

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

EFEITOS DO CALOR ARMAZENADO NO DOSSEL E NO SOLO NO CÁLCULO
DO BALANÇO DE ENERGIA EM POMAR DE MAGUEIRAS IRRIGADAS

CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro de 2006

CICERA JOSEFA ROZANGELA BORGES

EFEITOS DO CALOR ARMAZENADO NO DOSSEL NO SOLO NO CÁLCULO DO
BALANÇO DE ENERGIA EM POMAR DE MAGUEIRAS IRRIGADAS

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Campina Grande,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Agrometeorologia

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo

Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro de 2006

CÍCERA JOSEFA ROZANGELA BORGES

EFEITO DO CALOR ARMAZENADO NO DOSSEL E NO SOLO NO CÁLCULO DO
BALANÇO DE ENERGIA EM POMAR DE MANGUEIRAS IRRIGADAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 03/03/2006

BANCA EXAMINADORA



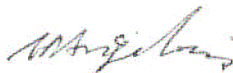
Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dra MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA
Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
Universidade de São Paulo

UFMG/BIBLIOTECA

Dedico, com todo amor e carinho, às
pessoas mais importantes da minha
vida: meus pais Geraldo Duarte
Borges e Corina Adilsa da Silva
Borges

Aos meus irmãos José Geová, Jorge
Luís, Sueli, Geovane, Geraldinho e
Júlio César, OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A Deus nosso senhor, pelas graças alcançadas durante minha caminhada.

Aos meus familiares, e incentivadores.

Obrigada, por compreender nossa ausência, encorajando-nos nas horas difíceis, pela confiança e investimentos empreendidos.

Ao professor Pedro Vieira de Azevedo, pela orientação e ensinamentos transmitidos.

Ao professor Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela colaboração, exemplo de conduta profissional, confiança, incentivo e sugestões apresentadas.

À Dra Magna Soelma Beserra de Moura, pela amizade, confiança, incentivo, sugestões e assistência prestada durante o experimento.

Ao Dr. José Monteiro Soares pelo apoio prestado durante o experimento.

Ao amigo Roque Antônio Barbosa da Embrapa Semi-Árido pelo apoio prestado durante o experimento

Aos meus companheiros de convivência, Magda Amélia, Fernando Alves, Jane Carla e Natália, pela agradável companhia e apoio prestados.

Aos amigos do curso e da universidade que muito me ajudaram durante o mestrado: Ana Cleide, Kleber Ataíde, Lincoln, Isaier, Rochelle, Mary France, Francisco de Assis, Alexandre (in memória), Professor Genival, Leidiane, Wallace, Robson, Wendel, Samara, Josicleda, Hudson e em especial a João Hugo companheiro no experimento de campo e a Rafael pela colaboração no meu trabalho.

A Divanete secretária da pós-graduação em meteorologia pelo exemplo de competência, profissionalismo e atenção apresentada durante o curso.

Ao professor Bernardo pelo incentivo e conhecimentos transmitidos.

O incentivo proporcionado pelo projeto “Eficiência de uso da água em áreas irrigadas com fruteiras na região do Submédio São Francisco”.

A capes pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual seria impossível a realização deste Curso.

À Fazenda Agropecuária Boa Esperança S.A. em Petrolina-PE, por ter cedido o espaço para desenvolvermos a pesquisa.

À EMBRAPA Semi-Árido, por ceder suas instalações, funcionários, equipamentos e transporte.

A todos os professores do Departamento de Ciência Atmosféricas da UFCG pelos ensinamentos transmitidos.

A coordenação da Pós-graduação em meteorologia pela contribuição dada no período do experimento de campo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. A cultura da mangueira	19
2.2. Balanço de energia com base na razão de Bowen	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Área experimental e clima	30
3.2. Cultura estudada	32
3.3. Fenologia da mangueira	32
3.4. Instrumentação e coleta de dados	33
3.5. Balanço de energia com base no método da razão de Bowen	36
3.5.1. Calor latente	36
3.5.2. Fluxo de calor sensível	39
3.5.3 Fluxo de calor no solo	39

3.5.4 Calor armazenado pelo dossel vegetativo da planta	40
3.5.5. Análise estatística	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Análise da variação temporal dos componentes do balanço de energia	43
4.2. Partições dos componentes do balanço de energia	52
4.3 Análise do fluxo de calor no solo e calor armazenado na copa da planta	56
4.4. Análise da evapotranspiração do pomar de mangueiras	60
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 3.1	Vista aérea da área experimental da Agropecuária Boa Esperança S.A. em Petrolina-PE	31
Figura 3.2	Croqui, da estação micrometeorológica instalada na área experimental com a exposição dos instrumentos utilizados na pesquisa.	35
Figura 3.3	Detalhes do datalogger utilizado na pesquisa de campo com a mangueira.	35
Figura 4.1	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estádio fenológico de floração da mangueira irrigada, realizado no dia 01/05/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	46
Figura 4.2	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estádio fenológico de queda de frutos da mangueira irrigada, realizado no dia 15/06/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	47
Figura 4.3	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estádio fenológico de formação de frutos da mangueira irrigada, realizado no dia 30/06/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	48

Figura 4.4	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de formação de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 18/07/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	49
Figura 4.5	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de maturação de frutos da mangueira irrigada, realizado no dia 08/08/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	50
Figura 4.6	Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico maturação de frutos da mangueira irrigada, realizado no dia 09/08/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).	51
Figura 4.7	Comportamento do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e com correção (G_{cc}) ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.	59
Figura 4.8	Comportamento do fluxo de calor armazenado no dossel das plantas (S) ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.	59

LISTA DE TABELAS

		Pág.
Tabela 3.1	Médias mensais climatológicas e desvios-padrão (1975-2005) da temperatura do ar (T_a), total mensal de precipitação pluvial (Pr), umidade relativa do ar (UR), insolação (n), evaporação do tanque classe "A" (Ev) e velocidade do vento (V) da estação agrometeorológica de Bebedouro.	31
Tabela 3.2	Textura do solo da área experimental nas camadas 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-120 cm.	32
Tabela 3.3	Duração dos estágios fenológicos do pomar de mangueiras durante o período experimental em 2005.	33
Tabela 4.1	Partições do saldo de radiação (R_n) em fluxos de calor latente (LE), calor sensível para o ar (H) e fluxo de calor do solo com correção (G_{cc}) e de calor armazenado no dossel vegetativo (S) em 14 dias durante o período experimental.	53
Tabela 4.2	Partições do saldo de radiação (R_n) em fluxos de calor latente (LE), calor sensível para o ar (H) e fluxo de calor do solo sem correção (G_{sc}) e de calor armazenado no dossel vegetativo (S) em 14 dias durante o período experimental.	54
Tabela 4.3	Valores médios dos componentes do balanço de energia (R_n , LE , H , G_{cc} e S) e da partição do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor latente (LE/R_n), calor sensível do ar (H/R_n), fluxo de calor	55

no solo com correção (G_{cc}/R_n) e calor armazenado no dossel da planta (S/R_n) em dias representativos de cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.

Tabela 4.4	Valores médios dos componentes do balanço (R_n , LE, H, G_{sc} e S) e da partição do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor latente (LE/R_n), calor sensível do ar (H/R_n), fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}/R_n) e calor armazenado no dossel da planta (S/R_n) em dias representativos de cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.	56
Tabela 4.5	Valores médios diários do fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}), do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e do calor armazenado no dossel da planta (S) em 14 dias durante o período experimental.	57
Tabela 4.6	Valores médios do fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}), fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e calor armazenado no dossel da planta (S) em cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.	58
Tabela 4.7	Evapotranspiração (mm) do pomar de mangueiras considerando-se o fluxo de calor no solo com correção (ET_c G_{cc}) e no fluxo de calor no solo sem correção (ET_c G_{sc}) em 14 dias durante o período experimental.	61
Tabela 4.8	Evapotranspiração (mm) da mangueira considerando-se o fluxo de calor no solo com correção (ET_c G_{cc}) e no fluxo de calor no solo sem correção (ET_c G_{sc}) em dias representativos de cada estágio fenológico do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.	61

RESUMO

Um experimento de campo foi conduzido na área de produção da Empresa Agropecuária Boa Esperança S.A., situada no Km 183 da BR-428, Petrolina, no Estado de Pernambuco (latitude: 09°20'S; longitude: 40°27'W; altitude: 365,5 m), num pomar de mangueiras irrigado por microaspersão. O objetivo da pesquisa foi investigar se o calor armazenado acima das placas de fluxo de calor no solo e no dossel da planta representa contribuição significativa no cálculo do balanço de energia do pomar. Os componentes do balanço de energia foram obtidos por meio do método do balanço de energia com base na razão de Bowen. Foi utilizado o teste t-Student para avaliar existência de diferença significativa entre as médias dos componentes do balanço de energia obtidas mediante as seguintes condições: (i) o calor armazenado acima dos fluxímetros é considerado; (ii) o calor armazenado acima dos fluxímetros não é considerado. Os resultados revelaram que o calor armazenado no dossel da mangueira apresenta contribuição irrelevante no cálculo do balanço de energia. O calor armazenado acima dos fluxímetros não interfere significativamente, em nível de 5% de probabilidade pelo teste t-Student, no cálculo da evapotranspiração da mangueira irrigada, bem como nos componentes do balanço de energia, mediante as condições de realização do experimento de campo.

Palavras-chave: Evapotranspiração, Razão de Bowen; Fluxo de calor no solo.

ABSTRACT

A field experiment was carried out at the production area of the farm “Boa Esperança S.A” which is located at the Km 183 of the BR-428, at Petrolina, Pernambuco state (latitude: 09°20’S; longitude: 40°27’W; altitude: 365.5 m above sea level) in a mango orchard irrigated by micro- sprinklers. The objective this study was to investigate if the heat storage above soil heat flux plate and within canopy plant to present some significant influence on the energy balance estimates. Bowen ratio-energy balance was used for obtaining the daily evapotranspiration of the mango orchard. It was applied the t-Student test to assess the situation if there was a significant difference between the energy balance components under the following conditions apply: (i) the heat storage above fluximeters is computed and (ii) the heat storage above fluximeters is not computed. The results showed that the storage sensible heat at the mango canopy represents a non significant contribution to the above canopy energy balance. The sensible heat storage above soil flux plates didn’t significantly interfere, at the 5% probability level by t-Student teste, in the irrigated mango orchard evapotranspiration estimates at the conditions in which the field experiment was conducted.

Keywords: Evapotranspiration; Bowen ration; Soil heat flux.

1. INTRODUÇÃO

A mangueira é originária da Ásia, mais precisamente da Índia, onde existem mais de mil variedades, e vem sendo cultivada há mais de 4.000 anos. Essa frutífera foi difundida pelos portugueses para vários continentes, inclusive para as Américas, sendo o Brasil o primeiro país a cultivar a mangueira (Simão, 1971). No século XIX, ela foi difundida para o México e posteriormente para os Estados Unidos da América. Atualmente, a mangueira é cultivada em todos os países das faixas tropical e equatorial e tornou-se um dos frutos mais apreciados do mundo e de grande valor comercial.

A cultura da manga se alastrou por várias regiões do globo, sendo a Índia o seu principal produtor, responsável por 76,1% da produção mundial, ficando os continentes americano e africano com o segundo e terceiro lugar com percentuais de 14,04 e 9,6%, respectivamente. Nos demais continentes, a produção de manga é muito pequena em face as suas condições climáticas pouco favoráveis ao cultivo. Nesse particular, o Brasil dispõe de ótimas condições edafoclimáticas para o cultivo da mangueira, em todas as regiões do país. A aceitação das variedades Bourbon, Rosa, Coquinho, Ouro, etc., é bastante expressiva no mercado nacional. Entretanto, o mesmo não acontece com o mercado

internacional, que prefere as variedades coloridas, tais como Tommy Atkins, Haden e Heitt. Devido à boa aceitação dessas variedades nos mercados europeus e americanos, os produtores brasileiros começaram a substituir, na década de 70, as variedades nacionais pelas coloridas, as quais ocupam atualmente a maior parte dos pomares nacionais. Dentre as variedades coloridas, a mais expressiva é a Tommy Atkins, que representa 80% das áreas plantadas no país. Suas principais características são as seguintes: excelente coloração do fruto e a resistência a doenças. No ano de 2001 o Brasil é o nono maior produtor mundial de manga e sua produção é uma importante fonte de geração de emprego e renda, principalmente no Submédio São Francisco.

O fruto da mangueira tem sido uma importante alternativa comercial para o Brasil, particularmente para o Nordeste, uma vez que os produtores dessa região têm investido em infra-estrutura de produção com base nas exigências do mercado externo. Seu cultivo, em escala comercial, tem se estabelecido nas áreas irrigadas do Submédio São Francisco, que é considerada a maior região produtora de manga, respondendo por 92% das exportações do país. Nessa região, o déficit hídrico, causado pela distribuição irregular das chuvas e pelas elevadas taxas de evapotranspiração, é um dos principais fatores limitantes à exploração agrícola em sistema de sequeiro. Entretanto, a produção de fruteiras em escala comercial somente é possível com o uso da irrigação.

Em função do aumento mundial da demanda de alimentos e do emprego da agricultura irrigada, é necessário que a produção agrícola seja mais eficiente. Uma das alternativas para se atingir uma melhor eficiência no uso da água é iniciar a prática do manejo eficiente da irrigação, e, para isso, é necessário dispor de informações sobre a condição hídrica do solo e do consumo hídrico máximo da cultura. O conhecimento do comportamento da evapotranspiração, coeficiente de cultivo, déficit de pressão de vapor d'água, condutância estomática e a biomassa é uma importante ferramenta para o manejo

ideal de culturas irrigadas. Muitos autores têm analisado a variação temporal dessas variáveis para diferentes culturas (Silva, 2000; Azevedo et al., 2003).

O método do balanço de energia é comumente utilizado para se estimar a evapotranspiração de superfícies vegetadas e se baseia nas análises do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante. Estando próximo à superfície, os fluxos de energia distribuem-se em saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor armazenado no dossel (S) e em fluxo de calor latente (LE). Bowen (1926) desenvolveu o método do balanço de energia baseado no quociente entre os fluxos de calor sensível e latente, os quais combinam as variáveis atmosféricas e a energia disponível. O conhecimento dos componentes do balanço de energia sobre superfícies cultivadas é de grande importância para a estimativa das perdas de água por evapotranspiração e caracterização do microclima local. A razão de Bowen tem sido intensamente utilizada por diversos pesquisadores, com a finalidade de resolver a equação do balanço de energia sobre culturas e, assim, determinar a evapotranspiração (Rosenberg et al., 1983; Azevedo et al., 2003). Diversos trabalhos foram realizados para verificar a validade deste método (Tanner, 1960; Villa Nova, 1973). Segundo Angus & Watts (1984), em solos úmidos, o método da razão de Bowen para culturas agrícolas apresenta bons resultados, porém em condições de déficit hídrico no solo, o método não apresenta boa aproximação. Daamen et al. (1999), estudando o fluxo de energia num pomar de limão, cujo fator de cobertura do solo era de 39%, constataram uma inconsistência relativa entre a soma dos fluxos de energia que atuavam sobre o pomar, quando utilizaram os métodos de correlação turbulenta e razão de Bowen, indicando que esse último comportava-se de maneira irreal naquele local. A maioria dos trabalhos sobre balanço de energia, com base na razão Bowen, não contabiliza o fluxo de calor armazenado no dossel

da planta (Daamen et al., 1999; Silva, 2000; Teixeira, 2001). O argumento geralmente utilizado é que esse componente do balanço de energia é muito pequeno em comparação aos demais fluxos de energia. Entretanto, espera-se que se a planta tiver um dossel bastante desenvolvido, o calor armazenado por ela pode apresentar uma contribuição considerável no cálculo do balanço de energia. Por outro lado, também em trabalhos com balanço de energia geralmente não se considera o calor armazenado acima dos fluxímetros. Esses sensores de medição de fluxo de calor no solo são comumente instalados a 2 cm de profundidade. Entretanto, pouco se sabe se esse procedimento não conduz a erros apreciáveis no balanço de energia de culturas irrigadas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou investigar os efeitos do calor armazenado no dossel das plantas e acima dos fluxímetros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da mangueira

A mangueira pertence à família *Anacardiácea*, do gênero *Mangífera indica* L, que possui 50 espécies, sendo a maioria originária do sudeste asiático. Seus frutos geralmente se dividem em dois grupos: o grupo indiano com frutos monoembriônicos, fortemente aromáticos, de coloração atraente e suscetível à antracnose e o grupo indochinês com frutos poliembriônicos, com caroços longos e achatados, pouco aromáticos, geralmente amarelados e medianamente resistentes à antracnose (Cunha et al.; 1994). A árvore é frondosa, possui porte de médio a alto (10 a 30 m), com a copa arredondada, podendo ser compacta ou aberta. As folhas são lanceoladas, de textura coriácea, medem de 14 a 40 cm de comprimento e apresenta coloração variando de verde-claro à levemente arroxeadada ou amarronzada quando jovem, e verde-normal a escuro na fase madura (Cunha et al., 1994).

O sistema radicular da mangueira é composto por uma raiz primária muito longa, que se desenvolve até encontrar o lençol freático, sendo que poucas raízes de sustentação se desenvolvem até esse ponto. As raízes superficiais localizadas abaixo da superfície do

solo podendo alcançar 5,5 m em profundidade e 7,6 m em distância, e as absorventes, que se encontram a 1,5 m de profundidade e 1,5 m de distância do tronco da planta. As flores estão reunidas em panículas terminais ou laterais, de tamanho, forma e coloração variáveis, em número de 200 a 3.000 panículas/planta (Genú & Pinto, 2002). Assim, uma mangueira adulta em pleno florescimento poderá conter milhões de flores, das quais uma porcentagem mínima chega a originar frutos. O fruto é uma drupa com características muito variáveis quanto ao tamanho, forma (reniforme, ovada, oblonga, arredondada e codiforme), peso (varia de algumas gramas até dois quilogramas) e coloração da casca (várias tonalidades de amarelo, verde e vermelho). A polpa tem tonalidades de amarelo, textura firme por causa das fibras finas, bom sabor e semente pequena (Cunha et al. 1994).

A região Nordeste do Brasil é a maior produtora de manga tipo exportação do país com 92% (Valexporte, 2004) da produção nacional. As variedades cultivadas que predominam na região do Submédio do Rio São Francisco são: Tommy Atkins, Haden e Keitt. A variedade Tommy Atkins é a mais cultivada mundialmente para exportação porque ela apresenta grandes facilidades para indução floral em época quente, alta produtividade e boa vida de prateleira (Genu & Pinto, 2002). Essa variedade representa 90% das exportações de manga no Brasil. É indicada para consumo in natura e para indústria. Seus frutos são de médios a grande com variação de 300 a 700g, 15 cm de comprimento, ovalados e oblongos, de coloração roxo-vermelho-laranja-amarelada, brilhante, casca grossa e resistente ao armazenamento e ao transporte, polpa amarela-escura, textura firme, agradável sabor e sementes com cerca de 6 a 8% do peso do fruto (Albuquerque et al., 1999).

Apesar do cultivo da mangueira apresentar um potencial econômico considerável no Brasil, somente em meados dos anos 80 foram desenvolvidas pesquisas visando o

melhoramento de vários aspectos, tais como genético, manejo de água, sistema radicular, nutrientes, comportamento vegetativo (Souza & Pinto, 1996).

A planta é nutrida por meio de suas raízes e por essa razão é de suma importância conhecer o seu sistema radicular. Soares & Costa (1995) constataram que 68% das raízes são de absorção e 86% de sustentação, situadas na faixa horizontal de 90 a 260 cm em faixa horizontal, com profundidade do solo variando de 0 a 120 cm. Na distribuição vertical do solo 65% das raízes são de absorção e 56% de sustentação, localizadas na faixa de 0 a 60 cm. Informações dessa natureza são necessárias à irrigação, principalmente para a definição dos sistemas, como sulco, gotejamento, micro aspersão dentre outros.

Espínola Sobrinho (2003) estudou a influência da arquitetura do dossel da mangueira na produtividade, utilizando-se dados de radiação solar, temperatura do ar e arquitetura do dossel vegetativo. Foram analisadas 30 árvores, para as condições de penetração de radiação solar nos dosséis, plantadas em 6 fileiras com 5 plantas, onde cada fileira possuía uma arquitetura de abertura de copa diferente: pirâmide, testemunha, poda v, cálice, poda 2v e poda 4v. Ele observou que na maioria das arquiteturas houve pouca reflexão de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) pela superfície foliar, sendo os dosséis testemunha e pirâmide os que mais absorveram PAR, devido a suas densidades, enquanto que a arquitetura cálice foi o que absorveu menos PAR. As arquiteturas poda 4v e poda v foram as mais produtivas, sendo que todas as outras estudadas produziram mais frutos que a testemunha. Com isso o autor pode concluir que a penetração de radiação no interior dos dosséis em função das aberturas efetuadas com diferentes tipos de arquitetura influencia na produtividade e na qualidade dos frutos.

2.2. Balanço de energia com base na razão de Bowen

O conhecimento dos componentes do balanço de energia sobre superfícies cultivadas é de grande importância para a estimativa das perdas de água por evapotranspiração. Com isso é possível contribuir para a utilização mais racional da água pelas culturas, cujas fases críticas de desenvolvimento são limitadas pelo fator hídrico, além de caracterizar o microclima local. A evapotranspiração é um processo de perda de água na forma de vapor d'água que ocorre do sistema solo-planta para a atmosfera, por meio da utilização do saldo de radiação como energia proveniente da radiação solar.

O balanço de energia determinado através da razão de Bowen é utilizado para a quantificação dos fluxos de calor latente e sensível emitidos por superfícies vegetadas, em função dos gradientes verticais da pressão de vapor d'água e da temperatura do ar observados na camada de ar próxima à superfície do solo. Segundo Arya (1988), existem quatro tipos de fluxo de energia em uma superfície, conhecidos como: saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor no solo (G) e de calor sensível (H). Há também a energia armazenada na copa das plantas (S) e a utilizada no processo fotossintético (P), as quais não são computadas por ter uma baixa representatividade do saldo de radiação além de difícil contabilização.

O método do balanço de energia tem sido muito utilizado por vários pesquisadores na estimativa da evapotranspiração de culturas, devido à facilidade e aos resultados satisfatórios obtidos na estimativa dos fluxos de energia. Sua eficiência é maior em culturas de pequeno porte como trigo (Mokate et al., 1995), milho (Cunha et al., 1996, Mastroilli et al., 1998;) e alfafa (Todd et al., 2000). Em culturas de grande porte, como no caso das fruteiras, o BERB tem sido pouco utilizado devido às suas restrições, principalmente no que se refere à bordadura (fetch) adequada. Mesmo assim, alguns

autores têm usado esse método em culturas de médio e grande portes com sucesso (Silva, 2000; Azevedo et al. 2003).

Daamen et al. (1999) compararam o fluxo de calor latente da alfafa irrigada, estimado por meio do método do balanço de energia com base na razão de Bowen e medidas lisimétricas, durante a estação de crescimento da cultura. Os autores encontraram grandes diferenças entre os dois métodos, principalmente quando a razão de Bowen foi menor do que zero, em dias quentes e secos ou quando o fluxo de calor latente excedeu a energia disponível. Essas condições provavelmente podem ser encontradas durante o período da madrugada.

O conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente contribui para uma utilização mais racional da água na irrigação de culturas. O grande esforço da maioria das pesquisas realizadas sobre o fluxo de calor latente tem sido relacionado à quantificação dos componentes do balanço de energia por meio da razão de Bowen. Essa técnica tem sido utilizada por vários estudiosos do assunto (Villa Nova, 1973; Garrat, 1984; Heilman & Brittin, 1989; Cellier & Olioso, 1993; Cunha et al., 1996; Prueger et al., 1997; Soares & Azevedo, 2002; Azevedo et al., 2003). Embora esse método seja muito utilizado, ele requer algumas condições para sua aplicabilidade, uma vez que sua aplicação não reflete a natureza turbulenta do processo evapotranspiratório (Steduto & Hsiao, 1998). Por isso, para determinação do fluxo de calor latente, por meio do método do balanço de energia, com base na razão de Bowen, considera-se o seguinte (Angus & Watts, 1984; Heilman & Brittin, 1989; Nie et al., 1992): i) igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_h) e latente (K_w), ou seja, a razão entre esses coeficientes deve ser igual a unidade, o que é válido apenas para condições de estabilidade atmosférica próximo à neutralidade, ii) as medidas de temperatura do ar e pressão de vapor d'água devem ser efetuadas dentro da camada limite superficial (vegetação-

atmosfera), com ausência de gradientes horizontais, implicando na necessidade de um “fetch” ou bordadura, com extensão mínima de 100 vezes a altura da cultura. Os pesquisadores perceberam que esse método funciona bem em condições úmidas, o que não ocorre em condições secas (β alto e positivo) e na presença de advecção de energia (β negativo) (Angus & Watts, 1984).

Heilman & Brittin, (1989), em pesquisa desenvolvida utilizando múltiplos sistemas da razão de Bowen localizado a diferentes distâncias e alturas, em uma área vegetada com plena transpiração, constataram que quando a razão de Bowen é pequena, o balanço de energia não é afetado pelo “fetch”, podendo-se usar com segurança um “fetch” de 20 vezes a altura da cultura, ao invés da relação 1:100 mencionada na literatura.

Para Todd et al. (2000), as vantagens do método do BERB incluem o uso de medidas simples e contínuas; não necessita de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície analisada; possibilita a integração do fluxo de calor latente sobre extensas áreas e fornece medidas em pequena escala de tempo (segundos e minutos). Nesse sentido, Trambouze et al. (1998), usando o método do balanço de energia na cultura da videira, concluíram que a vantagem desse método em relação aos outros, deve-se ao fato dele estimar evapotranspiração para períodos curtos. As desvantagens englobam a influência da sensibilidade dos instrumentos na determinação dos componentes do balanço de energia e a necessidade de um “fetch” adequado.

Mesmo com as restrições do método do BERB em relação a climas quentes, estudiosos têm usado essa metodologia para a determinação da evapotranspiração de culturas em ambientes semi-áridos, obtendo, inclusive, resultados satisfatórios (Unland et al., 1996; Todd et al., 2000; Silva, 2000; Soares, 2003; Azevedo et al.; 2003). A razão de Bowen depende dos gradientes de temperatura (ΔT) e de pressão de vapor (Δe). Em climas áridos, ΔT apresenta-se muito alto e Δe relativamente baixo. Portanto, para se obter

estimativas confiáveis da razão de Bowen é necessário que os instrumentos estejam bem calibrados. Quando são usados psicrômetros para obter as medições de temperaturas de bulbos seco e úmido eles devem ser devidamente calibrados, mantidos limpos com ventilação adequada. Essas condições garantem de que haja ascensão contínua de água ao bulbo úmido (Angus & Watts, 1984).

Todo instrumento de medição tem um erro associado, independente de fabricante, conforme verificado por Twine et al. (2000). Comparando instrumentos de seis fabricantes de saldo radiômetros, esses autores perceberam a variação de 5 a 20%. Quando fizeram a calibração no campo, verificaram que as diferenças podem atingir até 30% da calibração de fábrica. Assim, com base nesses resultados, os autores concluíram que é mais seguro fazer calibrações diretamente no campo, onde forem instalados os instrumentos de medição das variáveis meteorológicas.

O fluxo de calor no solo (G) deve ser bem representado, pois ele varia mais do que o saldo de radiação à superfície. Assim, para se obter uma boa representatividade da área analisada, na sua contabilização, faz-se necessário a instalação de vários instrumentos de medição do fluxo de calor no solo (fluxímetros). Geralmente esses instrumentos são instalados em profundidades que variam de 2 a 10 cm, dependendo dos objetivos do estudo.

Para Kustas et al. (2000), a partição do saldo de radiação em G esta relacionada à cobertura vegetal e a posição dos fluxímetros no solo. Se o solo estiver totalmente coberto, a porcentagem de G gira em torno de 5 a 10% do saldo de radiação (R_n); caso o solo esteja coberto parcialmente esse valor aumenta bastante, podendo variar de 20 a 40% de R_n .

Segundo Silans et al. (1997), o fluxo de calor no solo não pode ser medido diretamente à superfície do solo, pois o fluxímetro não pode se exposto diretamente à radiação solar. Os autores realizaram a medições com um fluxímetro a 2,5 cm de

profundidade e à superfície e não encontraram diferenças significativas entre as medidas, atribuindo essa ocorrência às características do solo. Quando a localização dos fluxímetros é a 5 cm de profundidade deve ser feita com medidas paralelas de gradiente de temperatura e umidade do solo para corrigir os dados do fluxo de calor no solo, já que a espessura da camada tem influencia na quantidade de energia que atinge a placa.

Malek (1993) estudou a variação do fluxo de calor no solo, e seus efeitos na estimativa da evapotranspiração, com a finalidade de saber a influência desse fluxo medido em diferentes profundidades do solo. Ele realizou medidas a 8 cm de profundidade e à superfície, com médias a cada 20 minutos, e observou que a radiação solar, o saldo de radiação, a cobertura de nuvens, a direção e a velocidade do vento afetam o fluxo de calor no solo, provocando rápidas variações do fluxo à superfície. Entretanto, o mesmo não ocorreu com o sensor instalado a 8 cm de profundidade. Esse trabalho mostrou ainda que quando o fluxímetro foi posicionado a 8 cm ao invés de à superfície, a evapotranspiração foi superestimada.

Kustas et al. (2000) usaram 20 fluxímetros para avaliar o comportamento do fluxo de calor no solo em uma duna com cobertura parcial de vegetação e concluíram que há uma grande variabilidade entre as observações. Por esse motivo, os autores não conseguiram definir um número ideal de fluxímetros, para expressar as condições de armazenamento de calor do solo para a o local estudado. Stannard et al. (1994) sugeriram a utilização de pelo menos três sensores, localizados em uma área coberta pela vegetação, uma área exposta, e outra área intermediária entre o solo exposto e a cobertura vegetal. Seguindo essa linha de pesquisa, Silva (2000), em estudo num pomar de mangueira irrigado no Submédio São Francisco, utilizaram três fluxímetros localizados a 5 cm de profundidade, em diferentes condições de cobertura e umidade do solo. Nesse estudo os autores encontraram um valor médio de 5% do fluxo de calor no solo em relação a R_n .

Cunha et al. (1996) determinaram a evapotranspiração pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, para cultura de milho, e constataram que o fluxo de calor no solo correspondeu a 6% de R_n . Pezzopane & Pedro Júnior (2003), utilizando o balanço de energia para a videira Niagara Rosada, encontraram valores médios de G variando de 5,7 a 1,3%, em relação a R_n , nos dias secos e chuvosos, respectivamente. Em superfícies sombreadas e constantemente irrigadas, o fluxo de calor no solo torna-se muito pequeno durante quase todo dia.

Zhao et al. (1996) determinaram a evapotranspiração da cultura de girassol pelos métodos de correlações turbulentas e da razão de Bowen e obtiveram a evapotranspiração da cultura, o fluxo de calor sensível armazenado pela vegetação, e acima dos fluxímetros, bem como os fluxos de calor sensível e latente. Os resultados indicaram que, apesar desses fluxos serem pequenos quando comparados a R_n , eles modificam o comportamento diurno da evapotranspiração.

Gutiérrez & Meinzer (1994) determinaram a evapotranspiração da cultura do café, irrigada por gotejamento, através BERB, utilizando uma torre de 7 m de altura, com "fetch" superior a 100 vezes a altura da cultura, sendo os gradientes de temperatura e umidade obtidas com base em medições realizadas a 5,25 e 6,50 m acima da superfície do solo. Silberstein et al. (2003) analisaram os fluxos de energia sobre uma floresta de eucalipto, com altura de 25 metros, e observaram que o calor armazenado no dossel vegetativo representa uma substancial proporção da energia disponível. Yunusa et al. (2004) quantificaram os componentes do balanço de energia em videira e obtiveram a percentagem de R_n consumida como fluxo de calor latente de 51 % como fluxo de calor sensível de 38% e como fluxo de calor no solo de 11%.

Oliver e Sene (1992) calcularam os componentes do balanço de energia por meio do método das correlações turbulentas na cultura de videiras em condições de sequeiro,

nas fases de brotação ao desenvolvimento foliar completo. Eles encontraram as frações de consumo do saldo de radiação de 45% para o fluxo de calor sensível, 28% para o fluxo de calor no solo e 27% para o fluxo de calor latente. Os autores atribuíram a baixa porcentagem de LE em relação a R_n à escassez de umidade edáfica; enquanto os elevados valores de H e G foram devido a forte advecção e ao baixo grau de cobertura da superfície pela folhagem (25%).

Há uma variedade estudos realizados aplicando a metodologia do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB) em pomares de fruteiras no Vale do rio São Francisco. Tais pesquisas têm apresentado como resultados que a maior parte da energia disponível é destinada a evapotranspiração da cultura (Teixeira, 2001; Silva, 2000; Lopes et al.; 2001; Azevedo et al.; 2003 e Soares, 2003).

Teixeira (2001) calculou os componentes do balanço de energia no primeiro ano de produção da bananeira, durante as fases fenológicas da cultura, irrigada por microaspersão. O autor obteve a seguinte partição do saldo de radiação: 87% para o fluxo de calor latente, 11% para o fluxo de calor no solo e apenas 2% para o fluxo de calor sensível. O baixo valor do fluxo de calor sensível foi atribuindo à advecção de umidade proveniente do Rio São Francisco.

Soares (2003) utilizou o BERB em parreiral de uvas sem sementes irrigado no Vale do rio São Francisco e observou que os componentes do balanço de energia são influenciados pela subdivisão do volume de controle e pelas metodologias utilizadas, exceto para o fluxo de calor sensível.

Silva (2000), utilizando o balanço de energia num pomar de mangueira na região de Petrolina, PE, concluíram que o fluxo de calor sensível representou uma fração muito pequena do saldo de radiação (5%) e que a maior parte de R_n foi consumida na forma de LE (80%). Nessa mesma linha de pesquisa, Azevedo et al. (2003) aplicaram o método do

balanço de energia com base na razão de Bowen e o método do balanço hídrico no solo em pomar de mangueiras irrigadas no Submediterrâneo São Francisco, para determinar a necessidade hídrica nas diversas fases fenológicas dessa fruteira. Eles encontraram que a evapotranspiração média do pomar foi de $4,4 \text{ mm.dia}^{-1}$, comparando os dois métodos concluíram que o método do balanço hídrico no solo é mais eficiente na medida da evapotranspiração, do que o método do balanço de energia.

O método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, quando utilizado na determinação da evapotranspiração de culturas, tem um erro associado à determinação da razão de Bowen que deve ser considerado (Angus & Watts, 1984). No entanto, os dados da razão de Bowen devem ser analisados com cautela para que haja confiabilidade na obtenção de LE e H.

Unland et al. (1996) utilizaram o critério de excluir os valores da razão de Bowen (β) próximo a -1, e também aqueles situados na faixa entre $|1+\beta| < 0,3$. Isso geralmente ocorre quando os fluxos de calor latente e sensível são aproximadamente iguais e têm sentidos opostos. Azevedo et al. (2003) verificaram um acréscimo de 17% em condições de baixa demanda energética para 38% em condições de alta demanda atmosférica, estudando os erros associados ao fluxo de calor latente em um pomar de mangueiras. Para os autores, os maiores erros ocorrem quando se observa maiores gradientes de temperatura. Para mesma cultura e região, Lopes et al. (2001) observaram que o erro relativo associados ao fluxo de calor latente varia de 5 a 30%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental e clima

O experimento de campo foi realizado em um pomar de mangueiras da variedade Tommy Atkins, na fazenda Agropecuária Boa Esperança S.A. (latitude: 9°20' S, longitude: 40°27' O, altitude: 375 m) localizada na BR 428, km 183, no município de Petrolina-PE, inserido na região do Submédio do rio São Francisco. A vista aérea da área experimental é exibida na Figura 3.1. De acordo com a classificação de Köppen o clima da região onde estava localizada a parcela experimental é do tipo BSh' (clima semi-árido), com o período chuvoso de janeiro a abril. As variáveis climatológicas da região apresentam, respectivamente, os seguintes valores máximos, médios e mínimos (Teixeira, 2001): temperatura do ar: 28,3; 26,4 e 24,8°C; totais anuais de precipitação: 1023 567 e 187,8 mm; umidade relativa do ar: 74,1; 63,7e 53,9%; evaporação do tanque classe "A" com média diária: 8,7; 7,4 e 6,0 mm/dia; velocidade do vento a 2 metros de altura: 241,1; 193,9 e 145,5 Km/dia e insolação: 8,3; 7,3 e 5,9h . A seguir será exibida a tabela com as médias mensais de algumas variáveis climatológicas da região estudada na qual está inserida a fazenda onde foi realizado o experimento de campo.

Tabela 3.1. Médias mensais climatológicas e desvios-padrão (1975-2005) da temperatura do ar (Ta), total mensal de precipitação pluvial (Pr), umidade relativa do ar (UR), insolação (n), evaporação do tanque classe “A” (Ev) e velocidade do vento (V) da estação agrometeorológica de Bebedouro.

Mês	Ta (°C)	Pr (mm)	UR (%)	N (h)	Ev (mm/dia)	V (Km/dia)
Março	26,3 ± 1,2	128,0 ± 98,5	72 ± 6	7,0 ± 1,0	6,4 ± 1,0	136,0 ± 39,1
Abril	26,0 ± 1,1	64,3 ± 46,9	73 ± 9	7,2 ± 1,0	6,2 ± 1,0	147,8 ± 29,8
Mai	25,4 ± 1,3	22,6 ± 25,9	71 ± 9	6,7 ± 1,2	6,0 ± 1,1	168,2 ± 37,5
Junho	24,3 ± 1,1	12,2 ± 14,4	70 ± 7	6,6 ± 0,8	6,0 ± 0,9	208,6 ± 34,8
Julho	23,9 ± 1,0	8,4 ± 12,8	68 ± 9	6,8 ± 1,0	6,5 ± 0,9	234,0 ± 37,6
Agosto	24,6 ± 1,0	3,7 ± 5,1	63 ± 7	8,0 ± 0,9	7,9 ± 0,7	252,4 ± 20,5
Média	25,1 ± 1,1	-	70 ± 8	7,0 ± 1,0	6,5 ± 0,9	192,2 ± 33,2
Total	-	239,2	-	-	-	-



Figura 3.1. Vista aérea da área experimental da fazenda Agropecuária Boa Esperança S.A. em Petrolina, PE.

A textura do solo da área experimental é apresentada na Tabela 3.2, para o perfil de 0 a 120 cm de profundidade. Observou-se que o solo da área experimental é predominantemente arenoso.

Tabela 3.2. Textura do solo da área experimental nas camadas 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80- 120 cm.

Camadas/ Textura	0 – 20	20 - 40	40 – 60	60 – 80	80 - 120
Areia	91,5	89,5	89,5	89,0	87,0
Silte	5,0	5,5	5,0	2,0	3,0
Argila	3,5	5,0	5,5	9,0	10,0

3.2. Cultura estudada

O experimento foi instalado em um pomar cultivado com mangueiras (*Mangifera indica*, L), variedade Tommy Atkins, com 12 anos de idade, plantado no espaçamento 5m x 10m e irrigado por microaspersão. A parcela experimental foi irrigada com base no coeficiente de cultivo proposto por Silva (2000). A coleta de dados ocorreu no período de março a agosto de 2005, envolvendo os estádios fenológicos do ciclo produtivo da mangueira. Durante o período experimental foram mantidos todos os procedimentos de tratamentos culturais adotados pela fazenda, tais como: controle de pragas e doenças; capinas; adubação (realizada pelo sistema de fertirrigação). Todos esses procedimentos foram realizados segundo normas da PIF (Produção Integrada de Frutas), que representam um conjunto de técnicas voltadas à produção de alimentos de alta qualidade.

3.3. Fenologia da mangueira

O ciclo produtivo da mangueira foi dividido em quatro estádios fenológicos, que segundo Soares et al. (1998) são distribuídos da seguinte forma: floração (20 dias), queda

de frutos (40 dias), formação de frutos (50 dias) e maturação dos frutos (10 dias). Assim, o ciclo produtivo da mangueira é de 4 meses após a indução floral . Na Tabela 3.3. são apresentadas às datas iniciais e finais de cada estágio fenológico da mangueira durante a realização deste experimento.

Tabela 3.3. Duração dos estágios fenológicos do pomar de mangueiras durante o período experimental em 2005.

Estádio fenológico	Período	Número de dias
Floração	17/04 - 07/05	20
Queda de frutos	08/05 - 17/06	40
Formação de frutos	18/06 - 07/08	50
Maturação de frutos	08/08 - 18/08	10

3.4. Instrumentação e coleta de dados

No interior da parcela experimental foi colocada uma torre micrometeorológica para a instalação dos seguintes instrumentos: dois anemômetros de conchas (modelo 03001, marca Young), em dois níveis, sendo um localizado a 0,50 m sobre a copa das plantas e o outro a 1,95 m acima da copa, para medição da velocidade vento (V); dois radiômetros (modelo CM3, marca Kipp & Zonen), a 1,95m, para medições da radiação solar incidente (R_g) e refletida (R_r) acima do dossel vegetativo; um saldo radiômetro (modelo NR lite, marca Kipp & Zonen) posicionado sobre a copa das plantas para medição do saldo de radiação (R_n); dois psicrômetros não aspirados de cobre-constantan devidamente calibrados, para medição da temperatura dos bulbos seco e úmido, situados a 0,6 e 2,9m acima do dossel vegetativo; e um sensor para medição da temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP45C, marca Campbell Scientific, Inc.). O croqui da

estação micrometeorológica instalada na área experimental com a exposição dos instrumentos utilizados na elaboração do balanço de energia é apresentado na Figura 3.2.

Foram instalados dois fluxímetros (modelo HFT3, marca Campbell Scientific, Inc.) para medições do fluxo de calor no solo (G) posicionados a 8 cm de profundidade, dois termistores (modelo 107, marca Campbell Scientific, Inc.) para medição da temperatura do solo (Ts), localizados a 2 e 6 cm de profundidade, logo acima dos fluxímetros. Também foram instaladas duas sondas de nêutrons para determinação da umidade do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm (modelo PR1/6, marca Delta), localizados a 1,5 m do tronco da planta. Os sensores de umidade e fluxo de calor no solo, bem como os termopares, para a medição da temperatura do solo, foram posicionados em uma área que dependendo do horário do dia, encontrava-se sombreada ou ensolarada pela planta.

O perfil de temperatura do ar foi medido no interior do dossel de uma planta selecionada, por meio de termopares de cobre-constantan instalados a 1,0; 2,0 e 3,0 metros de altura. Todos esses sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição e armazenamento de dados (Datalogger CR 23X, Campbell Scientific, Inc.), programado por meio de linguagem específica com varredura dos sensores a cada cinco segundos e médias armazenadas a cada 20 minutos (Figura 3.3).

A transferência de dados entre o CR23X e o computador foi realizada por meio de um módulo de armazenamento de dados (Modelo SM4M). Posteriormente os dados foram tratados em planilhas eletrônicas a fim de serem elaboradas as curvas diárias dos valores das variáveis micrometeorológicas observadas durante o período experimental. Esses dados foram utilizados para elaboração mais completa possível do balanço de energia baseado no método da razão de Bowen.

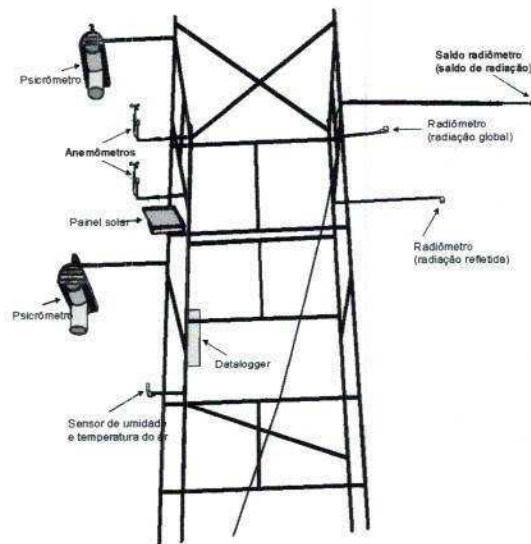


Figura 3.2. Croqui, da estação micrometeorológica instalada na área experimental com a exposição dos instrumentos utilizados na pesquisa.

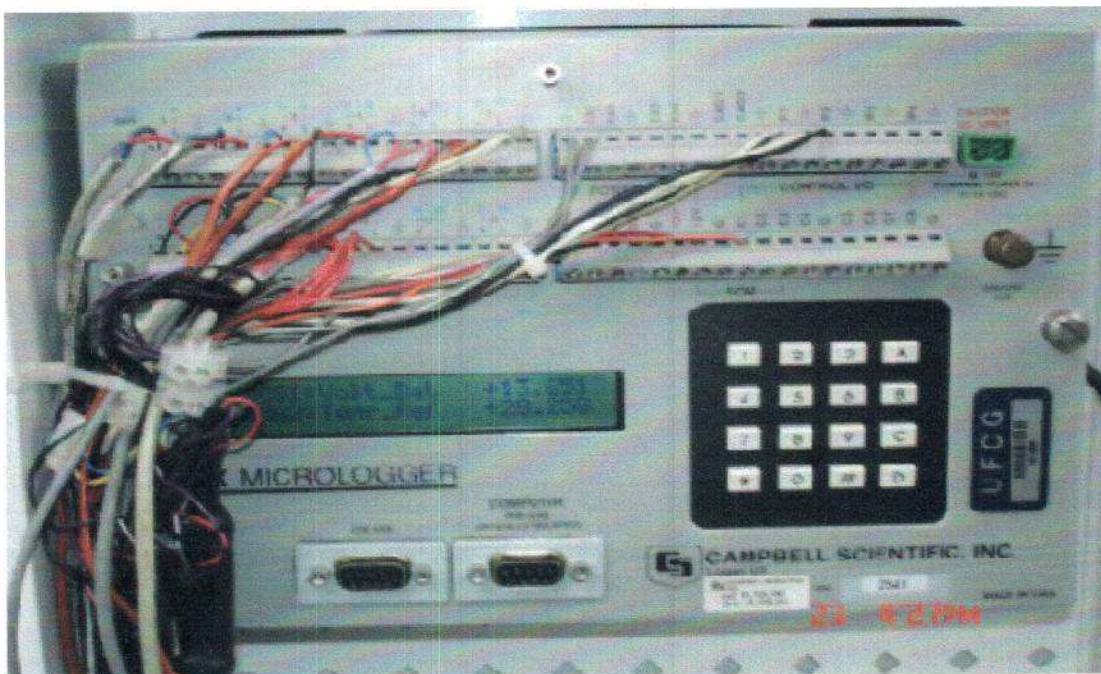


Figura 3.3. Detalhes do datalogger utilizado na pesquisa de campo com a mangueira.

3.5. Balanço de energia com base no método da razão de Bowen

Os componentes do balanço de energia sobre a vegetação foram obtidos por meio da equação do balanço de energia com base na razão de Bowen de acordo com a seguinte expressão (Rosenberg et al., 1983):

$$R_n + LE + H + G + S + P \quad (1)$$

em que R_n é o saldo de radiação (energia disponível ao sistema analisado), LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente; G é o fluxo de calor no solo, S é a energia armazenada no dossel vegetativo e P é a energia utilizada no processo fotossintético que não foi considerada, visto que representa menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al., 1994). Todos os termos da Equação (1) são expressos em $W m^{-2}$. O balanço de energia foi efetuado sobre o dossel da mangueira assumindo-se como volume de controle que compreende profundidade de 8 cm do solo e a altura do psicrômetro mais alto (1,95m). Foram também consideradas que as densidades de fluxo vertical que chegam à camada vegetativa são positivas, enquanto as que saem são negativas. A seguir, serão descritos os métodos pelos quais foram determinados os componentes da equação do balanço de energia.

3.5.1. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE) é o calor utilizado na mudança de fase da H_2O na forma líquida para gasosa, utilizando a energia proveniente do sol. O LE foi obtido substituindo-se a razão de Bowen na equação (1), ou seja:

$$LE_1 = \frac{R_n + G_{cc} + S}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$LE_2 = \frac{R_n + G_{sc} + S}{1 + \beta} \quad (3)$$

A equação acima permite a estimativa do fluxo de calor latente com base em medições no fluxo de calor sensível para o solo com correção (G_{cc}) - Equação 2 - e sem correção (G_{sc}) - Equação 3. O termo β , que é a razão de Bowen (adimensional), corresponde à fração de energia entre os fluxos de calor sensível e calor latente, obtida como:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{P_{CP}}{L} \left(\frac{K_h}{K_w} \right) \frac{\partial T / \partial Z}{\partial e / \partial Z} = \gamma \left(\frac{K_h}{K_w} \right) \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (4)$$

em que H e LE são os fluxos de calor sensível e latente, respectivamente; P a pressão atmosférica (kPa); K_h e K_w são, respectivamente, os coeficientes de transferência nos processos de difusão turbulenta de calor sensível e latente, expressos em m^2s^{-1} , e γ o fator psicrométrico ($hPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), obtido pela expressão:

$$\gamma = \frac{\bar{P} c_p}{0,662L} \quad (5)$$

em que $C_p = 0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$, representa o calor específico do ar à pressão constante, \bar{P} a pressão atmosférica média à superfície (hPa) e L o calor latente de vaporização (cal.g^{-1}) obtido por (Wright, 1982) como:

$$L = 595 - 0,51T_a \quad (6)$$

em que T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$). Considerando-se a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_h) e calor latente (K_w) e $(\partial T/\partial Z)/(\partial e_a/\partial Z) \approx \Delta T/\Delta e_a$; sendo $\Delta T = T_2 - T_1$ e $\Delta e_a = e_2 - e_1$ as variações de temperatura do ar e pressão de vapor d'água na camada de ar acima da copa da árvore, respectivamente. A equação 4 é simplificada em:

$$\beta \approx \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (7)$$

A pressão parcial de vapor d'água em dois níveis acima da copa da planta foi calculada pela equação de Ferrel, expressa da seguinte forma:

$$e(t_a) = e_s(t_u) - 0,00066(1 + 0,00115t_u)(t_a - t_u)\bar{P} \quad (8)$$

em que t_u e t_a são as temperatura dos bulbos úmido e seco, respectivamente, expressas em $^{\circ}\text{C}$, \bar{P} a pressão atmosférica média (hPa) e $e_s(t_u)$ é a pressão de saturação do vapor d'água (hPa), que foi calculada pela equação de Tetens, apresentada por Rosenberg et al. (1983), como:

$$e_s(t_u) = 6,1078 \exp\left(\frac{17,269t_u}{237,3 + t_u}\right) \quad (9)$$

Os valores de β passaram pela análise de consistência de dados conforme estabelecido por Unland et al (1996). Tal procedimento ocorreu quando β aproximou-se de -1 o que resultaria em valores incorretos de LE.

3.5.2. Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível (H), que representa o fluxo destinado ao aquecimento ou resfriamento da superfície e do ar atmosférico, foi obtido como resíduo da Equação 1, ou seja:

$$H_1 = -(R_n + LE_1 + G_{cc} + S) \quad (10)$$

$$H_2 = -(R_n + LE_2 + G_{sc} + S) \quad (11)$$

Todos os termos das equações acima já foram descritos anteriormente.

3.5.3. Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo (G) é a quantidade de energia armazenada no solo. Neste trabalho, os fluxímetros foram posicionados a 8,0 cm de profundidade e o calor armazenado acima deles foi obtido da seguinte forma (Kustas et al., 2000):

$$G = G_p + \frac{\Delta T_s C_s D}{t} \quad (12)$$

em que G_p é a medição de fluxo de calor no solo pelo fluxímetro, ΔT_s é a variação média da temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, D é a profundidade da placa, “ t ” é o período da medição em minutos e C_s é a capacidade calorífica volumétrica do solo, que foi obtida pela expressão:

$$C_s = \rho_s (C_{sd} + C_{sw} \theta_v) \quad (13)$$

em que ρ_s é a densidade do solo (g cm^{-3}), determinada em laboratório; C_{sd} é o calor específico do solo seco ($\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); C_{sw} é o calor específico da água no solo ($\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) e θ_v é a umidade do solo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) que foi obtida pelas média semanais coletadas por meio de perfil de umidade do solo. O equipamento utilizado nessas medições foi a sonda PR1/6 (Delta), que mede a umidade volumétrica em diferentes profundidades no perfil do solo. A equação de calibração generalizada para solo mineral é dada a seguir:

$$\theta = -0,086 + 0,505V_{out} + 7,81V_{out}^2 - 32,46V_{out}^3 + 47,96V_{out}^4 \quad (14)$$

em que V_{out} é a umidade do solo expressa em Volts.

3.5.4. Calor armazenado pelo dossel vegetativo da planta

Em geral, o calor armazenado pelo dossel vegetativo da planta não é considerado no cômputo do balanço de energia, com o argumento de que esse termo representa menos do que 2% do saldo de radiação. Entretanto, em culturas com grande massa foliar, como no caso da mangueira ou de outras culturas de grande porte, esse termo pode consumir uma quantidade considerável da energia disponível e, caso ele seja ignorado, pode acarretar erros apreciáveis no balanço de energia. Assim, na presente pesquisa esse termo foi calculado com base em medidas do gradiente de temperatura do ar, em três níveis, ou seja, a 1, 2 e 3 m da superfície do solo, totalizando duas camadas no interior do dossel vegetativo da mangueira, pela seguinte equação (McCaughey, 1985):

$$S = \frac{\left(\sum \rho_a C_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \right)_{j+1} - \left(\sum \rho_a C_p \Delta h \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \right)_j}{1200} \quad (15)$$

em que ρ_{ar} é a densidade do ar ($1,3 \text{ kg m}^{-3}$), C_p é calor específico do ar a pressão constante ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), Δh é distância vertical entre os sensores de medidas (1 m), T_i é a temperatura do ar numa altura “i” e “j” representa cada instante em que se calculou a temperatura média da camada de ar. Assim, obteve-se a energia térmica do ar nesse instante em cada uma das camadas do dossel vegetativo. O calor armazenado no dossel do pomar de mangueiras foi obtido pela diferença entre as somas das energias térmica de cada uma das camadas, estimadas entre cada intervalo de 20 minutos, dividindo-se o resultado pelo tempo em segundos, ou seja, 1200s.

3.5.5. Análise estatística

Os valores médios das densidades de fluxos de energia (R_n , LE, H, e G) e da evapotranspiração (ET_c) do pomar de mangueiras, obtidos com base no calor armazenado acima das placas de fluxo de calor no solo e sem considerar o armazenamento desse calor acima do fluxímetro, foram avaliados pelo teste t-Student em nível de 5% de probabilidade. Estabeleceu-se a hipótese nula como sendo que não existe diferença significativa entre as médias e a hipótese alternativa foi aquela que efetivamente existe diferença significativa entre as médias nesse nível de probabilidade. A estatística do teste é a seguinte:

$$t = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\frac{m}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}} \quad (13)$$

em que:

n é o tamanho da amostra de dados da variável micrometeorológica;

μ_1 e σ_1 são, respectivamente, a média aritmética e variância da variável micrometeorológica obtida com base no calor armazenado acima dos fluxímetros;

μ_2 e σ_2 são, respectivamente, a média aritmética e variância da variável micrometeorológica obtida sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros;

Em nível de 5% de probabilidade, se a estatística t for menor do que 1,96 aceita-se a hipótese nula, ou seja, não há diferença significativa entre as médias. Por outro lado, se t for maior do que 1,96, rejeita-se a hipótese nula, logo as médias são estatisticamente diferentes em nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção os resultados são expostos e discutidos de acordo com a metodologia utilizada. A análise do comportamento diurno do saldo de radiação, dos fluxos convectivos de calor latente e sensível, do fluxo de calor no solo com e sem correção e do calor armazenado no dossel vegetativo, pelo método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, além da evapotranspiração da mangueira, são apresentados nas subseções seguintes.

4.1. Análise da variação temporal dos componentes do balanço de energia

Para cada um dos estádios fenológicos da mangueira foram analisadas as variações diurnas dos componentes do balanço de energia da mangueira. O fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H) foram obtidos com base no fluxo de calor no solo (G) mediante duas condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (G_{cc}); (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (G_{sc}). Foram ainda calculadas as médias da variação diurna de cada componente do balanço de energia para

cada um dos estádios fenológicos da mangueira. Por último, analisou-se o comportamento sazonal do balanço de energia para todo o ciclo produtivo da frutífera.

As densidades de fluxo de energia foram calculadas para o período diurno, ou seja, no período em que o saldo de radiação (R_n) foi positivo. Esse procedimento também foi adotado por Heilman & Brittin (1989), Lopes (1999), Silva (2000), Azevedo et al.; (2003). As Figuras 4.1a e 4.1b exibem o balanço de energia para o dia 01/05/2005, com a correção (G_{cc}) e sem a correção (G_{sc}) do fluxo de calor no solo, na fase de floração da mangueira. A intensa variabilidade de R_n sugere que nesse dia houve também alta variabilidade na nebulosidade. Os pontos máximos de R_n e LE ocorreram logo após o meio-dia com valores, respectivamente de 400 e 300 $W m^{-2}$. O fluxo de calor armazenado no dossel (S), em ambas as figuras, e G_{sc} são muito próximos de zero, com valor médio de $-1,42 W m^{-2}$; entretanto, G_{cc} tem seus valores bem mais elevados durante todo o período diurno. Independentemente da forma de obtenção de G, os fluxos de LE e H variaram bastante por conta do saldo de radiação, que por sua vez também variou em função da nebulosidade. Os valores médios dos fluxos S, G_{cc} e G_{sc} no dia 01/05/2005 foram 0,28; $-4,14$ e $-1,42 W m^{-2}$, respectivamente. Assim, G_{sc} representa apenas 16,25% de G_{cc} . Os balanços de energia para o dia 15/06/2005, representativos do estágio fenológico de queda de frutos, mediante as condições dos fluxos de G_{cc} e G_{sc} são exibidos nas Figuras 4.2a e 4.2b, respectivamente. O valor máximo de R_n superou 500 $W m^{-2}$ após o meio-dia. O valor do fluxo de G_{cc} é superior G_{sc} (Figura 4.2a e 4.2b). O fluxo de H é próximo do fluxo de LE em alguns instantes do dia. Os valores médios dos fluxos de S, G_{cc} e G_{sc} foram 0,37; $-19,0$ e $-0,56 W m^{-2}$, respectivamente.

No estágio fenológico de formação de frutos, conforme se verifica no balanço de energia do dia 30/06/2005, os fluxos de R_n e LE exibiram um comportamento suavizado, em consequência da condição de céu-claro, exceto nos instantes iniciais, pouco depois do

meio-dia e no final do período analisado (Figura 4.3). Os valores máximos de R_n e LE foram 600 e 400 W m^{-2} , respectivamente, e ocorreram próximos ao meio-dia. Os fluxos de H, em ambas as figuras, demonstraram uma breve variação no início do período estudado e, em seguida, decresceram até atingir valores próximos de zero no final do período. Os valores médios dos fluxos de S, G_{cc} e G_{sc} foram $0,66$; $-21,12$ e $-3,21 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

No dia 09/08/2005, representativo do estágio de maturação de frutos, o comportamento de R_n e LE foram típicos de dia com céu-claro, sendo seus valores suavizados durante todo o período diurno, com valores médios dos fluxos S, G_{cc} e G_{sc} de $0,74$; $-41,9$ e $-1,75$ (Figura 4.6).

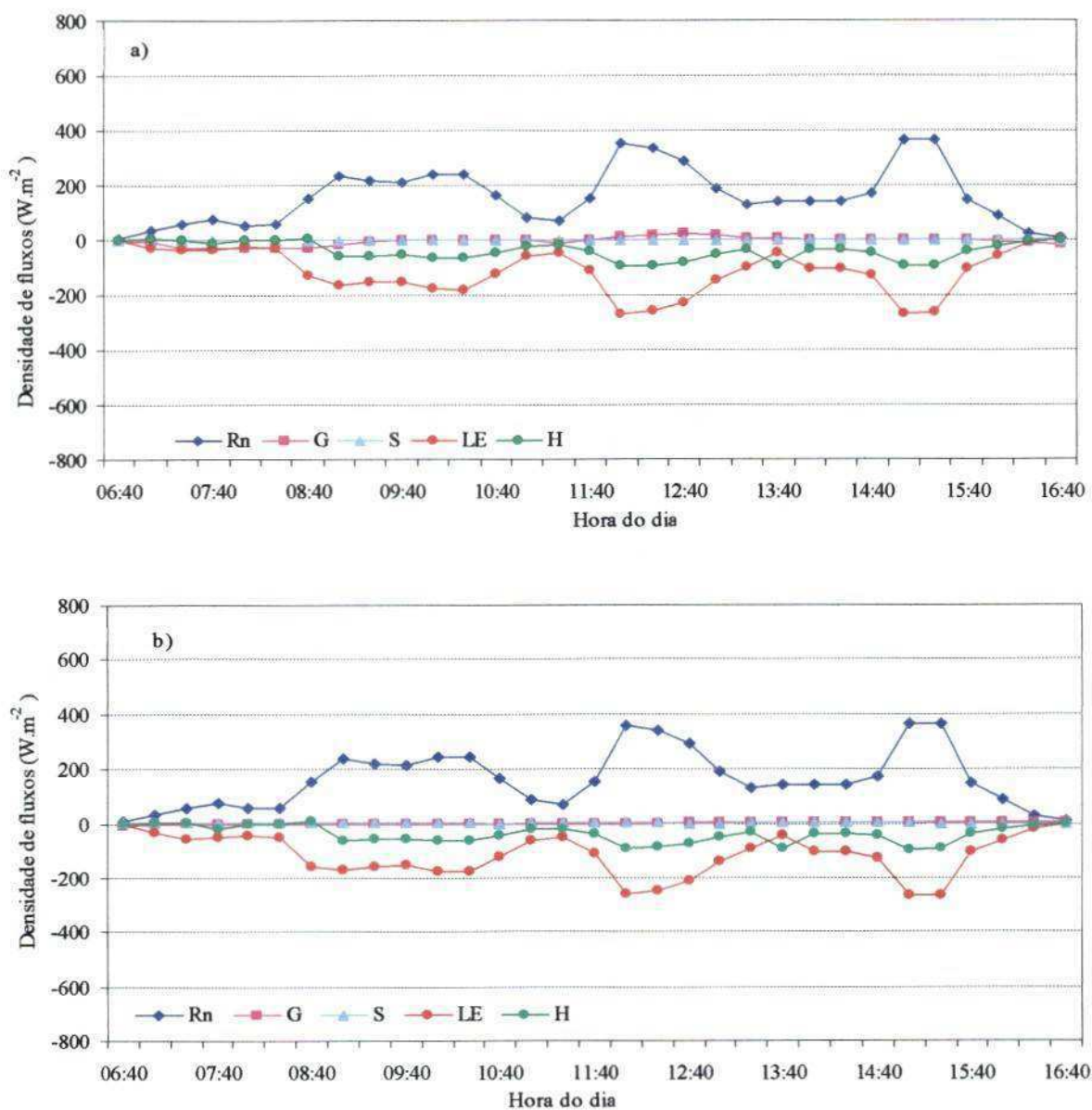


Figura 4.1. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estádio fenológico de floração da mangueira irrigada, realizado para o dia 01/05/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

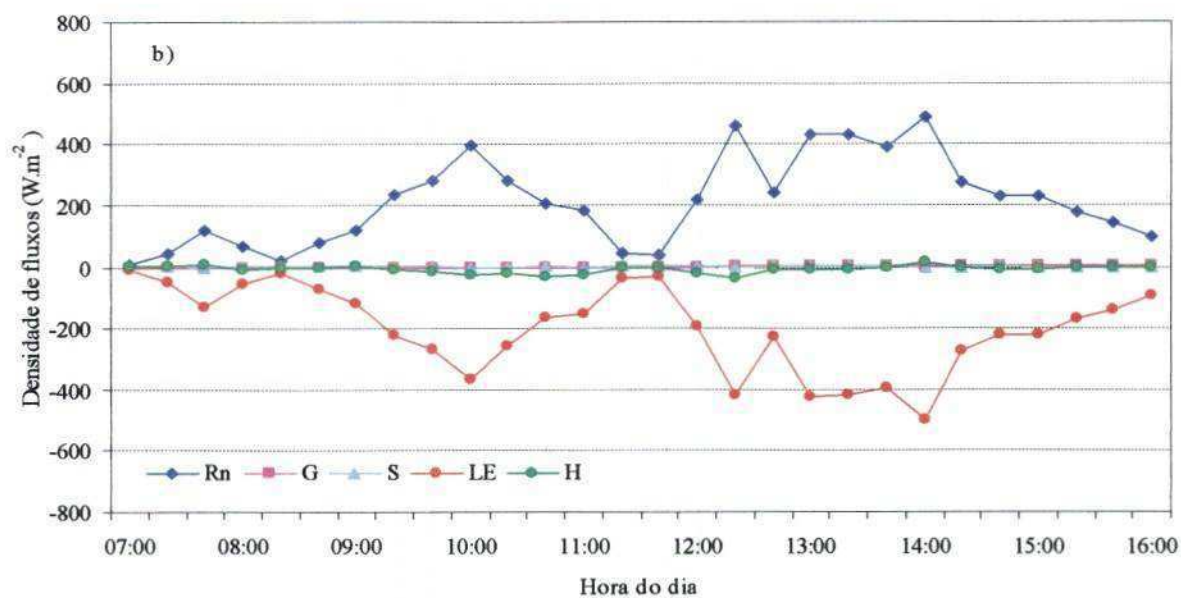
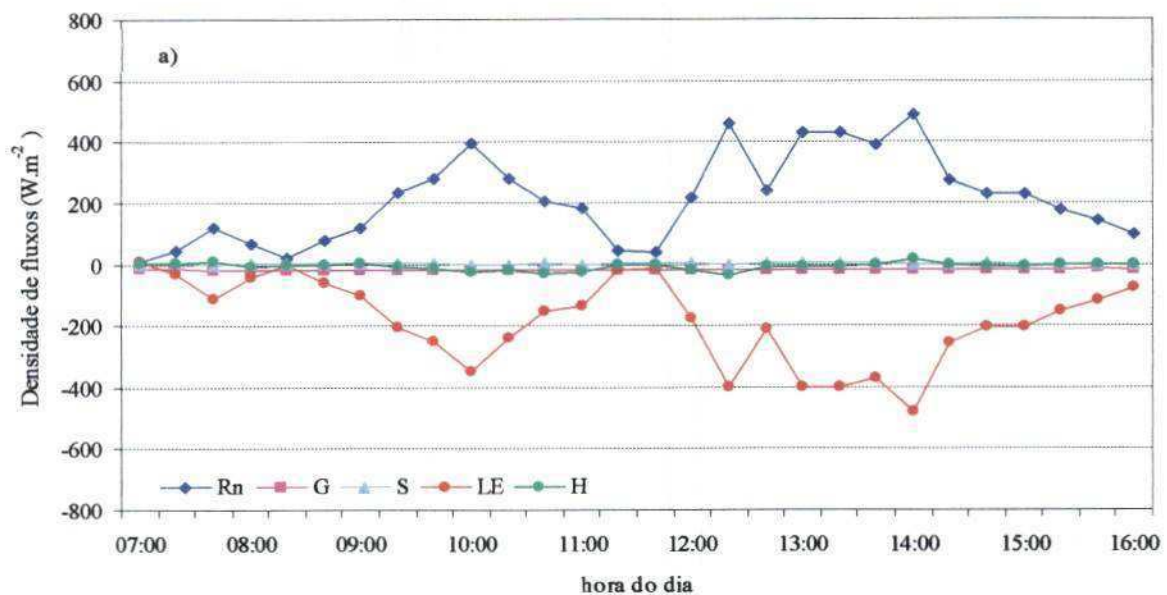


Figura 4.2. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de queda de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 15/06/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

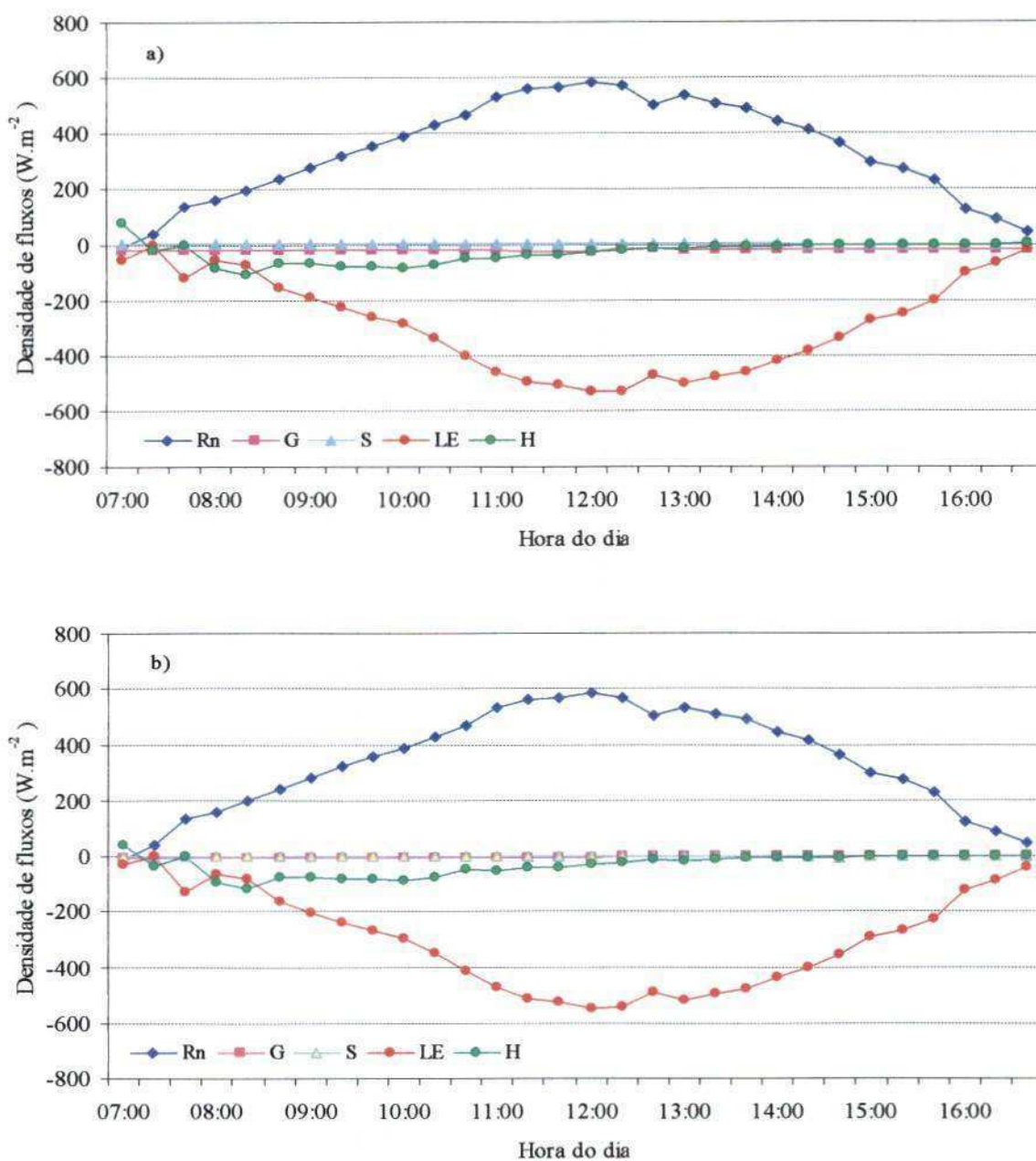


Figura 4.3. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de formação de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 30/06/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

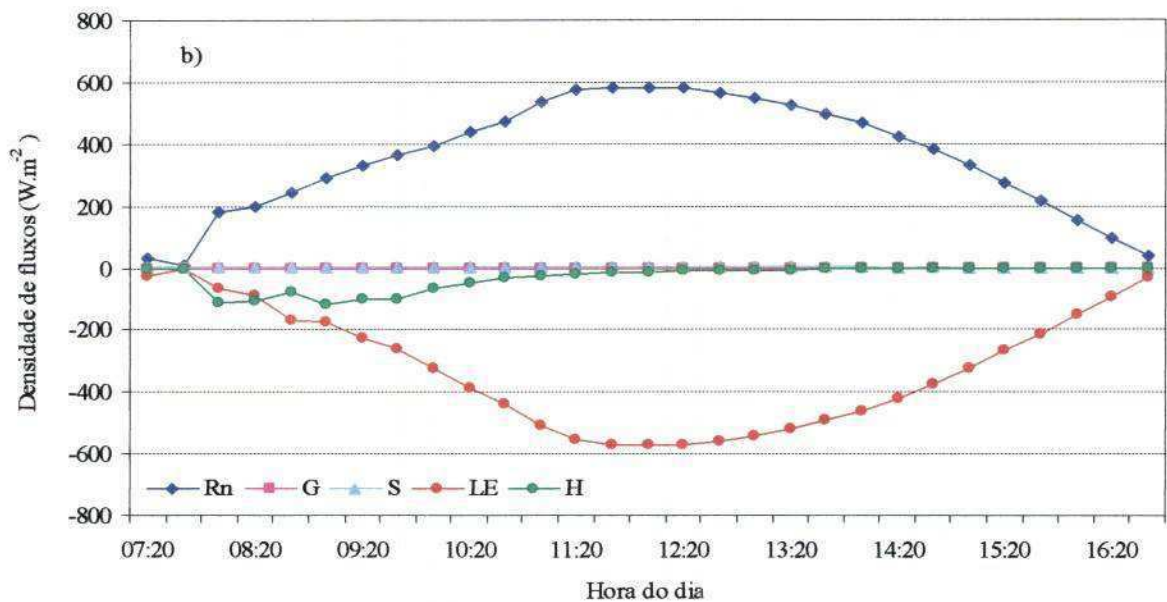
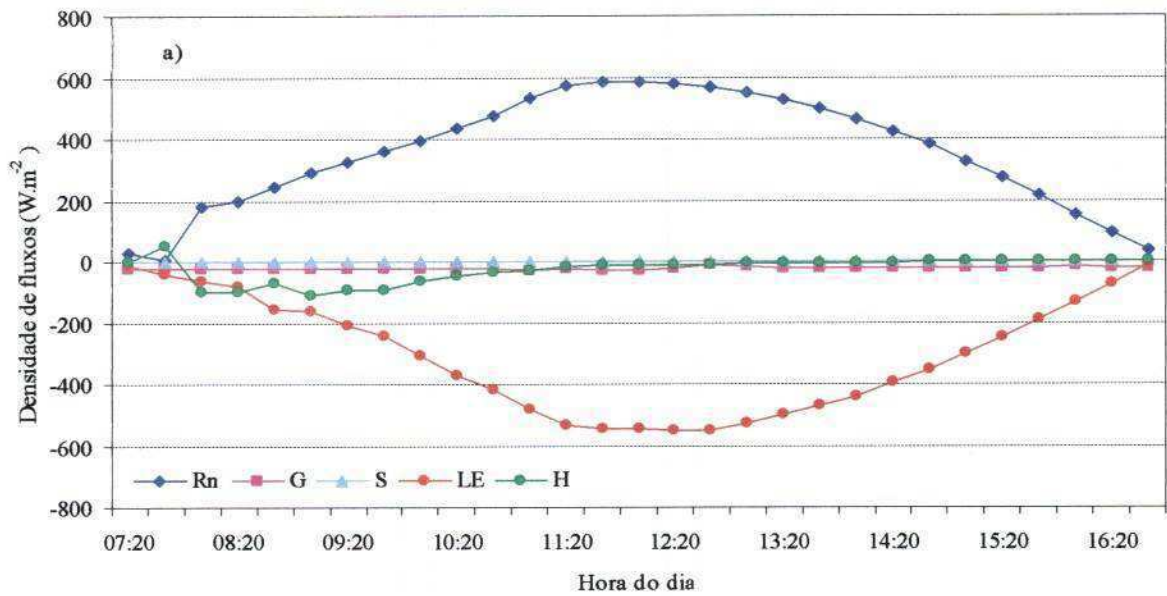


Figura 4.4. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de formação de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 18/07/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

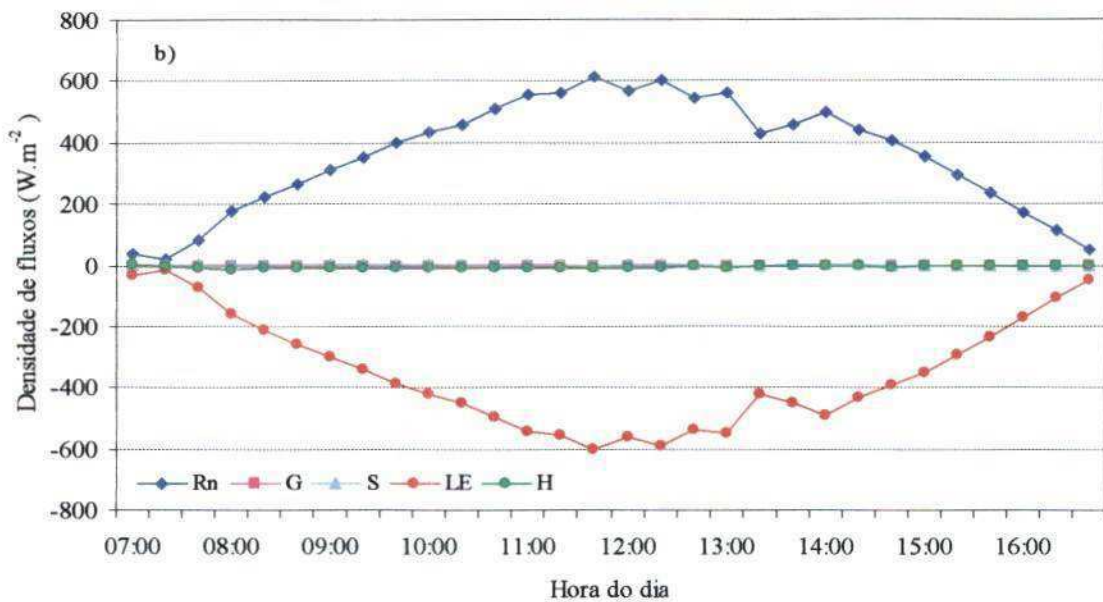
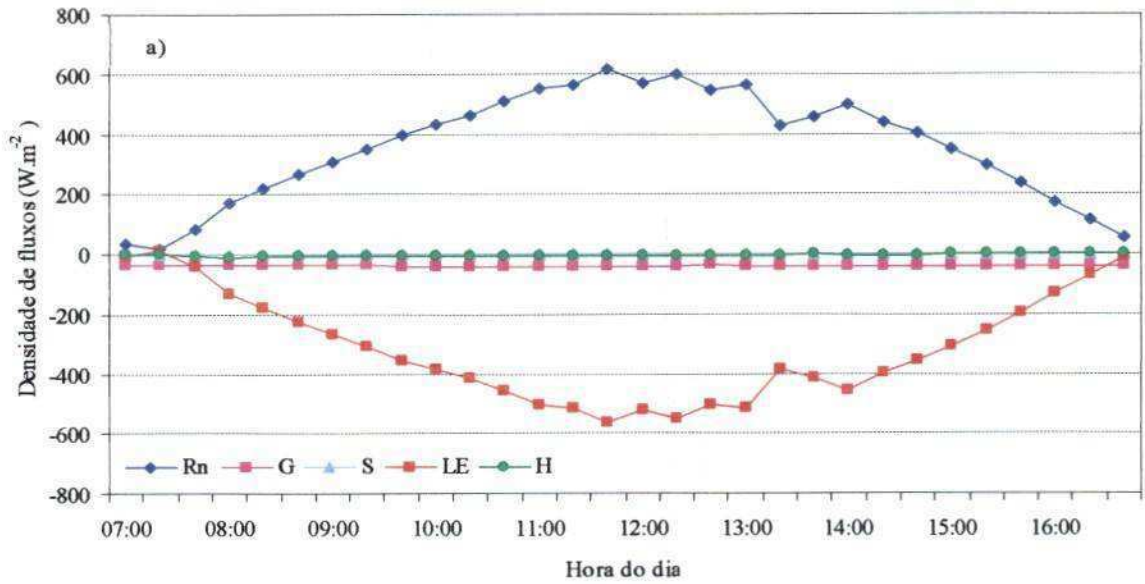


Figura 4.5. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de maturação de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 08/08/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

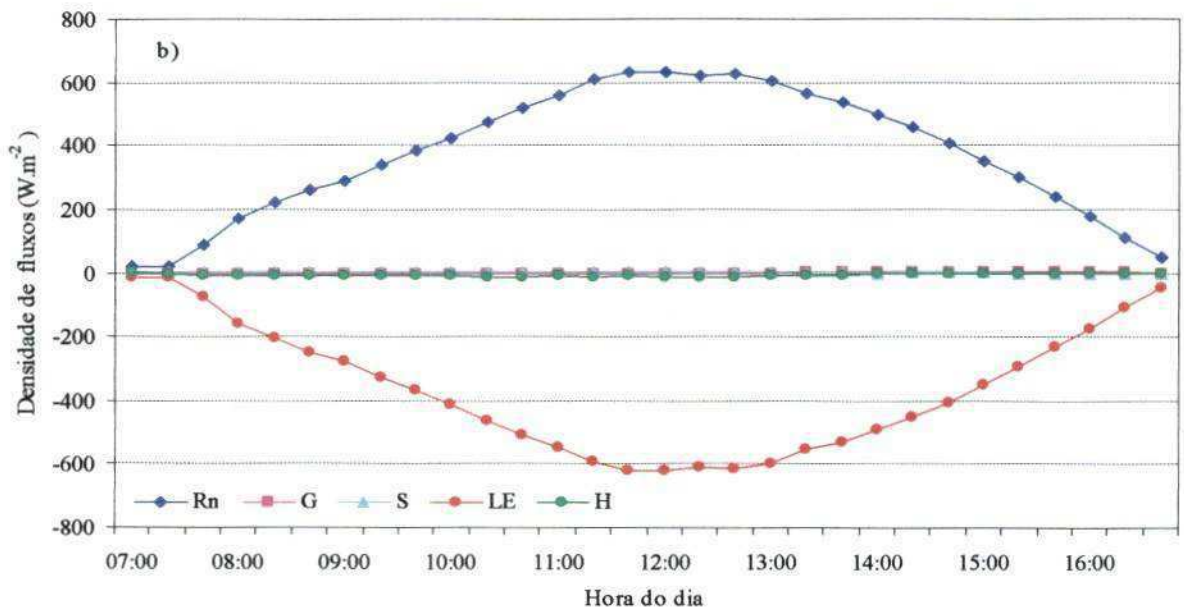
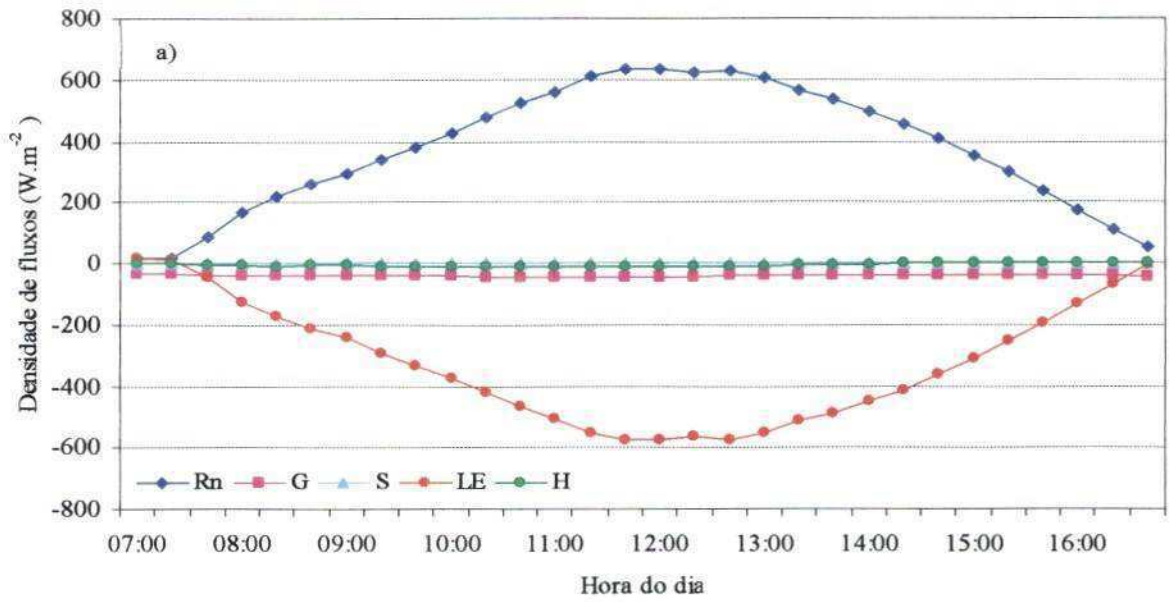


Figura 4.6. Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico maturação de frutos da mangueira irrigada, realizado para o dia 09/08/2005, mediante as condições: (i) considerando-se o calor armazenado acima dos fluxímetros (a); e (ii) sem considerar o calor armazenado acima dos fluxímetros (b).

Nesse dia o valor máximos de R_n , LE, H, G_{cc} e S foram 650,30; -575,6; -13,7; -46,54 e 2,31 $W m^{-2}$, respectivamente, e ocorreram também próximos ao meio-dia. Por outro lado, as médias de R_n , LE, H, G_{cc} , G_{sc} e S foram 372,48; -324,94; -6,39; -41,90; -1,75 e 0,74 $W m^{-2}$, respectivamente. O fluxo de H foi muito baixo durante todo o período diurno.

Os fluxos de LE e R_n apresentaram valores muito próximos ao meio-dia, bem como uma ou duas horas depois. Resultados semelhantes foram obtidos por Burba et al. (1997), em condições atmosféricas de pouca nebulosidade. O fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}) foi sempre superior àquele sem correção (G_{sc}) em todos os estádios fenológicos da mangueira. O fluxo de calor armazenado no dossel da planta foi muito pequeno, também para todos os estádios fenológicos.

4.2. Partição dos componentes do balanço de energia

As partições do saldo de radiação (R_n), nas demais densidades de fluxo, com G_{cc} e G_{sc} são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. Essas partições dos fluxos foram obtidas por meio do balanço de energia diurno elaborados para 14 dias distribuídos ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.

Quando o balanço de energia foi realizado com G_{cc} , a média da partição do saldo de radiação nas demais densidades de fluxos, referente aos 14 dias de observação, foi distribuída da seguinte forma: $LE/R_n = 78,51\%$; $G_{cc}/R_n = 7,46\%$; $H/R_n = 14,20\%$ e $S/R_n = 0,16\%$ (Tabela 4.1). Por outro lado, quando os balanços de energia foram calculados sem G_{sc} , a partição do saldo de radiação foi a seguinte: $LE/R_n = 84,02\%$; $G_{sc}/R_n = 1,42\%$; $H/R_n = 14,69\%$ e $S/R_n = 0,16\%$ (Tabela 4.2). Assim, pode-se observar que o consumo de R_n na forma de calor armazenado no dossel não apresentou variação significativa, representando

uma pequena contribuição no cálculo do balanço de energia, e as taxas de H/R_n foram basicamente iguais. Entretanto, o consumo de R_n utilizando-se G_{cc} foi bastante superior (7,46%) àquela G_{sc} (1,42%). A taxa LE/R_n com G_{cc} foi apenas 6,55% menor do que a taxa LE/R_n com G_{sc} .

Tabela 4.1. Partições do saldo de radiação (R_n) em fluxos de calor latente (LE), calor sensível para o ar (H) e fluxo de calor do solo com correção (G_{cc}) e de calor armazenado no dossel vegetativo (S) em 14 dias durante o período experimental.

Data	LE/R_n (%)	G_{cc}/R_n (%)	H/R_n (%)	S/R_n (%)
01/5/2005	69.18	5.47	25.52	-0.17
04/5/2005	69.09	9.41	21.61	-0.11
05/5/2005	62.33	4.54	33.23	-0.11
06/5/2005	65.75	3.36	31.01	-0.13
14/5/2005	56.10	4.40	39.62	-0.13
15/5/2005	87.26	8.99	3.92	-0.18
30/6/2005	85.26	6.26	8.68	-0.20
01/7/2005	85.35	6.70	8.12	-0.17
04/7/2005	85.46	8.62	6.09	-0.17
05/7/2005	84.32	7.34	8.49	-0.14
18/7/2005	86.36	6.41	7.46	-0.23
06/8/2005	87.64	10.59	1.96	-0.18
08/8/2005	87.78	11.05	1.37	-0.20
09/8/2005	87.24	11.25	1.71	-0.20
Média	78.51	7.46	14.20	-0.16
Desvio-padrão	11,30	2,58	13,19	0,04

Os valores médios dos componentes do balanço de energia da partição do saldo de radiação nas demais densidades de fluxos, em dias representativos de cada estágio fenológico do pomar de mangueiras, com G_{cc} e G_{sc} são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente. No período estudado, os valores médios do fluxo de calor latente e do

saldo de radiação, apresentaram comportamento crescente ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras; bem como o fluxo de calor sensível apresenta-se decrescente, exceto no estágio fenológico de queda de frutos.

Tabela 4.2. Partições do saldo de radiação (R_n) em fluxos de calor latente (LE), calor sensível para o ar (H) e fluxo de calor do solo sem correção (G_{sc}) e de calor armazenado no dossel vegetativo (S) em 14 dias durante o período experimental.

Data	LE/R_n (%)	G_{sc}/R_n (%)	H/R_n (%)	S/R_n (%)
01/5/2005	73.66	0.89	25.63	-0.17
04/5/2005	76.23	1.49	22.38	-0.10
05/5/2005	62.33	4.54	33.23	-0.11
06/5/2005	67.03	1.15	31.94	-0.13
14/5/2005	58.54	0.69	40.89	-0.13
15/5/2005	95.52	0.27	3.92	-0.18
30/6/2005	89.57	0.95	9.67	-0.20
01/7/2005	85.35	6.70	8.12	-0.17
04/7/2005	92.76	0.84	6.56	-0.17
05/7/2005	90.85	0.19	9.10	-0.14
18/7/2005	91.14	0.51	8.58	-0.23
06/8/2005	97.59	0.42	2.18	-0.18
08/8/2005	97.91	0.73	1.56	-0.20
09/8/2005	97.82	0.47	1.91	-0.20
Média	84.02	1.42	14.69	-0.16
Desvio-padrão	13,32	1.79	12,87	0,04

Evidentemente, nas duas formas de cálculo do balanço de energia, as médias de R_n e S permaneceram inalteradas. Entretanto, as médias das demais densidades de fluxo foram diferentes, em especial aquelas referentes à G_{cc} (23,7%) e G_{sc} (2,0%). Tal como na análise dos 14 balanços de energia, a média das taxas S/ R_n ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras permaneceu constante e a taxa H/ R_n foi muito próximas nas duas condições

de elaboração do balanço de energia. Por outro lado, as taxas médias de G_{cc}/R_n e G_{sc}/R_n foram 7,8 e 1,2%, respectivamente; portanto, são muito diferentes.

Independentemente da forma de cálculo do balanço de energia, o menor consumo de R_n na forma de LE ocorreu no estágio fenológico de floração e o maior no estágio de maturação (Tabelas 4.3 e 4.4). Resultados semelhantes foram encontrados por Mokate et al. (1995) com a cultura de trigo e por Silva (2000) em pesquisa realizando-a com a mangueira na região do Submédio rio São Francisco.

Tabela 4.3. Valores médios dos componentes do balanço de energia (R_n , LE, H, G_{cc} e S) e da partição do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor latente (LE/R_n), calor sensível do ar (H/R_n), fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}/R_n) e calor armazenado no dossel da planta (S/R_n) em dias representativos de cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.

Estádios	R_n	LE	H	G_{cc}	S	LE/R_n	G_{cc}/R_n	H/R_n	S/R_n
	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	%	%	%	%
Floração de frutos	209.7	-139.2	-58.6	-12.1	0.3	66.6	5.7	27.8	0.1
Queda de frutos	267.8	-183.2	-68.4	-16.6	0.4	71.7	6.7	21.8	0.2
Formação de frutos	329.3	-282.6	-22.2	-25.2	0.6	85.7	7.7	6.8	0.2
Maturação	364.7	-319.1	-5.6	-40.7	0.7	87.5	11.1	1.5	0.2
Média	292.9	-231.0	-38.7	-23.7	0.5	77.9	7.8	14.5	0.2
Desvio-padrão	68,4	83,9	29,7	12,6	0,2	10,3	2,3	12,4	0,1

A parte de LE em R_n no balanço de energia, considerando-se G_{cc} , foram em média 7,3% inferior, a taxa de consumo de LE quando o mesmo foi realizado considerando-se G_{sc} . Esses resultados sugerem que o valor obtido do fluxo de calor latente é bastante afetado pelo fluxo de calor no solo utilizando o cálculo do balanço de energia. Entretanto, o fluxo de calor sensível varia pouco e o calor armazenado do dossel da planta permanece inalterado, considerando ou não o calor armazenado acima dos fluxímetros, pois o mesmo não depende do fluxo de calor no solo.

Tabela 4.4. Valores médios dos componentes do balanço (R_n , LE, H, G_{sc} e S) e da partição do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor latente (LE/ R_n), calor sensível do ar (H/ R_n), fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}/R_n) e calor armazenado no dossel da planta (S/ R_n) em dias representativos de cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.

Estádios	R_n	LE	H	G_{sc}	S	LE/ R_n	G_{sc}/R_n	H/ R_n	S/ R_n
	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	%	%	%	%
Floração de frutos	209.7	-147.0	-60.3	-2.6	0.3	69.8	2.0	28.3	0.1
Queda de frutos	267.8	-196.9	-70.5	-1.4	0.4	77.0	0.5	22.4	0.2
Formação de frutos	329.3	-303.8	-24.4	-1.8	0.6	91.2	1.6	7.4	0.2
Maturação	364.7	-365.9	-6.4	-2.0	0.7	97.9	0.6	1.7	0.2
Média	292.9	-253.4	-40.4	-2.0	0.5	84.0	1.2	15.0	0.2
Desvio-padrão	68,4	99,5	30,1	0,5	0,2	12,9	0,7	12,5	0,1

4.3. Análise do fluxo de calor no solo e calor armazenado na copa da planta

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios diários do fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}), do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e do calor armazenado no dossel da planta (S) em 14 dias durante o período experimental. A média e o desvio-padrão G_{cc} , nesse período, foi $22,44 \pm 11,14 W m^{-2}$ e G_{sc} foi $2,01 \pm 0,86 W m^{-2}$. Assim, G_{sc} representou uma pequena fração do G_{cc} , ou seja, apenas 7,7%. Já a média do fluxo de calor armazenado no dossel vegetativo das plantas foram $0,49 \pm 0,20 W m^{-2}$. Por outro lado, a Tabela 4.6 exibe os valores médios do fluxo de calor no solo e calor armazenado no dossel da planta, nas mesmas condições anteriores, em cada estágio fenológico do pomar de mangueiras. Os valores médios e os desvios-padrão de G_{sc} , G_{cc} e S foram $-18,71 \pm 5,63$;

-1,86 ± 0,52 e 0,44 ± 0,15, respectivamente. Portanto, a ordem de grandeza desses valores é semelhante daquela obtida para a média de 14 dias durante o período experimental.

Os valores médios dos componentes do balanço de energia para os dois períodos analisados (14 dias do período experimental e dias representativos dos estádios fenológicos), exceto para os fluxos de calor no solo, não apresentaram diferença estatisticamente em nível de 5% de probabilidade pelo teste t-student.

Tabela 4.5 Valores médios diários do fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}), do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e do calor armazenado no dossel da planta (S) em 14 dias durante o período experimental.

Data	G_{cc} $W m^{-2}$	G_{sc} $W m^{-2}$	S $W m^{-2}$
01/5/2005	-8.74	-1.42	0.28
04/5/2005	-21.76	-3.45	0.25
05/5/2005	-10.50	-3.02	0.25
06/5/2005	-7.28	-2.50	0.27
14/5/2005	-14.28	-2.25	0.42
15/5/2005	-19.00	-0.56	0.37
30/6/2005	-21.12	-3.21	0.66
01/7/2005	-23.00	-1.72	0.58
04/7/2005	-20.45	-2.00	0.40
05/7/2005	-23.83	-0.62	0.47
18/7/2005	-22.81	-1.80	0.81
06/8/2005	-39.95	-1.58	0.70
08/8/2005	-39.49	-2.29	0.70
09/8/2005	-41.90	-1.75	0.74
Média	-22.44	2.01	0.49
Desvio-padrão	11,14	0,86	0,20

Tabela 4.6. Valores médios do fluxo de calor no solo com correção (G_{cc}), fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e calor armazenado no dossel da planta (S) em cada estágio fenológico do pomar de mangueiras.

Estádios fenológicos	Data	G_{cc} $W m^{-2}$	G_{sc} $W m^{-2}$	S $W m^{-2}$
Floração de frutos	17/04 – 07/05	-12.07	-2.60	0.26
Queda de frutos	08/05 – 17/06	-16.64	-1.41	0.40
Formação de frutos	18/06 – 07/08	-25.19	-1.82	0.60
Maturação de frutos	08/08 – 18/08	-40.70	-2.00	0.70
Média	–	-18.71	-1.86	0.44
Desvio-padrão	–	5,63	0,52	0,15

De acordo com o teste t-student os valores médios de G_{cc} e G_{sc} durante os 14 dias do período experimental, as médias desses valores dos estádios fenológicos são estatisticamente diferentes em nível de 5% de probabilidade.

A Figura 4.7 exhibe o comportamento G_{sc} e G_{cc} ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras. Observa-se que G_{sc} manteve-se estacionário durante todo o período analisado, enquanto G_{cc} exibiu grande variabilidade, com comportamento decrescente no final do ciclo produtivo da mangueira. Por outro lado, a Figura 4.8 exhibe a variação do fluxo de calor armazenado no dossel das plantas ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras. Constatam-se valores muito pequenos, inferiores até a $1 W m^{-2}$, durante todo o período analisado.

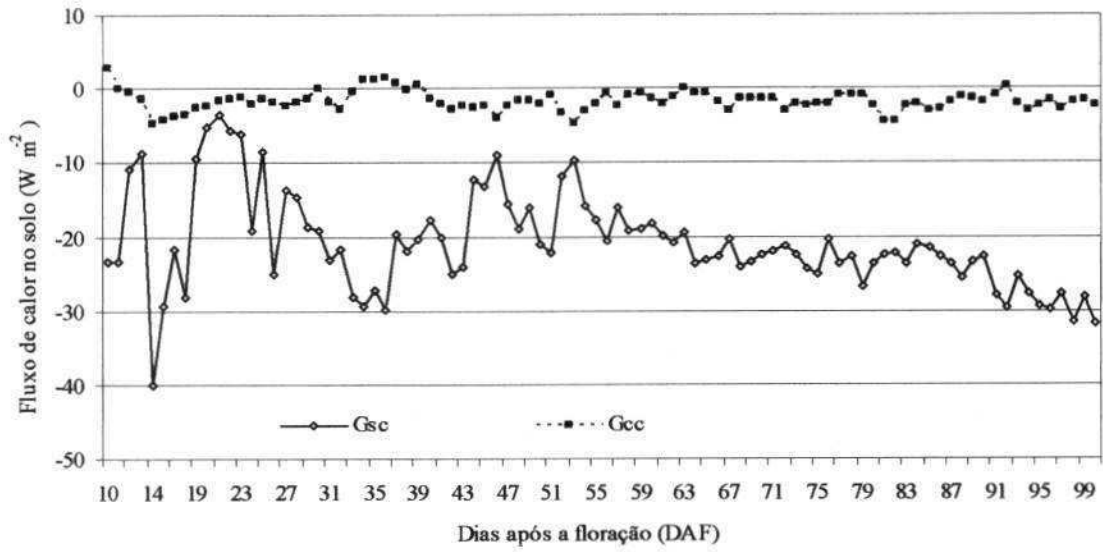


Figura 4.7. Comportamento do fluxo de calor no solo sem correção (G_{sc}) e com correção (G_{cc}) ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.

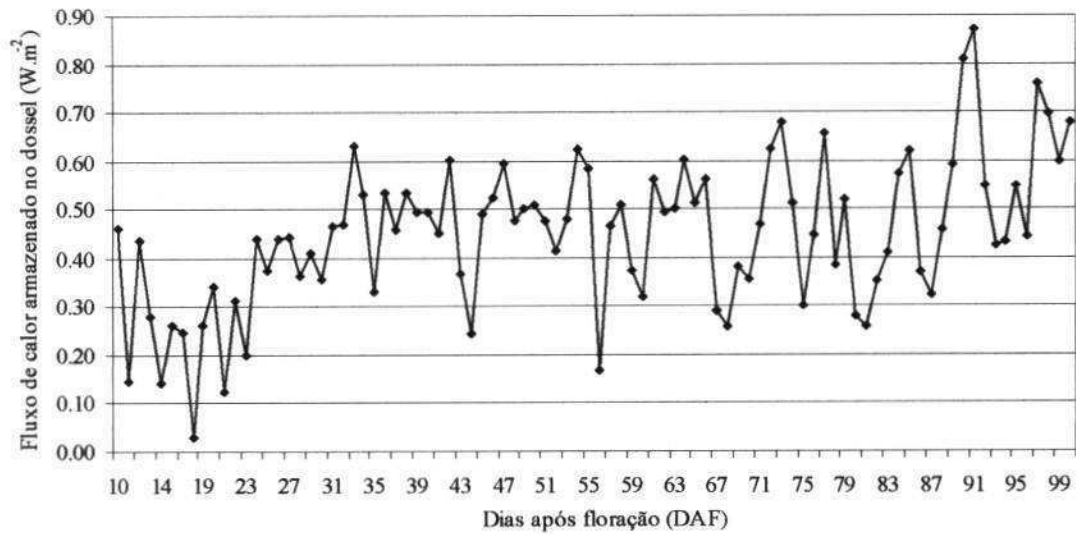


Figura 4.8. Comportamento do fluxo de calor armazenado no dossel das plantas (S) ao longo do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.

4.4. Análise da evapotranspiração do pomar de mangueiras

Os valores médios diários da evapotranspiração do pomar de mangueiras com base no fluxo de calor no solo com correção ($ET_c G_{cc}$) e no fluxo de calor no solo sem correção ($ET_c G_{sc}$) em 14 dias durante o período experimental são exibidos na Tabela 4.7. As médias e os desvios-padrão de $ET_c G_{cc}$ e $ET_c G_{sc}$ foram $3,3 \pm 1,03$ e $3,4 \pm 1,22$ mm dia⁻¹, respectivamente. Em todos os dias analisados a $ET_c G_{cc}$ foi inferior a $ET_c G_{sc}$, bem como na média do período, exceto no dia 14/05/2005.

A Tabela 4.8. exibe a evapotranspiração com base no fluxo de calor no solo com correção ($ET_c G_{cc}$) e no fluxo de calor no solo sem correção ($ET_c G_{sc}$) em dias representativos de cada estágio fenológico do ciclo produtivo do pomar de mangueiras. Nesse caso, os valores das médias e os desvios-padrão de $ET_c G_{cc}$ e $ET_c G_{sc}$ foram muito próximos daqueles obtidos para o período de 14 dias durante o período experimental. Em ambas as análises, os valores médios de $ET_c G_{cc}$ e $ET_c G_{sc}$ não foram estatisticamente diferentes de acordo com o teste t-Student em nível de 5% de probabilidade. Os valores médios de evapotranspiração foram bastante próximos daqueles obtidos Silva (2000), em experimento de campo num pomar de mangueiras na região do Submédio São Francisco. Nessa pesquisa foi obtida a evapotranspiração média diária que variou de 3,0 mm dia⁻¹, no estágio fenológico de floração, para 5,5 mm dia⁻¹ no estágio de formação de frutos.

Tabela 4.7. Evapotranspiração (mm) do pomar de mangueiras considerando-se o fluxo de calor no solo com correção ($ET_c G_{cc}$) e no fluxo de calor no solo sem correção ($ET_c G_{sc}$) em 14 dias durante o período experimental.

DIA	$ET_c G_{cc}$	$ET_c G_{sc}$
01/5/2005	1,6	1,7
04/5/2005	2,2	2,5
05/5/2005	2,1	2,1
06/5/2005	2,0	2,0
14/5/2005	2,6	1,9
15/6/2005	2,4	2,6
30/6/2005	4,0	4,2
01/7/2005	3,9	4,2
04/7/2005	2,8	3,0
05/7/2005	3,8	4,1
18/7/2005	4,1	4,3
06/8/2005	4,3	4,8
08/8/2005	4,3	4,8
09/8/2005	4,5	5,0
Média	3,2	3,4
Desvio-padrão	1,03	1,22

Tabela 4.8. Evapotranspiração (mm) da mangueira considerando-se o fluxo de calor no solo com correção ($ET_c G_{cc}$) e no fluxo de calor no solo sem correção ($ET_c G_{sc}$) em dias representativos de cada estágio fenológico do ciclo produtivo do pomar de mangueiras.

Estádio	Data	$ET_c G_{cc}$	$ET_c G_{sc}$
Floração de frutos	17/04 - 07/05	1,98	2,08
Queda de frutos	08/05 - 17/06	2,50	2,25
Formação de frutos	18/06 - 07/08	3,72	3,96
Maturação de frutos	08/08 - 18/08	4,40	4,90
Média	-	3,15	3,30
Desvio-padrão	-	1,12	1,37

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com base no experimento de campo realizado no Submédio São Francisco com a mangueira irrigada permitem concluir o seguinte:

1. O efeito do calor armazenado no dossel da mangueira no cálculo do balanço de energia no manguezal é irrelevante comparado com o efeito dos demais componentes do balanço de energia;
2. O calor armazenado acima das placas de calor no solo não interfere significativamente no cálculo dos fluxos de calor sensível e latente, bem como na evapotranspiração da mangueira, nas condições de realização deste experimento;
3. O fluxo de calor no solo calculado com base no calor armazenado acima dos fluxímetros difere estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade, daquele obtido sem a utilização do calor armazenado acima desse equipamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, J.A.S.; Mouco, M.A.C.; Medina; V.D.; Santos, C.R.; Tavares. O cultivo da mangueira irrigada no semi-árido brasileiro. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Arido/Valexporte, 1999.77p.
- Angus, D.E.; Watts, P.J. Evapotranspiration: how good is the Bowen ratio method?. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 8, p. 133-150. 1984.
- ARYA, S.P. Introduction to micrometeorology. North Carolina: Academic Press, 1988. 307p.
- Azevedo, P.V.; Silva, B.B.; Silva, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.58, n.1, p.241-254. 2003.
- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Physical Review, New York, v. 27, p. 779-787. 1926.
- Burba, G.G.; Verma, S.B.; Kin, J. Surface energy fluxes of phragmites australis in a prairie wetland. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 94, n.1, p.31-51, 1997

- Cellier, P.; Olioso, A. A simple system for automated long-term Bowen ratio measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 66, n.1, p. 81-92. 1993.
- Cunha, G.A.P.; Sampaio, J.M.M.; Nascimento, A.S.; Santos Filho, H.P.; Medina, V.M. Manga para exportação: aspectos técnicos da produção. Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretária de desenvolvimento Rural, Programa de Apoio á Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. Brasília: EMBRAPA – SPI, 1994, 35p – (Série de Publicações Técnicas FRUPEX; 8)
- Cunha, G.R.; Bergamaschi, H.; Berlato, M.A. Balanço de energia em cultura de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.
- Daamen, C.C.; Dugas, W.A.; Prendergast, P.T.; Judd, M.J.; McNaughton. Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. *Agricultural and Forest Meteorology*. Amsterdam, v.93, p.171-183, 1999.
- Espínola Sobrinho, J.E. Influência do tipo de arquitetura do dossel na absorção de radiação solar, na produtividade e na qualidade do fruto da mangueira. Campina Grande: UFCG, 2003. (Tese de doutorado)
- Garrat, J.R. The measurement of evaporation by meteorological methods. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.8, p.99-117. 1984.
- Genu, P.J.C.; Pinto, A.C.Q. A cultura da mangueira. Brasília, 2002.
- Gutiérrez, M.V.; Meinzer, F.C. Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.68, p.173-186.1994.

- Heilman, J.L.; Brittin, C.L. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.4, n.1, p.261-273.1989.
- Heilman, J.L.; McInnes, K.J.; Savage, M.J. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.71, n.1, p.99-114. 1994.
- Kustas, W.P.; Prueger, J.H.; Hatfield, J.L.; Ramalingam, H; Hipps, L.E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amesterdam, v.103, n.1, p.249-264. 2000.
- Lopes, P.M. O. Evapotranspiração da mangueira na região do Submédio São Francisco. 1999. 108p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- Lopes, P.M.; Silva, B.B.; Azevedo, P.V. R.; Teixeira, A.H.C.; Soares, J.M.; Sobrinho, J.E. Balanço de energia num pomar de mangueira irrigado. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.1, n.1, p.1-8, 2001.
- Malek, E. Rapid changes of the surface soil heat flux and its effects on the estimation of evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, Amsterdan, v.142, p. 89 –97, 1993.
- Mastrorilli, M.; Katerji, N.; Rana, G.; Nouna, B.B. Daily actual evapotranspiration mensered with TDR technique in medeterranean conditions. *Agricultural and Forest Metereology*, Amsterdam, v.90, n.1, p. 81-89, 1998.
- McCaughey, J.H. Energy balance storage terms in a nature mixed forest at Petawawa, Ontario-a case study. *Boundary Layer Meteorological*. v.31, n.1, p.89-101. 1985.

- Mokate, A.S.; Varshneya, M.C.; Naidu, T.R.V.; *et al.* Evapotranspiration and energy balance studies over wheat crop by Bowen ratio energy balance method. *Journal Maharashtra Agricultural Universities, Pune*, v.20, n. 2, p.273-276, 1995.
- Nie, D.; Flitcroft, I.D.; Kanemasu, E.T. Performance of Bowen ratio system on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, v.59, n.1, p.165-181. 1992
- Oliver, H.R.; Sene, K.J. Energy and Water balances of developing vines. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, v.61, n.1, p.167-185, 1992.
- Pezzopane, J.R.M.; Pedro Júnior, M.J. Energy balance on niagara rosada vineyard. *Bragantia*, 2003, v.1, p. 155-161. ISSN 0006-8705.
- Prueger, J.H.; Hatfield, J.L.; Aase, J.K. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. *Agronomy Journal, Madison*, v. 89, n.1, p. 730-736, 1997.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L.; Verma, S.B. *Microclimate. The biological environment*. 2^o Edition, Lincoln, Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- Silans, A.P.; Monteny, B.A.; Lhomme, J.P. The correction of soil heat flux measurements to derive an accurate surface energy balance by the Bowen ratio method. *Journal of Hydrology, Amsterdam*, v.1/4, p. 453 - 465, 1997.
- Silva, V.P.R. *Estimativa das necessidades hídricas da mangueira*. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB, 2000. 129p. (Tese de Doutorado).
- Silberstein, R.P.; Sivapalan, M.; Viney, N.R.; Held, A.; Hatton, T.J. Modelling the energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, v.115, n.1, p.210-230. 2003.
- Simão, S. *Manual de fruticultura*. São Paulo: Ceres, 1971. p 530.

Soares, J.M.; Costa, F.F.; Santos, C.R. Manejo de irrigação em frutíferas. In: Faria, M.S.; Silva, E. L.; Vilela, L. A. A.; Silva, A. M. (ed). Manejo de Irrigação. Poços de Caldas: DE/UFLA, 1998. Cap 4, p. 281-308.

Soares, J. M.; Costa, F. F. Irrigação. In: Informações técnicas sobre a cultura da manga no semi-árido brasileiro. Embrapa, Brasília, 1995. Cap. 2, p. 43-80.

Soares, J.M.; Azevedo, P.V. Balanço de energia em parreirais cultivados na região do submedio do Rio São Francisco. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.

Soares, J.M. Consumo hídrico da videira festival sob intermitência de irrigação no submédio São Francisco. Campina Grande: UFCG, 2003. (tese de doutorado).

Souza, F.X.; Pinto, A.C.Q. Avaliação de cultivares de mangueira sob cultivo de sequeiro em Parnaíba, PI. Revista Brasileira de Fruticultura, Cruz das Almas, BA, v.18, n.1, p. 7-13, 1996.

Stannard, D.I.; Blanford, J.H.; Kustas, W.P.; et al. Interpretation of surface flux measurements in heterogeneous terrain during the monsoon' 90 experiment. Water Resources Research, Washington, v.30, n.5, p. 1227-1239, 1994.

Steduto, P.; Hsiao, T.C. Maize canopies under two soil water regimes IV. Validity of Bowen ratio-energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 215-228. 1998.

Tanner, C.C.1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Soil. Sci.Soc. Am. Proc. 24:1-9.

- Teixeira, A. H. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3,n.1, p.28-32,2001.
- 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.
- Trambouze, W.; Bertuzzi, P.; Voltz, M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 91, p. 193-208, 1998.
- Twine, T.E.; Kustas, W.P.; Normanc, J.M.; Cookd, D.R.; Houser, P.R.; Meyers, T.P.; Prueger, J.H.; Starks, P.J.; Wesejy, M.L. Correcting eddy covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.130, p.279-300, 2000.
- Unland, H.E.; Houser, P.R.; Shuttleworth, W.J; Yang, Z.L. Surface flux measurements and modelling at a semi-arid sonoran desert site. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 82, p.119 –153, 1996.
- Valexport, 2004. Associação dos produtores exportadores de Hortigranjeiros e derivados do vale do São Francisco. www.valexport.com.br.
- Vila Nova, N.A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba: USP, 1973.89 p. Tese (livre docência) Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 1973.

- Yunusa, I.A.M.; Walker, R.R.; Lu, P. Evapotranspiration components from energy balancy, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agricultural and Forest meteorology*, Amsterdam, v.127,n.1, p.93-107. 2004.
- Wright, J.L. New evapotranspiration crop coefficient. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.108, n.2, p.57-74. 1982.
- Zhao, W. G.; Berliner, P. R.; Zangvil, A. Camp, C.R.; Sadler, E. j.; Yoder, R.E. Heat storage terms in evapotranspiration estimation. In: *Evapotranspiration and irrigation scheduling*, Proceedings of the International Conference, American Society of Agricultural Engineers the Irrigation Association, November, 3-6, San Antonio, Texas, p. 34-41, 1996.