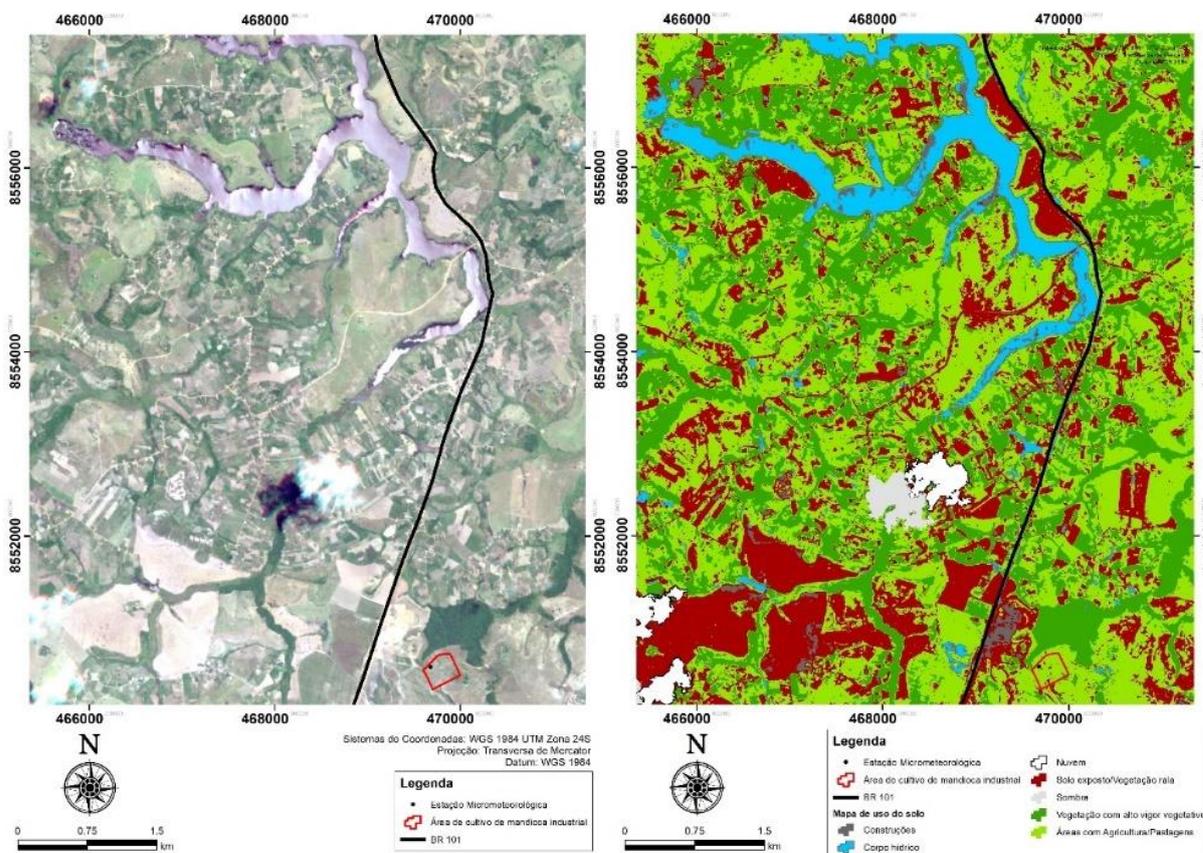


Figura 5. Imagem do satélite RapidEye (A); Mapa de uso de solo (B)

A Tabela 2 apresenta quantitativo das classes e o número de pixels utilizados na confecção dos modelos, e ainda, na validação.

Tabela 6. Classes do uso do solo e número de pixels utilizados nos modelos do Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial

Classes	Área (hectares)	Percentual	n° de Pixels usados na calibração	n° de Pixels usados na validação
Solo exposto/ Vegetação rala	1395,38	20,62%	40	25
Áreas com Agricultura/Pastagens	2871,26	42,43%	180	200
Vegetação com alto vigor vegetativo	1879,01	27,76%	50	40
Corpo hídrico	406,75	6,01%	30	35
Construções	91,15	1,35%	0	0
Nuvem	67,33	0,99%	0	0
Sombra	56,92	0,84%	0	0
TOTAL	6767,78	100,00%	300	300

Para as áreas classificadas como agricultura/pastagens foram utilizados um maior número de pixels tanto na etapa de calibração quanto da etapa de validação. As demais quantidades, foram divididas com base na qualidade das imagens das diferentes datas e de forma a obter um intervalo razoável das variáveis de entrada (LE, R_n , T_s , NDVI e IAF).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evapotranspiração da mandioca industrial

A evapotranspiração diária da cultura da mandioca estimada através do balanço de energia com duas fontes (métodos) diferentes (HRAS e HCT) do fluxo de calor sensível (H) é representada pela Figura 2. Os valores de ET para ambos os métodos (CT e RAS) variaram entre 0,7 e 4,3 mm dia⁻¹ e um total de 154,5 mm considerando todo o período medidos pelo sistema CT e 160,01 mm obtidos via método RAS esses totais expressam uma diferença diária de 0,09 mm dia⁻¹. O RMSE para todo o período foi na ordem de 0,185 mm dia⁻¹.

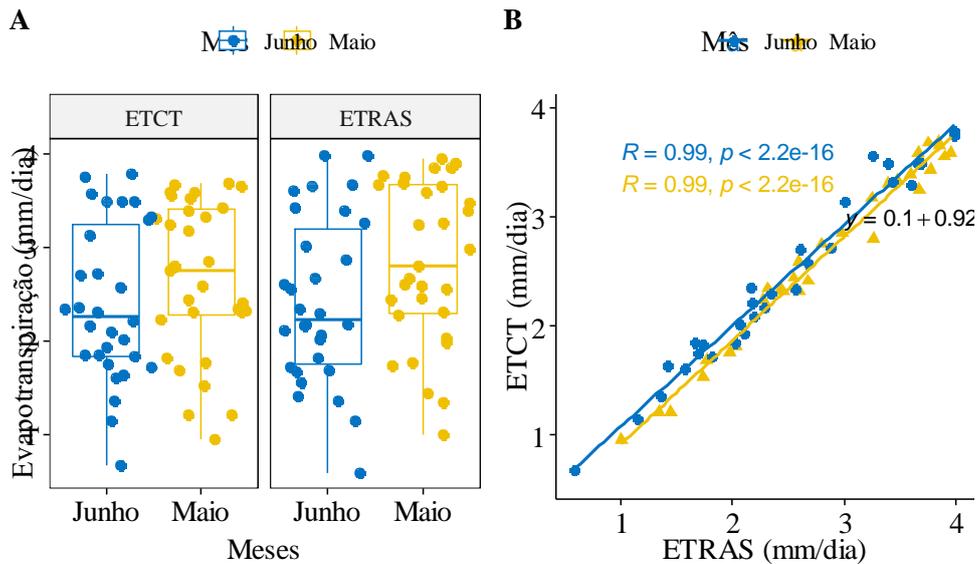


Figura 6. Correlação entre a evapotranspiração de um cultivo de um cultivo da mandioca industrial dos métodos covariância de turbilhões (ETCT) e renovação do ar da superfície (ETRAS) para os meses de maio e junho

O valor médio do K_c cuja ET obtida via CT foi em média na ordem de 0,95, enquanto o K_c para o método RAS foi de 0,92 (Figura 3). Para o período em questão (maio e junho de 2019), as plantas estavam; com 150 DAP, e valores de K_c para o período são consistentes com aqueles apresentados por Attarod et al. (2005) para um cultivo de mandioca em sequeiro. Dados recentes sobre coeficientes de cultivo da mandioca na região do recôncavo baiano foi reportado por Coelho Filho (2020).

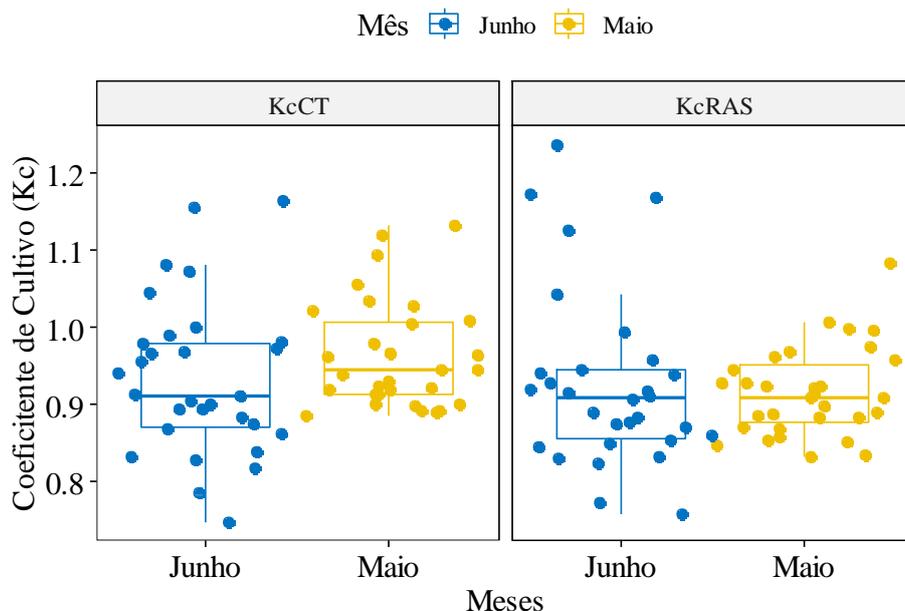


Figura 7. Variação do coeficiente de cultivo (K_c) diário de uma área de mandioca industrial

Os valores apresentados por Coelho Filho (2020) são compatíveis com esses aqui apresentados, para período semelhante a média do K_c foi de 0,98.

Com a justificativa de aprimorar uma metodologia que facilitasse as estimativas do coeficiente de cultivo da mandioca, Koyo; Hu e Amou (2020) usaram o NDVI para estimar o K_c para uma área de mandioca no Benin, cujos valores estimados tiveram como referência, aqueles padronizados pela FAO-56 (ALLEN et al., 1998). No final do estágio final (210 DAP) o K_c estimado via NDVI teve um valor maior quando comparado com o K_c da FAO para o mesmo estágio. Ao longo do ciclo de crescimento, mesmo para os períodos dos primeiros 20 dias e entre os 60 DAP e 150 DAP, durante os quais o K_c da FAO-56 tiveram valores constantes e estes foram semelhantes ao do presente estudo, na ordem de 0,98 na fase de produção de raízes.

3.2 Sensoriamento remoto da evapotranspiração da mandioca industrial

A Tabela 3 contém os valores de evapotranspiração de mandioca industrial obtidas via os métodos aqui estudados com vistas aos dados obtidos via sensoriamento remoto. As diferenças entre os valores de ET dos métodos referência (CT e RAS) e os valores de ET obtidos via METRIC foram baixas, na ordem de -0,316 e -0,180 mm para os métodos de CT e RAS, para os três dias de imagens utilizadas.

Tabela 7. Evapotranspiração de mandioca industrial obtidos por diferentes métodos

Data	METRIC	SAFER	CT	RAS
	ET mm dia ⁻¹			
24/05/2019	4,08	4,87	3,55	3,89
03/06/2019	-	5,46	3,75	3,99
09/06/2019	2,55	2,93	2,21	2,17
25/06/2019	2,87	3,25	2,58	2,68
29/06/2019	-	3,45	2,18	2,28

A tendência de superestimativa de dados de ET é compartilhada por outros trabalhos (GONZÁLEZ-DUGO et al., 2012; GONZÁLEZ-PIQUERAS et al., 2015). De acordo com Bastiaanssen (2000), dentro do balanço de energia e quando envolvem técnicas de sensoriamento remoto, o fluxo de calor no solo (G) é um dos principais

produtos que produzem erros nas estimativas, principalmente quando não se tem um mapa de uso e cobertura do solo. O tipo de cobertura, quando não bem identificado, remete em estimativas pouco confiáveis. A exemplo do que reportam Boegh e Soegaard (2004) em um trabalho realizado na Dinamarca, combinaram dados de NOAA AVHRR com os parâmetros meteorológicos gerados pelo modelo de previsão do tempo, para estimativa da ET. Apontaram que o método utilizado funcionou bem nas condições de vegetação densa e ampla umidade do solo. Mas para as regiões secas, uma correção deve ser feita pela diminuição da ET causada pela diferença de temperatura do ar e temperatura de superfície da vegetação. Destacando, que um mapa de uso e cobertura, auxilia no refinamento dos resultados, e na inserção de uma metodologia de estimativa local, a partir dessas informações.

3.3 Sensoriamento remoto simplificado da evapotranspiração (SRSE) da mandioca industrial

A Figura 4A representa relação direta entre ET e razão NDVI/ R_n que expressa a influência do grau de cobertura na energia disponível (em mm) no sistema. As Figuras 4B e 4C apresentam a relações lineares entre a razão ET/ R_n (que representa quanto de R_n foi usado para os fluxos de calor latente) e outras duas razões importantes, NDVI/IAF, representa a relação entre o vigor da vegetação com o índice de área foliar (IAF) e a razão NDVI/ T_s então chamada por Karnieli et. al. (2010) de (*Land Surface Temperature/NDVI*) que tem sido utilizada em várias aplicações associadas ao balanço hídrico e de energia na superfície. Está também associada disponibilidade de umidade e resistência do dossel, indicando estresse de vegetação e/ou estresse hídrico do solo, o que foi relatado anteriormente por Gillies et al. (1997).

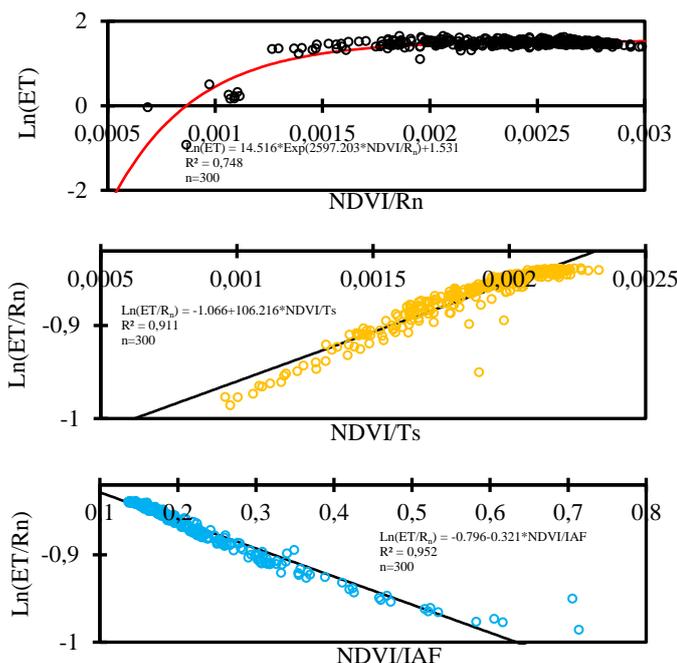


Figura 8. Ajustes dos modelos Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial

A Tabela 4 apresenta os coeficientes para os modelos de ajustes observados na Figura 3. Os coeficientes de determinação nas Figuras 4B e 4C são satisfatórios ($R^2 > 0,90$). O modelo proposto na Figura 3A foi aquele cujo R^2 foi o menor, seguindo ainda de maior RMSE na ordem de 0,413 mm e com 0,259 e 0,205 mm para os modelos das Figuras 4B e 4C, respectivamente. Apesar da pouca quantidade de imagens válidas, os desvios se encontram de acordo com alguns erros de análise de sensibilidade da ET em estudos de sensoriamento remoto, assim reporta Teixeira (2010) em análise semelhante.

Tabela 8. Coeficientes dos modelos do Sensoriamento Remoto Simplificado da Evapotranspiração (SRSE) para um cultivo de mandioca industrial

Parâmetro	Modelo	Coeficientes			R^2	RMSE (mm)
		a	b	c		
ET	$\exp \left[a \exp \left\{ b \left(\frac{NDVI}{R_n} \right) + c \right\} \right]$	14,516	2597,203	1,531	0,748	0,413
ET/R _n	$\exp \left\{ a + b \left(\frac{NDVI}{T_s} \right) \right\}$	-1,066	106,216	-	0,911	0,259
ET/R _n	$\exp \left\{ a + b \left(\frac{NDVI}{IAF} \right) \right\}$	-0,796	-0,321	-	0,952	0,205

O modelo que expressa ET/R_n em função da razão NDVI/IAF apresentou um erro na estimativa menor quando comparado com aquele que usa a razão NDVI/T_s. Na

data de passagem de 09/06/2019 para esse modelo, os desvios variaram entre -0,33 e 0,16 mm, e -0,30 a 0,020 mm para a data de passagem de 29/06/2019. Nesse cenário na análise espacial, o modelo acerta na pior das hipóteses 70% das estimativas. Essas diferenças nos valores dos desvios se dão muito principalmente pela variação dos valores de IAF, tendo em vista que o modelo METRIC prevê um valor máximo de IAF na ordem de 6. A inserção dessa metodologia com drones, associada à altura de voo reduzidas e maior resolução espaciotemporal, poderá reduzir esse desvio, através de um IAF mais preciso, com um maior intervalo de valores.

Com vistas ao NDVI, um maior refinamento nas grandezas quanto a valores negativos (corpos hídricos ou solo exposto) podem variar a correlação de acertos, visto que a proposta é compor um modelo para áreas com cobertura vegetal. A cobertura vegetal responde com valores do NDVI variando de 0,09 a 0,96, conforme a sua arquitetura, densidade e umidade, por tanto os maiores valores de NDVI estão associados às áreas de vegetação com maior vigor. Paralelo a essa análise, o uso do SAVI permite ainda uma análise mais robusta, com face aos valores altos de NDVI enquanto as grandezas numéricas do SAVI representam os mesmos alvos na superfície, entretanto, com um refinamento diferente, quanto mais densa a vegetação há um refinamento maior por parte do SAVI em distinguir a vegetação com alto vigor fotossintético com áreas de solo nu.

Para o modelo que expressa ET/R_n em função da razão $NDVI/T_s$, na data de passagem de 09/06/2019 os desvios variaram entre -0,45 e -0,185 mm, e -0,37 à -0,016 mm para a data de passagem de 29/06/2019, respectivamente). A uniformidade da área do cultivo (seja à nível nutricional ou de umidade do solo) de mandioca é responsável pela baixa variação da temperatura da superfície e isso limita o desempenho do modelo a uma faixa de temperatura específica, visto que se T_s não variar muito, o termo $NDVI/T_s$ irá subestimar a razão ET/R_n em mm. Haja vista, se faz necessário a inclusão de outros tipos de superfície na criação do modelo, seguido de um mapa de uso do solo, atualizado com regularidade. Girolimetto e Venturini (2013) descobriram que essa relação ($NDVI/T_s$) pode ser inversamente correlacionada a um índice de umidade da cultura. Outro estudo ainda mostrou que está relacionada à taxa de evapotranspiração da superfície, assim reportam Liu; Yao; Wang (2018); Alves et. al. (2020); Dijke et. al. (2019)

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e considerando os objetivos do presente capítulo, pode-se concluir que:

O total da evapotranspiração (ET) de um cultivo de mandioca industrial em sequeiro, nas condições do Recôncavo Baiano, foi em média de 160,01 mm na fase de formação dos tubérculos;

O método RAS tem potencial, depois de calibrado, para estimar a ET de uma área de mandioca cultivada em sequeiro nas condições climáticas do Recôncavo Baiano;

A partir de medidas da superfície, técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para a avaliação e quantificação espacial da evapotranspiração da superfície (cultivada ou não) no recôncavo baiano. Podendo assim, servir como ferramenta de gestão dos recursos hídricos a partir de um mapa de uso de solo;

A simplificação da ET obtida a partir de sensoriamento remoto, é uma realidade interessante, pois apresentou resultados coerentes e por se tratar de um número reduzido de variáveis, pode assim ser aplicada com metodologias de coleta com maior resolução temporal e espacial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. 310p.

ALLEN, R. G. **Manual REF-ET** version Windows 4.1. Available online at www.kimberly.idaho.edu, 2015.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ALVES, E. S., FILGUEIRAS, R., RODRIGUES, L. N., CUNHA, F. F., ALEMAN, C. C. Water stress coefficient determined by orbital remote sensing techniques. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, .24, n.12, p.847-853, 2020.

ATTAROD P., KOMORI D., HAYASHI K., AOKI M., ISHIDA T., FUKUMURA K., BOONYAWAT S., POLSAN P., TONGDEENOK P., SOMBOON P., PUNKNGUM S. Comparison of the evapotranspiration among a paddy field, cassava plantation and teak plantation in Thailand. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 60, p. 789–792. 2005.

BASTIAANSEN, W. G. M. Sebal. Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p. 87-100, 2000.

BOEGH, E., SOEGAARD, H., Remote sensing-based estimation of evapotranspiration rates. **International Journal of Remote Sensing**, 2004.

BURBA, G. The Eddy Covariance Method; LI-COR Biosciences: Lincoln, NE, USA, 2013; p. 331.

CAMILLA K. BORGES, C. K., CARNEIRO, R. G., SANTOS, C. A., SANTOS, C. A. C. Obtaining the daily actual evapotranspiration through remote sensing techniques application in Brazilian Semiarid. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing** v.11, n., 18-31, 2021.

CAO, Z., MACKAY, M. D., SPENCE, C., FORTIN, V. Variational Computation of Sensible and Latent Heat Flux over Lake Superior, **Journal of Hydrometeorology**, 19(2), 351-373, 2018.

CASTELLVÍ, F. Combining surface renewal analysis and similarity theory: A new approach for estimating sensible heat flux. **Water Resource Research**, v. 40, n. 5, p. 1147-1160, 2004.

COAGUILA, DANIEL N. et al. Water productivity using SAFER - Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. v. 21, n. 8, 2017.

COELHO FILHO, M. A. **Irrigação da cultura da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa. (Comunicado Técnico 172). 2020. 12 p.

DANODIA, A., PATEL, N. R., CHOL, C. W., NIKAM, B. R., SEHGAL, V. K. Application of S-SEBI model for crop evapotranspiration using Landsat-8 data over parts of North India, **Geocarto International**, 34:1, 114-131, 2019.

DIJKE, A. J. H. V., MALLICK, K., TEULING, A. J., SCHLERF, M., MACHWITZ, M., HASSLER, S. K., BLUME, T., HEROLD, M. Does the Normalized Difference Vegetation Index explain spatial and temporal variability in sap velocity in temperate forest ecosystems? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 23, 2077–2091, 2019.

EMBRAPA. **Mandioca em números**. (<https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>) Acessado em 12/22/2020.

FERREIRA, ELIZABETH ET AL. SURFACE ENERGY BALANCE SYSTEM (SEBS) AND SATELLITE DATA FOR MONITORING WATER CONSUMPTION OF IRRIGATED SUGARCANE. **Engenharia Agrícola** [online]. 2016, v. 36, n. 06 [Accessed 3 September 2021], pp. 1176-1185.

FOLTÝNOVÁ, L., FISCHER, M., MCGLOIN, R.P. Recommendations for gap-filling eddy covariance latent heat flux measurements using marginal distribution sampling. **Theor Appl Climatol** 139, 677–688, 2020.

FRENCH, A. N., HUNSAKER, D. J., CLARKE, T. R., FITZGERALD, G. J., LUCKETT, W. E., & PINTER JR., P. J. Energy balance estimation of evapotranspiration for wheat grown under variable management practices in central Arizona. **Transactions of the ASABE**, 50(6), 2059-2071, 2007.

GILLIES, R. R.; CARLSON, T. N.; CUI, J.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. **International Journal of Remote Sensing**, 18, pp. 3145–3166, 1997.

GIROLIMETTO, D., VENTURINI, V. Advances in Remote Sensing, 2013, Water Stress Estimation from NDVI-Ts plot and the Wet Environment Evapotranspiration. **Advances in Remote Sensing**, Vol. 2 No. 4, 2013, pp. 283-291. doi: 10.4236/ars.2013.24031.

GONZÁLEZ-DUGO, M. P.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CAMPOS, I.; ANDRÉU, A.; BALBOTIN, A; CALERA, A. Evapotranspiration monitoring in a vineyard using satellite-based thermal remote sensing. SPIE Remote Sensing. **International Society for Optics and Photonics** (March): 8, 2012.

GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; VILLODRE, J.; CAMPOS, I; CALERA, A.; C, BALBONTÍN. Seguimiento de Los Flujos de Calor Sensible Y Calor Latente En Vid Mediante La Aplicación Del Balance de Energía METRIC. **Revista de Teledetección**, v. 43, p. 43–54, 2015.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agrometeorological and remote sensing data in the northwest of São Paulo state, Brazil. **Acta Horticulturae**, v.1038, p.263-270, 2014.

HOLWERDA, F., GUERRERO-MEDINA, O., MEESTERS, A. G.C.A. Evaluating surface renewal models for estimating sensible heat flux above and within a coffee agroforestry system. **Agricultural and Forest Meteorology**, Volumes 308–309, 2021.

HU, Y., BUTTAR, N. A., TANNY, J., SNYDER, R. L., SAVAGE, M. J., LAKHIAR, I. A. **Surface Renewal Application for Estimating Evapotranspiration: A Review Advances in Meteorology**, 11p, 2018.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. **American Society of Civil Engineers**, 2^a ed., 2016, 744 p.

KARNIELI, A.; AGAM, N.; PINKER, R. T.; ANDERSON, M.; IMHOFF, M. L.; GUTMAN, G. G.; PANOV, N.; GOLDBERG, A. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations, **Journal of Climate**, 23(3), 618-633, 2010.

KOYO, P.; HU, J.; AMOU, M. Analysis of Spatiotemporal Features of Cassava Evapotranspiration in Benin Using Integrated FAO-56 Method and Terra/MODIS Data. **Journal of Agricultural Science**, Vol. 12, No. 8; 2020.

KUMAR, U., SAHOO, B., CHATTERJEE, C. et al. Evaluation of Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) Method for Estimating Actual

Evapotranspiration in Kangsabati Reservoir Command Using Landsat 8 Imagery. **J Indian Soc Remote Sens** 48, 1421–1432, 2020.

LIU, Z., YAO, W., WANG, R. Evaluating the surface temperature and vegetation index (Ts/VI) method for estimating surface soil moisture in heterogeneous regions. **Hydrology Research**, 49 (3): 689–699, 2018.

LO, C. P.; QUATTROCHI, D. A.; LUVALL, J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. **International Journal of Remote Sensing**, 18, pp. 287–303, 1997.

MA, W., HAFEEZ, M., ISHIKAWA, H. et al. Evaluation of SEBS for estimation of actual evapotranspiration using ASTER satellite data for irrigation areas of Australia. **Theor Appl Climatol**, 112, 609–616 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0754-3>

MCELDRONE, A. J., SHAPLAND, T. M., CALDERON, A., FITZMAURICE, L., PAW U, K. T., SNYDER, R. L. Surface Renewal: An Advanced Micrometeorological Method for Measuring and Processing Field-Scale Energy Flux Density Data **J Vis Exp**. 2013.

MEKHMANDAROV, Y., PIRKNER, M., DICKEN, U., TANNY, J., Examination of the surface renewal technique for sensible heat flux estimates in screenhouses. **Acta horticulturae**, 923-929, 2012.

PARRY, C.K., SHAPLAND, T.M., WILLIAMS, L.E. et al. Comparison of a stand-alone surface renewal method to weighing lysimetry and eddy covariance for determining vineyard evapotranspiration and vine water stress. **Irrig Sci** 37, 737–749, 2019.

PAW U., K.T.; QIU, J.; SU, H.B.; WATANABE, T.; BRUNET, Y. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 74, p. 119-137, 1995.

PEREZ-PRIEGO, O., EL-MADANY, T. S., MIGLIAVACCA, M., KOWALSKI, A. S., JUNG, M., CARRARA, A., KOLLE, O., MARTÍN, M. P., PACHECO-LABRADOR, J., MORENO, G., REICHSTEIN, M. Evaluation of eddy covariance latent heat fluxes with independent lysimeter and sapflow estimates in a Mediterranean savannah ecosystem, **Agricultural and Forest Meteorology**, Volume 236, Pages 87-99, 2017.

RWASOKA, D.T., GUMINDOGA, W., GWENZI, J. Estimation of actual evapotranspiration using the Surface Energy Balance System (SEBS) algorithm in the

Upper Manyame catchment in Zimbabwe, **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, Volume 36. 736-746, 2011.

SHAPLAND, T. M.; McELRONE, A. J.; SNYDER, R. L.; PAW U, K. T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part I: Theory and modelling. **Boundary-Layer Meteorology**, 2012a.

SHAPLAND, T. M.; McELRONE, A. J.; SNYDER, R. L.; PAW U, K. T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part II: Ramp characteristics and surface renewal flux estimation. **Boundary-Layer Meteorology**, 2012b.

SHAPLAND, T. M.; SNYDER, R. L.; SMART, D. R.; WILLIAMS, L. E. Estimation of actual evapotranspiration in winegrape vineyards located on hillside terrain using surface renewal analysis. **Irrigation Science**, v. 30, p. 471-484, 2012.

SNYDER, R.L., SPANO, D., PAW U, K.T. Surface renewal analysis for sensible heat and latent heat flux density. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 77, p. 249-266, 1996.

SUVOCAREV, K.; SHAPLAND, T.M.; SNYDER, R. L., MARTÍNEZ-COB, A. Surface renewal performance to independently estimate sensible and latent heat fluxes in heterogeneous crop surfaces. **Journal of Hydrology**, 509 83–93, 2014.

TASUMI, M. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. **Agricultural Water Management**, Volume 226, 2019.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v.2, p.1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Water productivity assessments with Landsat 8 images in the Nilo Coelho irrigation scheme. **Irriga**, edição especial, p.1-10, 2015a.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. F. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, 17, 2015, Toulouse. **Anais. SPIE**, 2015b

TEIXEIRA, A. H. C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. DE C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation

and energy balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v.7, p.14597-14619, 2015c.

TEIXEIRA, A. H. et al. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. **Proceedings of SPIE-International Society for Optical Engineering**, v. 8531, p. 85310P-1-85310P-9, 2012.

VAN ATTA, C. W. Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. **Archives of Mechanics**, v. 29, p. 161-171, 1977.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J., Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, 89, pp. 467–483, 2004.

ZHAO, J., CHEN, X., ZHANG, J. et al. Higher temporal evapotranspiration estimation with improved SEBS model from geostationary meteorological satellite data. **Sci Rep** 9, 14981, 2019.