

APOLO ALVES RIBEIRO

**FLUXOS DE CO₂ E DE VAPOR D'ÁGUA EM FEIJÃO CULTIVADO NO
AGRESTE MERIDIONAL PERNAMBUCANO**

GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL

DEZEMBRO - 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA

FLUXOS DE CO₂ E DE VAPOR D'ÁGUA EM FEIJÃO CULTIVADO NO
AGRESTE MERIDIONAL PERNAMBUCANO

APOLO ALVES RIBEIRO

SOB ORIENTAÇÃO DO PROFESSOR
JOSÉ ROMUALDO DE SOUSA LIMA

Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte das
exigências do Programa de Pós
Graduação em Produção Agrícola,
para obtenção do título de Mestre.

GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL

DEZEMBRO - 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA

FLUXOS DE CO₂ E DE VAPOR D'ÁGUA EM FEIJÃO CULTIVADO NO
AGRESTE MERIDIONAL PERNAMBUCANO

APOLO ALVES RIBEIRO

GARANHUNS, PERNAMBUCO - BRASIL

DEZEMBRO - 2014

Ficha catalográfica

Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Setorial UFRPE/UAG

R484f Ribeiro, Apolo Alves
 Fluxos de CO₂ e de vapor d'água em feijão
 cultivado no Agreste Meridional Pernambucano/
 Apolo Alves Ribeiro. - Garanhuns, 2014.

76f

Orientador: José Romualdo de Sousa Lima
Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola)
Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade
Acadêmica de Garanhuns, 2014.

CDD: 635.652

1. Dióxido de Carbono
2. Feijão - Produtividade
3. Agricultura.
- I. Lima, José Romualdo de Sousa
- II. Título

**FLUXOS DE CO₂ E DE VAPOR D'ÁGUA EM FEIJÃO CULTIVADO NO
AGRESTE MERIDIONAL PERNAMBUCANO**

APOLO ALVES RIBEIRO

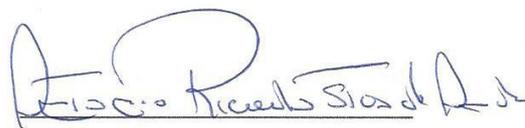
APROVADO EM: 09 DE DEZEMBRO DE 2014



MARCELO METRI CORRÊA

UAG/UFRRPE

Examinador Interno



ANTÔNIO RICARDO SANTOS DE ANDRADE

UAG/UFRRPE

Examinador Externo



JOSÉ ROMUALDO DE SOUSA LIMA

UAG/UFRRPE

Orientador

Dedicatória

Aos meus pais (Pedro Ribeiro de Melo e Luiza Alves da Silva), irmãs (Beatriz, Louise e Joyce), esposa (Cleonice Alves) e a Deus.

AGRADECIMENTOS

A minha família por todo apoio e incentivo. Aos meus pais que me deram total confiança e fizeram tudo que estava ao seu alcance para que eu pudesse concluir minha graduação e pós-graduação.

Ao meu orientador, Professor José Romualdo, que desde a graduação tem me dado oportunidade de crescimento acadêmico, incentivo, confiança, paciência, exemplo de trabalho e dedicação à pesquisa acadêmica.

A todos meus companheiros de Mestrado que me ajudaram com disciplinas, trabalhos e apresentações.

A equipe do Laboratório de Física do Solo (Cássia Machado, Francis Henrique, Jéssica Oliveira, Karine Deusdará, Aleph Miquéias e Paulo Ferreira) e do Departamento de Energia Nuclear da UFPE (Edevaldo Miguel, Albert Einstein), pela ajuda nos trabalhos de campo e na montagem das estações.

A Rodolfo Souza (UAST/UFRPE) pela grande ajuda nos trabalhos de campo e, principalmente, no tratamento dos dados de fluxos de CO₂.

Ao colega de profissão José Cícero e família, que concedeu sua propriedade como área experimental para realização dessa pesquisa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns (UAG), que me deu a oportunidade de realizar um sonho de ter uma graduação e também pelas condições, através de seus laboratórios, para que a pesquisa fosse realizada. Agradeço, ainda, aos funcionários e técnicos que sempre estavam dispostos a ajudar no que fosse preciso.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de estudos (processo IBPG-0160-5.01/12) e recursos financeiros (projeto n^{os}: APQ-0077-5.01/09, “Edital de Cooperação FACEPE-FAPESP de Apoio a Pesquisas em Mudanças Climáticas” e APQ-1178-3.01/10, “Edital FACEPE 12/2010 - Programa de Apoio a Núcleos Emergentes”).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de recursos financeiros (Projetos n^{os}: 475094/2009-3; 479289/2011-3; 305727/2009-5).

BIOGRAFIA

APOLO ALVES RIBEIRO, filho de Pedro Ribeiro de Melo e Luiza Alves da Silva, nasceu em Garanhuns, PE em 22 de abril de 1988.

Ingressou na Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns no curso de Agronomia em Agosto de 2007, graduando-se em 2012.

Em agosto do mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Agrícola, da mesma Universidade, linha de pesquisa: Uso de Água e Solo na Produção Agrícola, sob a orientação do Professor Dr. José Romualdo de Sousa Lima, defendendo a dissertação em 09 de dezembro de 2014.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| RESUMO GERAL..... | i |
| GENERAL SUMMARY..... | ii |
| LISTA DE FIGURAS..... | iii |
| LISTA DE TABELAS..... | v |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL..... | 15 |
| 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 18 |
| CAPÍTULO I - FLUXOS DE ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO, EM SÃO JOÃO, PERNAMBUCO..... | 20 |
| RESUMO..... | 21 |
| ABSTRACT..... | 22 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 25 |
| 2.1. Localização, clima e solo da área experimental..... | 25 |
| 2.2. Balanço hídrico..... | 27 |
| 2.3. Medições biométricas (altura das plantas e biomassa)..... | 30 |
| 2.4. Índice de área foliar e área foliar..... | 32 |
| 2.5. Estágios e respectivas fases fenológicas do feijão..... | 32 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 37 |
| 3.1. Precipitação pluvial e umidade volumétrica..... | 37 |
| 3.2. Biometria da cultura do feijão..... | 39 |
| 3.3. Componentes do balanço hídrico..... | 42 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 44 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 45 |
| CAPÍTULO II - EVAPOTRANSPIRAÇÃO E FLUXOS DE CO ₂ NA CULTURA DO FEIJÃO SOB CONDIÇÕES DE SEQUEIRO..... | 48 |
| RESUMO..... | 49 |
| ABSTRACT..... | 50 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 51 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS..... | 53 |
| 2.1. Medições e sistema de aquisição de dados..... | 53 |
| 2.2. Fluxos de CO ₂ , fluxos de calor latente (LE), sensível (H)..... | 54 |

| | |
|--|----|
| 2.3. Produtividade do feijão | 55 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 56 |
| 3.1. Temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor e precipitação pluvial | 56 |
| 3.2. Componentes do balanço de energia..... | 59 |
| 3.3. Evapotranspiração da cultura do feijão (ET)..... | 65 |
| 3.4. Produtividade e eficiência do uso de água | 66 |
| 3.5. Fluxos de CO ₂ | 66 |
| 4. CONCLUSÕES | 72 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 73 |

RESUMO GERAL

Muitos processos importantes que ocorrem nos ecossistemas, tais como, a fotossíntese e a produtividade da vegetação, estão associados com as trocas de CO₂, água e energia. Medições precisas desses fluxos são, portanto, fundamentais para uma ampla compreensão do ciclo do carbono em ecossistemas terrestres. No entanto, nenhum estudo desse tipo foi realizado nas condições do agreste meridional de Pernambuco, com a cultura do feijão. Diante do exposto, o presente trabalho objetivou quantificar os fluxos de água, de energia e de CO₂ em solo cultivado com feijão sob condições de sequeiro. O trabalho foi realizado em uma área produtora de feijão do município de São João, onde se instalou sensores para medir esses fluxos, usando as metodologias do balanço de energia - correlação dos turbilhões (fluxos de energia e de CO₂) e do balanço hídrico no solo (fluxos de água) no período de 31/05/2013 a 20/08/2013. Também foram determinadas a altura, o índice de área foliar (IAF) e a produtividade do feijão. Em relação aos componentes do balanço hídrico verificou-se que o fluxo de água (drenagem profunda e/ou ascensão capilar) na profundidade de 35 cm teve valores muito baixos, como também que os períodos de elevada pluviosidade resultaram em maior armazenamento de água no solo e maior evapotranspiração (ET). A ET do feijão pelo método do balanço hídrico teve valor total e médio de 146,0 mm e 1,78 mm d⁻¹, respectivamente. A cultura apresentou seu maior consumo de água no período reprodutivo (29/06/2013 a 29/07/2013), com valor médio de 2,55 mm d⁻¹. Quanto aos fluxos de energia, verificou-se que o fluxo de calor latente (LE) consumiu em média 78,46% do saldo de radiação (Rn). A ET medida pela metodologia da correlação dos turbilhões obteve valor total durante o período experimental de 179,3 mm, com média de 2,2 mm d⁻¹. A produtividade do feijão foi de 2.050 kg ha⁻¹, com eficiência do uso de água de 1,16 kg m⁻³. Em relação aos fluxos de CO₂, observou-se que os mesmos variaram de -0,75 a -11,21 μmol m⁻² s⁻¹, indicando a ocorrência de sequestro de carbono pelo feijão. Em média, o feijão sequestrou 54 kg de C ha⁻¹ por dia, o equivalente a 3,3 t de C ha⁻¹ durante o período experimental.

GENERAL SUMMARY

Many important processes occurring in ecosystems, such as photosynthesis and productivity of vegetation, are associated with the exchange of CO₂, water and energy. Accurate measurement of these fluxes are therefore fundamental to a broad understanding of the carbon cycle in terrestrial ecosystems. However, no such study was conducted under the conditions of the Agreste of Pernambuco, with the bean crop. Given the above, this study aimed to quantify the water, energy and CO₂ fluxes in soil cultivated with bean under rainfed conditions. The study was conducted in a bean producing area of the city of São João, where were installed sensors to measure these fluxes, using the energy balance method - eddy covariance (energy and CO₂ fluxes) and soil water balance method (water fluxes) in the period from 31/05/2013 to 08/20/2013. In addition to these measurements were also measured height, leaf area index (LAI) and the bean yield. Regarding the components of the water balance was found that the flow of water at a depth of 35 cm (deep drainage and/or capillarity rise) had very low values. It was also observed that the periods of high rainfall resulted in higher water storage in soil and increased evapotranspiration (ET). The ET obtained by water balance method had a total and average values of 146.0 mm and 1.78 mm d⁻¹, respectively. The bean presented its highest water consumption during the reproductive period (29/06/2013 to 29/07/2013), with an average value of 2.55 mm d⁻¹. Regarding the energy fluxes, it was found that the latent heat flux (LE) consumed on average 78.46% of the radiation (R_n). The ET, measured by the eddy covariance method, was total value of 179.3 mm, with a mean value of 2.2 mm d⁻¹. Bean yield was 2,050 kg ha⁻¹, with water use efficiency of 1.16 kg m⁻³. Regarding the CO₂ fluxes, it was observed that the same varied from -11.21 to -0.75 μmol m⁻² s⁻¹, indicating the occurrence of carbon sequestration by the crop. On average, bean sequestered 54 kg C ha⁻¹ per day, the equivalent to 3.3 t C ha⁻¹ during the trial period.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da área experimental, com a disposição da estação meteorológica (E1) e sensores do solo (E2), e culturas implantadas em cada parcela (feijão, F; mandioca, M; consorcio de mandioca e feijão, MF) | 25 |
| Figura 2. Profundidade de instalação dos sensores de umidade do solo na área experimental em São João, PE | 28 |
| Figura 3. Área de amostragem do feijão (19 DAP) em São João, PE | 31 |
| Figura 4. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento vegetativo (V3) do feijoeiro comum, no dia 01/06/2013 em São João, PE | 34 |
| Figura 5. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento vegetativo (V4) do feijoeiro comum, no dia 23/06/2013 em São João, PE | 34 |
| Figura 6. Início da pré-floração na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R5) do feijoeiro comum, no dia 07/07/2013 em São João, PE | 35 |
| Figura 7. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R8) enchimentos das vagens do feijoeiro comum, no dia 27/07/2013 em São João, PE | 35 |
| Figura 8. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R9) maturação fisiológica do feijoeiro comum, no dia 03/08/2013 em São João, PE | 36 |
| Figura 9. Senescência e colheita do feijoeiro comum, no dia 08/08/2013 em São João, PE | 36 |
| Figura 10. Variação diária da precipitação pluviométrica, armazenamento e umidade volumétrica do solo durante o ciclo da cultura do feijão no período de 30/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE | 37 |
| Figura 11. Evolução da altura da parte aérea (PA), comprimento da raiz (CR) e índice de área foliar (IAF) na cultura do feijão comum no período 31/05/2013 a 02/08/2013, São João, PE. As barras indicam o desvio padrão | 40 |
| Figura 12. Incidência de sintomas de mancha e necrose foliar causada por antracnose no feijão no dia 03/06/2013 em São João, PE | 41 |

CAPITULO II

| | |
|--|----|
| Figura 1. Variação dos valores médios, máximos e mínimos de temperatura do ar durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE | 57 |
| Figura 2. Variação dos valores médios de umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE | 58 |
| Figura 3. Precipitação pluvial durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE | 58 |
| Figura 4. Fechamento do balanço de energia na cultura do feijão durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013, São João, PE | 59 |
| Figura 5. Variação diária da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G) durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013, São João, PE | 60 |
| Figura 6. Variação horária do Rn, LE e H em feijão durante a fase reprodutiva em São João, PE | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 7. Variação horária do R_n , LE e H em feijão durante a fase de senescência em São João, PE | 64 |
| Figura 8. Comportamento diário evapotranspiração da cultura (ET), evapotranspiração de referência (ET_0) e relação ET/ET_0 no período de 31/05/2013 a 20/08/2013 na cultura do feijão em São João, PE..... | 65 |
| Figura 9. Variação diária dos fluxos de CO_2 em feijão cultivado em São João, PE..... | 67 |
| Figura 10. Variação horária dos fluxos de CO_2 em feijão durante a fase reprodutiva em São João-PE..... | 68 |
| Figura 11. Variação horária dos fluxos de CO_2 em feijão durante a fase de maturação fisiológica em São João-PE..... | 69 |
| Figura 12. Relação entre os fluxos de CO_2 e a biomassa seca de feijão cultivado em São João-PE | 70 |
| Figura 13. Relação entre os fluxos de CO_2 e o índice de área foliar (IAF) do feijão cultivado em São João-PE..... | 71 |

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural, porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo e densidade de partícula do Neossolo Regolítico em São João, PE | 26 |
| Tabela 2. Valores dos parâmetros das curvas de retenção da água no solo [θ (h)] e da condutividade hidráulica [$K(\theta)$] nas profundidades 35 e 55 cm | 30 |
| Tabela 3. Etapas do desenvolvimento da planta do feijoeiro comum no período de 31/05/2013 a 08/08/2013 em São João, PE..... | 32 |
| Tabela 4. Etapas do desenvolvimento da planta do feijoeiro comum Circular Técnica Embrapa (2001). | 33 |
| Tabela 5. Médias Biométricas do feijão comum no período de 31/05/2013 a 02/08/2013 em São João, PE | 39 |
| Tabela 6. Componentes do balanço hídrico em feijão durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE..... | 42 |

CAPITULO II

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Instrumentos utilizados nas medições meteorológicas | 53 |
| Tabela 2. Normais Climatológicas para a cidade de Garanhuns, PE..... | 56 |
| Tabela 3. Média diurna da radiação global (R_g), saldo de radiação (R_n), fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor sensível (H) e no solo (G) em Wm^2 , e razão R_g e R_n , durante as etapas de desenvolvimento do feijão no período de 31/05/2013 a 08/08/2013, São João, PE. | 62 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

O maior volume de grãos consumidos de uma leguminosa vem do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), cultura essa de grande importância social, bem como fonte de proteínas e nutrientes essenciais a dieta das pessoas que vivem em vários países da América Latina e África (Broughton et al., 2003).

O Brasil é segundo maior produtor mundial dessa leguminosa destacando sua importância como uma das principais culturas do país. Seu consumo está presente em pelo menos uma refeição diária na grande maioria da população brasileira (FAO, 2012).

A produção nacional de feijão na safra de 2013 foi de 3.251,6 mil toneladas com área plantada de 3200 mil ha e produtividade média das lavouras de 1.020 kg ha⁻¹ (CONAB, 2013). No estado de Pernambuco produziram-se em torno de 79,5 mil toneladas de feijão com uma área de plantada de aproximadamente 215 mil hectares, posicionando-se como quarto maior produtor nordestino e o sétimo em área plantada no país na safra de 2013. No entanto, possui uma das mais baixas médias de rendimento do país com 370 kg por hectares, quase três vezes mais baixa do que a média nacional (CONAB, 2013).

Com isso são muito importantes iniciativas de programas de investimentos e capacitação técnica no uso de novas tecnologias, seja no desenvolvimento de novas cultivares adaptadas as condições regionais com maior rendimento de grãos e melhor qualidade comercial, resistência a pragas e doenças, plantas com arquitetura que maximize o manejo, redução de perdas no campo e armazenamento.

São também indispensáveis os estudos das condições climáticas locais nessas microrregiões produtoras, para minimizar os riscos de quebra de rendimento, decorrente das mudanças climáticas que são cada vez mais discutidas sua participação no panorama atual da agricultura pela comunidade científica.

As mudanças climáticas, amplamente difundidas em várias pesquisas, apresentam o aquecimento global como provável responsável pela redução na produção de alimento e diminuição da produtividade em áreas onde os agricultores não possuem condições de enfrentar o problema da adversidade climática. Situação que pode ser agravada ainda mais com aumento da incidência de pragas e doenças, longas estiagens, grandes concentrações de chuvas em períodos curtos, fatores que poderão provocar abandono das atividades agrícolas em áreas outrora produtivas (Santos et al., 2013).

Os estudos do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) indicam que as regiões áridas e semiáridas são particularmente expostas aos impactos

das mudanças no clima e devem sofrer redução da disponibilidade dos recursos hídricos. Os processos hidrológicos serão afetados e podem significar diferentes tipos de prejuízos para as comunidades que vivem nessas regiões (Bates et al., 2008).

De todos os mecanismos ecológicos relacionados com mudanças climáticas e o sequestro de carbono em ecossistemas terrestres, os balanços de água e de energia são os mais cruciais (Hao et al., 2007). Muitos processos importantes que ocorrem nos ecossistemas, tais como, a fotossíntese e a produtividade da vegetação, estão associados com as trocas de CO₂, água e de energia. Os fluxos de calor latente (evapotranspiração) e de calor sensível têm um efeito significativo em vários aspectos do tempo e do clima (Wever et al., 2002).

Conseqüentemente, é de suma importância se estudar as trocas de água e de energia em diferentes ecossistemas para melhor compreensão dos mecanismos que controlam o ciclo de carbono e outros processos que ocorrem nos diversos ecossistemas (Hao et al., 2007).

O conhecimento da quantidade de água retirada do solo pelos vegetais é de grande interesse, principalmente, para os estudos sobre o uso da água pela cultura, como também sobre a dinâmica da absorção dos nutrientes (Gouveia Neto et al., 2011).

A evapotranspiração é um processo importante que é controlado pela interação de um grande número de fatores bióticos e ambientais. Os parâmetros e processos do ecossistema, tais como, umidade do solo, produtividade vegetal, balanços de água e de nutrientes são todos influenciados pela evapotranspiração; por outro lado, todos esses processos influenciam a evapotranspiração (Soares et al., 2013).

Numa escala em longo prazo, o equilíbrio da transferência de água pode influenciar de maneira significativa a capacidade de fixação de CO₂ da superfície, estando assim ambos intimamente ligados.

Em virtude do exposto acima, vários estudos têm medido os fluxos de CO₂, água e energia em diferentes ecossistemas, contudo a maioria desses estudos foram realizados em áreas de florestas e pastagens (Xu & Baldocchi, 2004; Wolf et al., 2011; Kim et al., 2012; Qun et al., 2013; Ago et al., 2014), e alguns em áreas de cultivo de soja e milho (Suyker et al., 2005; Hernandez-Ramirez et al., 2011; Bai et al., 2012).

No entanto, apesar da importância do feijão, relativamente poucos estudos medindo e/ou simulando continuamente os fluxos de CO₂, energia e água estão disponíveis, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

A dinâmica dos processos de troca de massa, energia e de CO₂, além do uso de água (evapotranspiração) pelo feijão comum, ainda é um tema pouco explorado nas condições climáticas do Agreste Meridional de Pernambuco, principalmente em condições de sequeiro. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral medir os fluxos de água, energia e CO₂ em feijão, sob condições de sequeiro.

Para isso, o trabalho será dividido em dois capítulos, onde no primeiro serão avaliados os fluxos de água pela metodologia do balanço hídrico e no segundo serão avaliados os fluxos de CO₂ e de energia, pela metodologia da correlação dos turbilhões.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGO, E. E.; AGBOSSOU, E. K.; GALLE, S.; COHARD, J-M.; HEINESCH, B.; AUBINET, M. Long term observations of carbon dioxide exchange over cultivated savanna under a Sudanian climate in Benin (West Africa). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.197, p. 13–25, 2014.
- BAI, Y.; WANG, J.; ZHANG, B.; ZHANG, Z.; LIANG, J. Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China. **Ecological Research**, v.27, p. 615-623, 2012.
- BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU S.; PALUTIKOF, J.P. Eds. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210p. 2008.
- BROUGHTON W. J.; HERNÁNDEZ G.; BLAIR M.; BEEBE S.; GEPTS P.; VANDERLEYDEN J. Beans (*Phaseolus* spp.): model food legume. **Plant and Soil**, v. 252, p. 55-128, 2003.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v.1, n.2 (2013) – Brasília : Conab, 2013-v. Mensal. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 19/05/2014.
- GOUVEIA NETO, G. C.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, J. M.; SOUZA, C.; SILVA, I. F. Estimativa da evapotranspiração da mamona e seus componentes (evaporação e transpiração) na microrregião do Brejo Paraibano. **Irriga**, v.16, p. 246-258, 2011.
- HAO, Y.; WANG, Y.; HUANG, X.; CUI, X.; ZHOU, X.; SHIPING WANG, S.; NIU, H.; JIANG, G. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.146, p. 57–69, 2007.
- HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; HATFIELD, J. L.; PARKIN, T. B.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Carbon dioxide fluxes in corn–soybean rotation in the midwestern U.S.: Inter- and intra-annual variations, and biophysical controls. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p. 1831– 1842, 2011.
- KIM, Y.; KNOX, R. G.; LONGO, M.; MEDVIGY, D.; HUTYRAK, L. R.; PYLE, E. H.; WOFSY, S. C.; BRAS, R. L.; MOORCROFT, P. R. Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an Amazon rainforest. **Global Change Biology**, v.18, p. 1322-1334, 2012.

- FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. Disponível em: < <http://www.sidra.ibge.gov.br> >. Acesso em 19/06/2014.
- QUN, D.; HUIZHI, L. Seven years of carbon dioxide exchange over a degraded grassland and a cropland with maize ecosystems in a semiarid area of China. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, v.173, p. 1-12, 2013.
- SANTOS, J. O.; SANTOS, R. M. S.; FERNANDES, A. A.; SOUSO J. S.; BORGES, M. G. B.; FERREIRA, R. T. V.; SALGADO, A. B. Os impactos produzidos pelas mudanças climáticas. *Revista Agropecuária Científica no Semiárido*. v.9, p. 09-16, 2013.
- SOARES, W. A.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; LIRA, C. A. B. O. Simulação dos Fluxos de Água e de Energia na Microbacia Hidrográfica da Represa Vaca Brava no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 185-196, 2013.
- SUYKER, A.; VERMA, S.; BURBA, G.; ARKEBAUER, T. J. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 131, p. 180–190, 2005.
- WEVER, L.A.; FLANAGAN, L.B.; CARLSON, P.J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance, and surface conductance in northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.112, p.31–49, 2002.
- WOLF, S.; EUGSTER, W.; POTVIN, C.; BUCHMANN, N. Strong seasonal variations in net ecosystem CO₂ exchange of a tropical pasture and afforestation in Panama. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, p. 1139-1151, 2011.
- XU, L.; BALDOCCHI, D. D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology* v. 123, p. 79–96, 2004.

**CAPÍTULO I - FLUXOS DE ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO,
EM SÃO JOÃO, PERNAMBUCO**

RESUMO

O estudo dos fluxos de água no solo, por meio da determinação dos componentes do balanço hídrico, bem como a evapotranspiração (ET), são de primordial importância para um manejo adequado de cultivos agrícolas. Desse modo, o presente trabalho objetivou analisar o balanço hídrico no solo e a partição de seus componentes (drenagem profunda, ascensão capilar, variação do armazenamento de água, precipitação pluvial) durante o ciclo da cultura do feijão, sob condições de sequeiro. O estudo foi realizado no Sítio Várzea do Barro, situado no município de São João, na mesorregião do Agreste meridional do estado de Pernambuco (8° 51' 17,9''S, 536° 22' 48'' W e altitude 694 m), durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013. Para a determinação dos componentes do balanço hídrico foram instalados sensores para medir a umidade volumétrica do solo (TDR) nas profundidades de 5, 25, 35, 55, 75 e 86 cm e um pluviógrafo, para medir a precipitação pluvial. Além disso, foram realizados ensaios de infiltração, para determinação da condutividade hidráulica saturada do solo, bem como determinação da curva de retenção da água no solo, em laboratório por meio do extrator de Richards. Verificou-se que os períodos de elevada pluviosidade resultaram em maior armazenamento de água no solo e maior evapotranspiração. No entanto, não ocorreram perdas de água no solo por drenagem. A evapotranspiração total e média do feijão comum foi de 146,0 mm e 1,78 mm d⁻¹, respectivamente. A cultura apresentou seu maior consumo de água no período reprodutivo de 29/06/2013 a 29/07/2013, com valor médio de 2,55 mm d⁻¹.

Palavras-chave: evapotranspiração, balanço hídrico, cultivo em sequeiro.

ABSTRACT

The study of water fluxes in the soil, through the determination of the components of the water balance and evapotranspiration (ET), are of prime importance for an adequate management of agricultural crops. Thus, this study aimed to analyze the soil water balance and the partition of its components (deep drainage, capillary rise, water storage variation, rainfall) during the bean crop cycle, under rainfed.. The study was conducted on Sítio Várzea do Barro, located in the municipality of São João, in the middle region of the Southern Agreste of Pernambuco (8 51 '17.9 "S, 536 22' 48 " W and altitude 694 m), during the period of 31/05/2013 to 08/20/2013. To determine the water balance components were installed sensors to measure the volumetric soil moisture (TDR) at depths of 5, 25, 35, 55, 75 and 86 cm and a rain gauge to measure rainfall. In addition, infiltration tests were conducted to determine the saturated hydraulic conductivity of the soil as well as determining the water retention curve in the soil, in the laboratory through the Richards extractor. It has been found that periods of high rainfall resulted in higher water storage in soil and increased evapotranspiration. However, there were no water loss through drainage into the soil. The total evaporation and average were 146.0 mm and 1.78 mm d⁻¹, respectively. Crop presented its highest water consumption during the reproductive period of 29/06/2013 to 29/07/2013, with an average value of 2.55 mm d⁻¹.

Keywords: Evapotranspiration, water balance, cultivation in rainfed.

1. INTRODUÇÃO

Dentre o gênero *Phaseolus*, o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é a espécie mais cultivada no mundo. O desenvolvimento de tecnologias promoveu o cultivo em uma grande diversidade de sistemas de produção, com produtividade de grãos em algumas regiões do Brasil em torno de 3.000 a 4.000 kg ha⁻¹ (Silva et al., 2006), sendo a média nacional de 1.020 kg ha⁻¹ (CONAB, 2013).

No estado de Pernambuco a produtividade em 2013 foi de apenas 370 kg ha⁻¹ (CONAB, 2013), quase três vezes mais baixa que a média nacional. Já no município de São João, localizado na microrregião de Garanhuns no Agreste Meridional, a produtividade média, de acordo com o IBGE (2012), é de 500 kg ha⁻¹, com uma produção de 5.000 toneladas, destacando-se como o maior produtor de feijão do estado.

No entanto, essa produtividade ainda é baixa, necessitando de pesquisas relacionados ao estudo de introdução e adaptação de novas variedades, manejo de pragas e doenças, recomendação de adubação, uso de água pela cultura (evapotranspiração), etc.

O conhecimento da dinâmica da água durante o desenvolvimento de uma cultura fornece elementos cruciais ao estabelecimento ou aperfeiçoamento de práticas de manejo agrícola que possam aumentar a produtividade. O consumo de água pela cultura é uma propriedade importante nos estudos em microrregiões produtoras, como também para avaliação da produtividade das culturas (Cruz et al., 2005).

A produção vegetal está diretamente relacionada à dinâmica da água no solo, sendo o seu conhecimento essencial para qualquer tomada de decisão sobre a exploração agrícola dos solos. Portanto, a melhor caracterização dos fatores que interferem neste movimento se torna imprescindível, uma vez que o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem e absorção pelas plantas, os quais podem ser medidos ou estimados pelo método do balanço hídrico (Lima et al., 2006).

O método do balanço hídrico mostra que durante dado período de tempo à soma algébrica de todas as entradas (consideradas positivas) e saídas (negativas) de água em um volume de controle de solo submetido às peculiaridades dos fenômenos meteorológicos, dos atributos do solo e das características genéticas da espécie ou mesmo da variedade vegetal, resulta no saldo ou no balanço de água no solo. No campo considera-se este volume delimitado por duas superfícies paralelas: pela interface solo-atmosfera (limite superior do volume ou simplesmente superfície do solo) por uma

superfície horizontal localizada na profundidade do sistema radicular do cultivo (limite inferior do volume) (Brito et al., 2009).

Os estudos dos componentes do balanço hídrico no solo são fundamentais no conhecimento do regime hídrico de uma região, da época mais apropriada para preparo do solo, semeadora e plantio, e a necessidade de implantação de sistema de irrigação ou drenagem. A informação dos processos de perda de água e os componentes que atuam, de forma efetiva, no balanço de água para realização de um manejo adequado poderá ser de fundamental importância na diminuição da perda de produtividade (Lima, et al., 2010).

Alguns autores têm usado o método do balanço hídrico para quantificar o uso de água (evapotranspiração) em várias culturas anuais e perenes, como laranja, mamona, manga, milho, pastagem (Antonino et al., 2000; Azevedo et al., 2003; Cruz et al., 2005; Gomes et al., 2013; Silva et al., 2014). Por exemplo, Lima et al. (2006) mediram os componentes do balanço hídrico em feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.), sob um Latossolo Amarelo em condições de sequeiro no brejo paraibano, e encontraram que a evapotranspiração foi o principal componente, com valor médio de $4,12 \text{ mm d}^{-1}$.

Os estudos relacionados aos componentes do balanço hídrico e consumo da água pelo feijão comum ainda são incipientes nas condições climáticas do Agreste Meridional de Pernambuco. Essa falta de informações fica mais acentuada quando se quer saber esse consumo (evapotranspiração) em cada fase fenológica da cultura.

Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo determinar a evapotranspiração, bem como os demais componentes (drenagem profunda, ascensão capilar, variação do armazenamento de água, precipitação pluvial) por meio do balanço hídrico, em solo cultivado com feijão no município de São João, PE.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização, clima e solo da área experimental

O trabalho foi realizado em uma área de 2,5 ha cultivada com feijão comum (*P. vulgaris* L.), no Sítio Várzea do Barro situado no município de São João, na mesorregião do Agreste Meridional do estado de Pernambuco, ($8^{\circ} 51' 17,9''$ S, $36^{\circ} 22' 48''$ O e altitude de 694 m) (Figura 1).

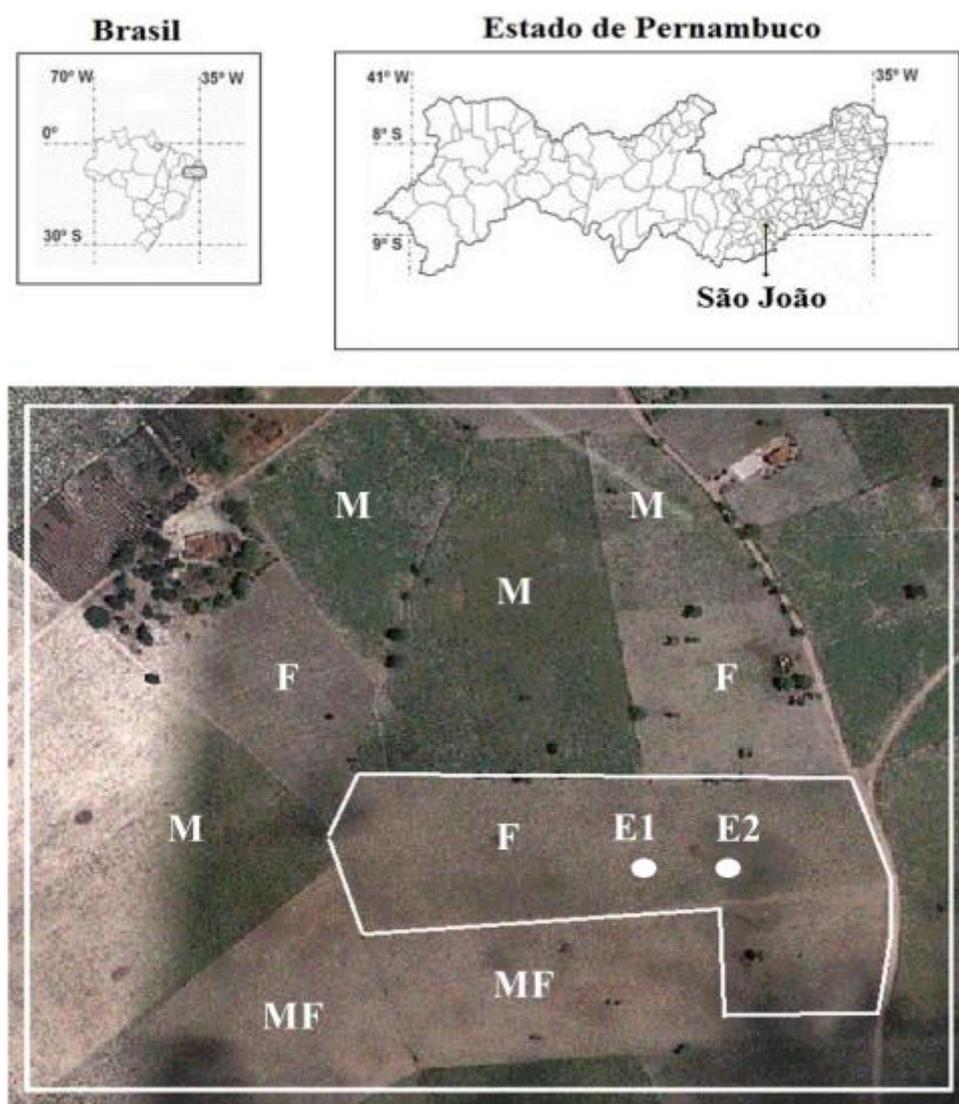


Figura 1. Localização da área experimental, com a disposição da estação meteorológica (E1) e sensores do solo (E2), e culturas implantadas em cada parcela (feijão, F; mandioca, M; consórcio de mandioca e feijão, MF)

Segundo Borges Júnior et al. (2012) a região apresenta clima tropical chuvoso, com verão seco e estação chuvosa compreendida nos meses de maio, junho, julho e agosto. De acordo com dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2013), a precipitação pluvial anual média é de 782 mm. O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico (Almeida, 2014). Nesse solo foi detectada a presença de lamelas de argila (Almeida, 2014).

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas profundidades de 0-20; 20-55 e 55-88 cm. Nas amostras deformadas, foram determinadas a composição granulométrica do solo, pelo método do densímetro, e a densidade de partículas (DP), pelo método do balão volumétrico (Embrapa, 1997). Nas amostras indeformadas, determinou-se a densidade do solo (Ds), utilizando-se o amostrador de Umland, com anéis de PVC com 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, e a microporosidade (Mic) usando a mesa de tensão, conforme Embrapa (1997). A porosidade total (PT) foi obtida pela relação entre densidade do solo e densidade de partículas. A macroporosidade (Mac) foi obtida pela diferença entre a PT e a Mic. Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural, porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo e densidade de partícula do Neossolo Regolítico em São João, PE

| Profundidade cm | Horizonte | Granulometria (%) | | | Classificação textural | PT | Mac | Mic | Ds | Dp |
|--|-----------|-------------------|-------|--------|---------------------------|---------|------|--------------------|------|------|
| | | Areia | Silte | Argila | | —— % —— | —— | g cm ⁻³ | | |
| São João: Neossolo Regolítico eutrófico típico | | | | | | | | | | |
| 0-20 | Ap | 88,0 | 10,0 | 2,0 | Areia | 43,1 | 36,7 | 6,3 | 1,52 | 2,66 |
| 20-55 | C1 | 87,1 | 8,9 | 4,0 | Areia | 41,9 | 34,4 | 7,5 | 1,57 | 2,69 |
| 55-88 | C2 | 85,2 | 8,8 | 6,0 | Areia | 42,1 | 27,9 | 14,2 | 1,54 | 2,66 |
| | Lamelas | 85,0 | 3,0 | 12,0 | Areia franca | 44,8 | 34,0 | 10,8 | 1,46 | 2,64 |

Ds, densidade do solo; Dp, densidade da partícula; PT, porosidade total; Mac, macroporosidade; Mic, microporosidade. Fonte: Almeida, 2014.

A limpeza e preparo do solo na área experimental foi realizada no período de 10 a 12/05/2013. Primeiramente foi realizada a redução da massa vegetal de crescimento espontâneo, ceifando-as e incorporando-as ao solo pela primeira passagem de uma grade niveladora, logo em seguida foi realizada a segunda gradagem, com o objetivo de

incorporar a adubação orgânica e nivelar a área de cultivo. A adubação orgânica foi realizada com esterco de aviário, aplicando-se de 5 a 6 toneladas ha⁻¹.

O plantio foi realizado no dia 18/05/2013, duas semanas após o início das primeiras chuvas, manualmente, por meio de matracas, colocando-se em média cinco sementes por cova, num espaçamento de 70 x 50 cm. A colheita foi realizada no dia 08/08/2013 com 82 dias após a emergência.

Houve somente uma intervenção para controle de plantas espontâneas (plantas daninhas) em todo o ciclo da cultura, realizada aos 18 dias após semeadura com herbicida seletivo (Podium e Flex).

A instalação da torre meteorológica e dos sensores para medir a umidade do solo ocorreu no período de 29 a 30/05/2013 (11-12 dias após o plantio).

2.2. Balanço hídrico

O balanço hídrico é descrito pela equação 1 (Silva et al., 2014):

$$\Delta A = P + I \pm Q - R - ET \quad (1)$$

sendo ΔA a variação de armazenamento de água no solo; P a precipitação; I a irrigação; Q o fluxo total de drenagem ($-Q$) ou ascensão capilar ($+Q$); R o escoamento superficial; e ET a evapotranspiração, todos variáveis em mm. Depois de mensurados todos os componentes do balanço hídrico, a ET é obtida como termo residual da Equação 1.

A cultura em estudo foi conduzida em condições de sequeiro, com isso o termo irrigação (I) foi nulo. Considerou-se nulo também a ocorrência de escoamento superficial de água (R), em razão de o solo ter declividade inferior a 5% (Lima et al., 2006; Brito et al., 2009; Souza et al., 2013).

A precipitação pluvial foi monitorada por meio de um pluviógrafo automatizado (modelo TB3 (CS700), Campbell Scientific), instalado numa torre no centro da área. A precisão do pluviógrafo é de 1% e suas leituras foram realizadas a cada minuto, com o valor total de 30 min armazenados num sistema de aquisição de dados (modelo CR1000, Campbell Scientific).

Foi utilizada a regra do trapézio (Libardi, 2000) para calcular o armazenamento acumulado de água no solo, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L = 55$ cm). A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi

determinada pela diferença dos valores do armazenamento de água do perfil no tempo inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\Delta A = [\theta_{(f)} - \theta_{(i)}] Z = A_f - A_i \quad (2)$$

sendo Z a profundidade e A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

Para a avaliação da umidade volumétrica do solo foram instalados sensores automatizados do tipo TDR (modelo CS616, Campbell Scientific), nas profundidades de 5, 25, 35, 55, 75 e 86 cm (Figura 2). Todos os dados foram coletados pelos sensores a cada minuto e a cada 30 min foi realizada a média de todos os dados contidos nesse intervalo de tempo, logo em seguida armazenados num sistema de aquisição de dados CR 1000 (Campbell Scientific).

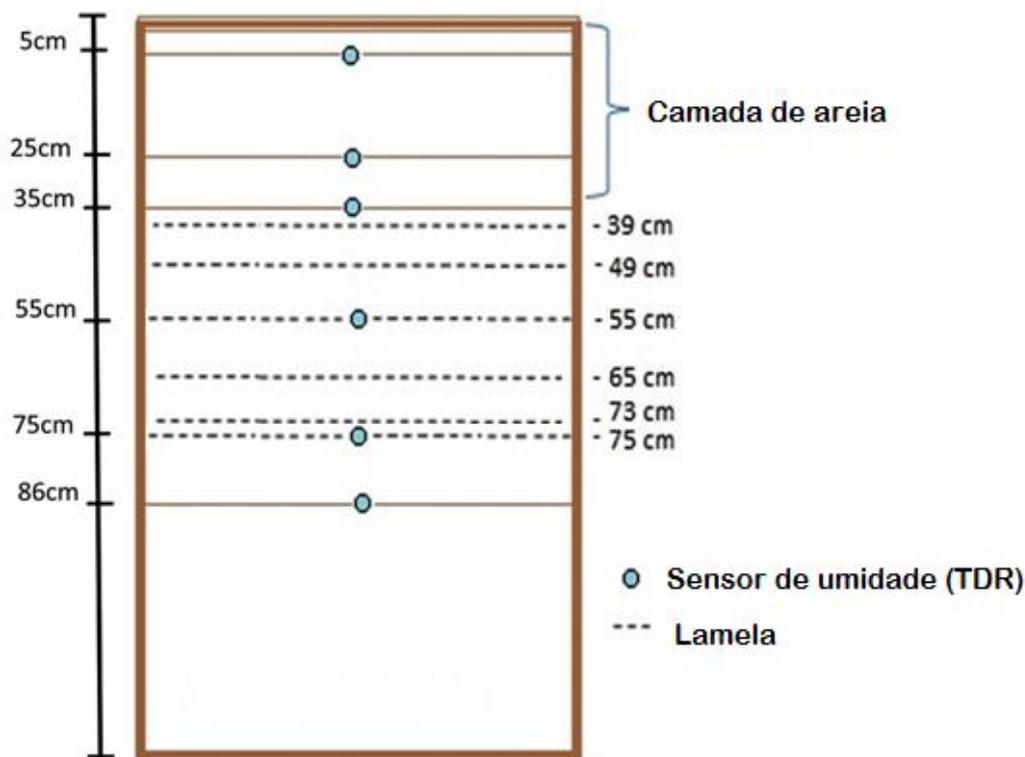


Figura 2. Profundidade de instalação dos sensores de umidade do solo na área experimental em São João, PE

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume

de solo estudado ($z = 35$ cm), respectivamente, foram determinados a partir da equação:

$$Q = \int_0^t dt = q \int_0^t dt = q(t - 0) = q\Delta t \quad (3)$$

sendo q (mm d^{-1}) a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo delimitado pela zona radicular e Δt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico.

As densidades de fluxo q foram estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham:

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta \psi t}{\Delta z} \quad (4)$$

sendo $K(\theta)$ (mm d^{-1}) a condutividade hidráulica não saturada e $\Delta \psi t / \Delta z$ o gradiente de potencial total em $z = 25$ cm, obtido pela equação abaixo:

$$\frac{\Delta \psi t}{\Delta z} = \frac{\Delta \psi t_{25} - \Delta \psi t_{55}}{\Delta z} \quad (5)$$

sendo ψt o potencial total da água no solo ($\psi t = \psi m + \psi g$) e Δz igual a 30 cm. O potencial gravitacional ψg (cm de água) foi definido pela posição no solo, ou seja, igual à profundidade z ; e o potencial matricial ψm (cm de água), por meio da equação de van Genuchten (1980) e dos dados da curva de retenção e de umidade do solo.

A curva de retenção foi obtida em laboratório usando-se extrator de Richards, de acordo com Embrapa (1997). Os dados das curvas de retenção da água no solo foram ajustados pela equação proposta por van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + |\alpha \psi m|^n]^{-m} \quad (6)$$

sendo θ_s o conteúdo de água no solo na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r o conteúdo residual de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); α representa o inverso da pressão de borbulhamento (m^{-1}) a partir da qual a água começa a ser drenada do solo previamente saturado; ψm o potencial matricial foi obtido por meio da inversão da Equação 6 e n e m os parâmetros de ajuste da equação.

O parâmetro θ_s foi obtido por pesagem direta das amostras, após o processo de saturação. Os parâmetros θ_r , α e n foram obtidos por meio da rotina Solver da planilha eletrônica Excel.

A condutividade hidráulica do solo não saturado, $K(\theta)$, foi obtida por meio da equação de Brooks & Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (7)$$

sendo K_s (mm d^{-1}) a condutividade hidráulica saturada do solo e η parâmetro de ajuste da equação.

A K_s foi obtida por meio de ensaios de infiltração, com infiltrômetro de anel simples com 15 cm de diâmetro, nas profundidades de 5, 25 e 40 cm, utilizando-se o método proposto por Haverkamp et al. (1994).

Os valores dos parâmetros das equações de van Genuchten (1980) para a curva de retenção (Equação 6) e de Brooks & Corey (1964) para a curva de condutividade hidráulica (Equação 7) estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros das curvas de retenção da água no solo [θ (h)] e da condutividade hidráulica [$K(\theta)$] nas profundidades 35 e 55 cm

| Camada | n | θ_s | η | K_s |
|--------|-------|------------------------------|--------|--------------------|
| cm | | $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ | | mm d^{-1} |
| 0-5 | 2,171 | 0,431 | 14,696 | 6.782,81 |
| 5-25 | 2,153 | 0,419 | 16,072 | 2.785,91 |
| 25-35 | 2,148 | 0,421 | 16,550 | 3.288,14 |

2.3. Medições biométricas (altura das plantas e biomassa)

As avaliações biométricas foram realizadas por meio de sete coletas no intervalo de 31/05/2013 a 02/08/2013. Cada coleta foi composta por quatro amostragens de uma área de 70 x 70 cm (49 cm^2) capaz de delimitar quatro covas da cultura (Figura 3).



Figura 3. Área de amostragem do feijão (19 DAP) em São João, PE

Depois do delimitar da área de amostragem, foi medida a altura (base da planta até o meristema apical) do feijão, de todas as plantas de cada cova. Logo em seguida foram coletadas todas as plantas inteiras (parte aérea e raiz), as quais foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Física do Solo na Unidade Acadêmica de Garanhuns - UAG/UFRPE.

No Laboratório todas as plantas foram medidas o comprimento do sistema radicular e separados da parte aérea da planta. Em seguida, os mesmos foram lavados para retirada do excesso de solo contido nas raízes. Finalizando a parte aérea da planta e sistema radicular, foram levados para secagem, em estufa a 65 °C por 72 horas.

Após a secagem foi avaliado a massa seca da parte aérea ($MSPA$) e massa seca da raiz (MSR). Determinado assim a massa seca total (MST) e razão de massa seca da parte aérea ($RMSA$), pelas seguintes equações:

$$MST = MSPA + MSR \quad (8)$$

$$RMSA = \frac{MSPA}{MST} \quad (9)$$

onde $MSPA$ é a massa seca da parte aérea (g) e MSR é a massa seca de raízes (g).

2.4. Índice de área foliar e área foliar

Utilizou-se um medidor automático de área foliar (modelo LICOR – LI300), para determinar a área foliar das plantas selecionadas aleatoriamente em cada amostragem. As seguintes equações foram usadas para calcular o índice de Área Foliar (*IAF*) e a razão da área foliar (*RFA*):

$$IAF = \frac{AFT}{AC} \quad (10)$$

$$RFA = \frac{AF}{MST} \quad (11)$$

sendo *AFT*, a área foliar total (m²), *AC* a área de coleta (m²) e *AF* é a área foliar (dm²).

2.5. Estágios e respectivas fases fenológicas do feijão

Durante o período experimental foram registradas as respectivas etapas de desenvolvimento da cultura a partir da primeira coleta biométrica e selecionados imagens gerais que representam cada uma delas, no período de 31/05/2013 a 08/08/2013 (Tabela 3 e Figuras 4 a 9). A descrição de cada etapa de desenvolvimento está apresentada na Tabela 4 conforme circular técnica 46 Embrapa (2001).

Tabela 3. Etapas do desenvolvimento da planta do feijoeiro comum no período de 31/05/2013 a 08/08/2013 em São João, PE

| Etapas | Período | Duração (dias) |
|------------------------|--------------------|----------------|
| V3-V4 | 31/05* a 28/06 | 29 |
| R5-R6 | 29/06 a 08/07 | 10 |
| R7-R8 | 09/07 a 23/07 | 15 |
| R9 | 24/07 a 03/08 | 11 |
| Senescência a colheita | 04/08 a 08/08 | 5 |
| Período sem cultura | 09/08 a 20/08/2013 | 12 |

*início das medições biométricas

Tabela 4. Etapas do desenvolvimento da planta do feijoeiro comum Circular Técnica 46 Embrapa (2001).

| Etapas ¹ | Descrição ² |
|---------------------|--|
| V0 | Germinação: absorção de água pela semente; emergência da radícula e sua transformação em raiz primária. |
| V1 | Emergência: os cotilédones aparecem ao nível do solo e começam a separar-se. O epicótilo começa o seu desenvolvimento. |
| V2 | Folhas primárias: folhas primárias completamente abertas. |
| V3 | Primeira folha trifoliolada: abertura da primeira folha trifoliolada e o aparecimento da segunda folhatrifoliada. |
| V4 | Terceira folha trifoliolada: abertura da terceira folha trifoliolada, as gemas e os nós inferiores produzem ramos. |
| R5 | Pré-floração: aparece o primeiro botão floral e o primeiro ráculo. |
| R6 | Floração: abre-se a primeira flor. |
| R7 | Formação das vagens: aparece a primeira vagem. |
| R8 | Enchimento das vagens: começa o enchimento da primeira vagem (crescimento das sementes). Ao final desta etapa, as sementes perdem a cor verde e começam a mostrar as características da cultivar. Início do desfolhamento. |
| R9 | Maturação fisiológica: As vagens perdem a pigmentação e começam a secar. As sementes adquirem a coloração típica da cultivar. |

¹V= Vegetativa; R= Reprodutiva

²Cada etapa inicia-se quando 50% das plantas mostram as condições que correspondem à descrição da etapa.



Figura 4. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento vegetativo (V3) do feijoeiro comum, no dia 01/06/2013 em São João, PE



Figura 5. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento vegetativo (V4) do feijoeiro comum, no dia 23/06/2013 em São João, PE



Figura 6. Início da pré-floração na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R5) do feijoeiro comum, no dia 07/07/2013 em São João, PE



Figura 7. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R8) enchimentos das vagens do feijoeiro comum, no dia 27/07/2013 em São João, PE



Figura 8. Crescimento da cultura na etapa de desenvolvimento reprodutivo (R9) maturação fisiológica do feijoeiro comum, no dia 03/08/2013 em São João, PE



Figura 9. Senescência e colheita do feijoeiro comum, no dia 08/08/2013 em São João, PE

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Precipitação pluvial e umidade volumétrica

A variação diária da precipitação pluvial e umidade volumétrica nas profundidades de 5, 25, 35, 55, 75 e 86 cm durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 é apresentada na Figura 10. O regime pluviométrico normalmente encontrado no Agreste Meridional de Pernambuco se inicia no final do mês de abril e dura até o final de agosto (Borges Júnior et al., 2012).

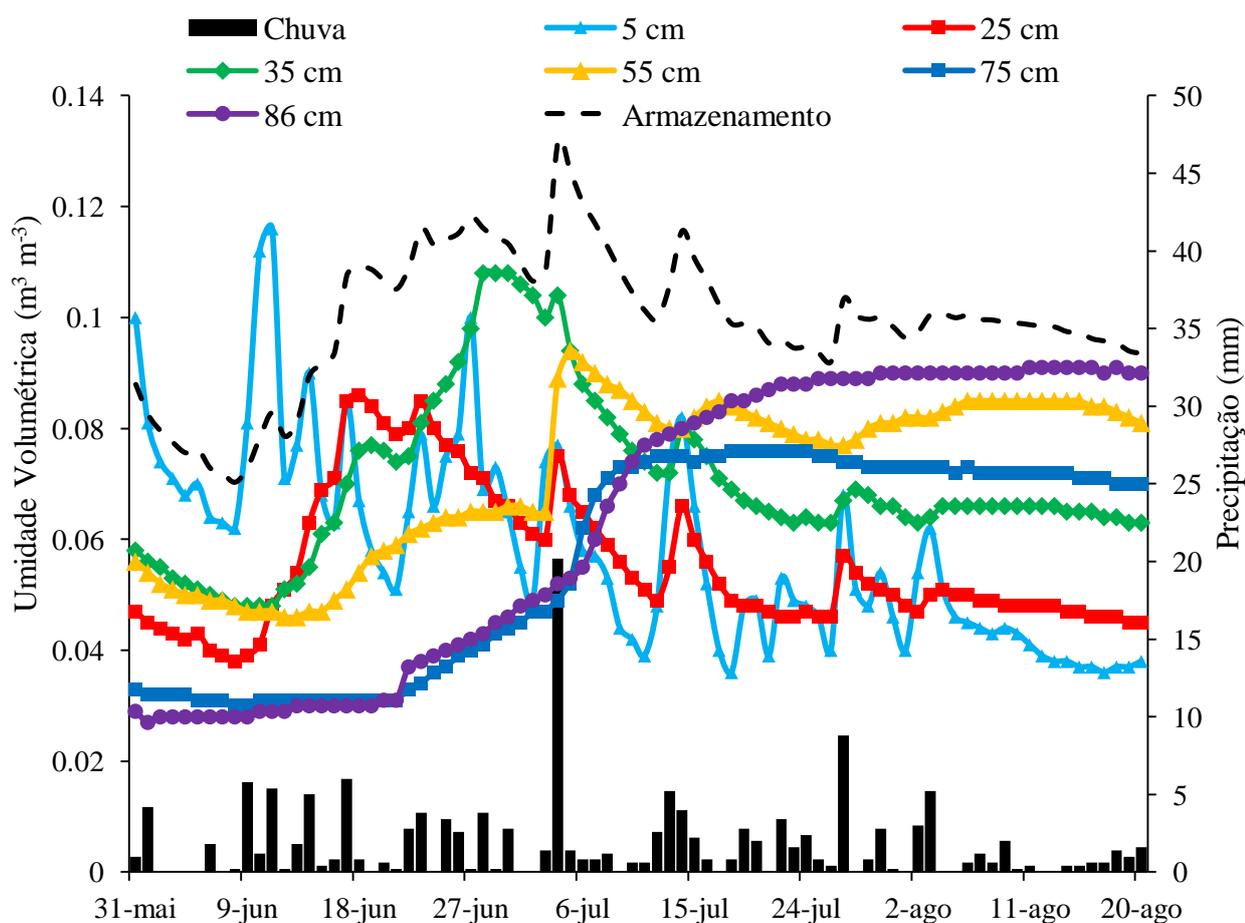


Figura 10. Variação diária da precipitação pluviométrica, armazenamento e umidade volumétrica do solo durante o ciclo da cultura do feijão no período de 30/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE

Pode se observar, que durante o ciclo dois períodos de estresse hídrico de diferentes magnitudes, devido à falta de chuvas, provocando decréscimo da umidade do solo nas profundidades superficiais de maior concentração de raízes, 25 cm e 35 cm.

Segundo o Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA) o município apresentou um total de 597,09 mm precipitado no ano de 2013. A precipitação pluviométrica total

mensurada no período de estudo foi de 143 mm, correspondendo a 27,85% do total no ano. Esses baixos índices pluviométricos são um reflexo do período de seca enfrentado no ano de 2012.

O maior volume precipitado ocorreu no dia 04/07/2013 com cerca de 20 mm, onde pode-se observar que a partir desse evento houve o maior pico de armazenamento de água no solo no período, como também a elevação dos valores de umidade do solo nas camadas mais profundas superando as camadas superficiais.

Segundo Back (2001) o feijão comum apresenta necessidade hídrica de 100 mm mensais de forma bem distribuída, sendo que essa cultura é sensível ao estresse hídrico, com reduzida capacidade de recuperação desse estresse por apresentar sistema radicular pouco desenvolvido. Observa-se que a precipitação não atingiu os 100 mm mensais, essa falta de água pode ter causado decréscimos na produção final, os prejuízos causados dependem da duração e severidade e do estágio de desenvolvimento da planta, sendo possível que a cultura tenha aprofundado um pouco mais sua malha radicular em busca maior conteúdo de umidade nas camadas mais profundas do solo para minimizar o efeito do estresse hídrico sofrido.

A partir do mês de agosto o regime hídrico entra em declínio com a redução das chuvas. Essa dinâmica é importante, pois nesse período se inicia a colheita do feijão, onde o agricultor necessita de dias sem ocorrência de precipitação para que haja a redução da umidade do grão, assim podendo ser colhido, secado e armazenado o mais breve possível.

A umidade do solo nas camadas superficiais (5 e 25 cm) foram as que apresentaram as maiores variações, podendo ser atribuído essa oscilação a extração de água pelas raízes, evapotranspiração e drenagem para as camadas mais profundas. Segundo Silva et al. (2014), a maior interferência dos componentes atmosféricos e concentração de raízes estão nas camadas mais superficiais do solo, sendo responsável pela retirada de água dele, com isso existe uma maior variação dos valores de umidade volumétrica nas camadas mais superficiais. No entanto, essas camadas são recarregadas rapidamente pelos eventos de precipitação.

Nas profundidades de 35, 55 e 75 cm ocorre o aparecimento de lamelas de argila como também a uma redução da macroporosidade e menor interferência da atmosfera que podem contribuir para que a umidade do solo se mantenha nessas profundidades, como observado em estudo realizado na mesma área por Almeida (2014), o que pode explicar o acúmulo crescente e retenção da umidade logo após os eventos de

precipitação pluvial. Os teores de argila encontrados nas lamelas são seis vezes maiores que os valores encontrados nas camadas de 0 a 20 cm e três vezes nas camadas 20 a 55 cm, podendo com isso atribuir as camadas mais profundas desse solo uma maior capacidade de retenção de água, que para as plantas pode representar um estímulo para o crescimento da malha radicular, assim explorando essas camadas em busca de água e nutrientes.

Segundo Silva et al. (2000) a retenção de água no solo reduz o risco de redução da produtividade do feijão, em função da sua maior capacidade de armazenamento de água, que possivelmente está associada ao aumento do teor de argila nas camadas mais profundas e redução de sua macroporosidade.

A retenção da umidade no solo logo após o período chuvoso é importantíssima para os cultivos subsequentes na região, que podem ser de feijão caupi (*V. unguiculata* L.) ou mandioca (*Manihot esculenta*) que ocorre logo após a colheita do feijão.

3.2. Biometria da cultura do feijão

Neste tópico serão apresentados todos os dados relacionados à biometria da cultura do feijão. Foram realizadas sete coleta de material vegetal no período de 31/05/2013 a 02/08/2013 (Tabela 5).

Tabela 5. Médias Biométricas do feijão comum no período de 31/05/2013 a 02/08/2013 em São João, PE

| Coletas | DAP | <i>MSPA</i> | <i>MSR</i> | <i>MST</i> | <i>BMS</i> | <i>RMSA</i> | <i>AFT</i> | <i>RAF</i> |
|------------|-----|-------------|------------|------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
| | | -----g----- | | | kg ha ⁻¹ | g g ⁻¹ | m ² | dm ² g ⁻¹ |
| 31/05/2013 | 13 | 1,44 | 0,88 | 2,34 | 41,04 | 0,61 | 0,03 | 1,14 |
| 11/06/2013 | 24 | 6,32 | 0,88 | 7,20 | 180,61 | 0,88 | 0,10 | 1,49 |
| 18/06/2013 | 31 | 20,78 | 3,08 | 23,32 | 593,79 | 0,89 | 0,35 | 1,45 |
| 28/06/2013 | 41 | 35,39 | 3,78 | 38,78 | 1011,04 | 0,91 | 0,76 | 1,98 |
| 04/07/2013 | 47 | 52,67 | 4,57 | 57,24 | 1504,86 | 0,92 | 1,25 | 2,61 |
| 23/07/2013 | 66 | 76,62 | 6,99 | 84,67 | 2189,14 | 0,92 | 0,54 | 0,65 |
| 02/08/2013 | 77 | 76,97 | 4,85 | 81,66 | 2199,02 | 0,94 | 0,16 | 0,20 |

MSPA, massa seca da parte aérea; *MSR*, massa seca da raiz; *MST*, massa seca total; *BMS*, biomassa seca; *RMSA*, razão de massa seca da parte aérea; *RFA*, razão da área foliar; *AFT*, área foliar total

Os valores de biomassa seca apresentaram aumento até a última coleta, aos 77 dias após o plantio (DAP). Mesmo com a senescência e desfolha da massa foliar houve um aumento da biomassa, explicado pelo acúmulo de biomassa seca na produção final (vagens e grãos).

A coleta realizada no dia 04/07/2013 (47 DAP) marca os maiores valores de cobertura do solo por ramos e folhas, observando-se que nesse estágio de desenvolvimento a cultura atinge seu máximo potencial de crescimento vegetativo vertical e horizontal. Segundo Cairo et al. (2008), a razão da área foliar (*RAF*), corresponde à área de folha disponível para realização da fotossíntese, ou seja, área foliar fotossinteticamente útil, que é usada pela planta para produzir 1g de massa seca. Condição alcançada pela cultura também aos 47 DAP com seu máximo valor de área fotossinteticamente útil ($2,61 \text{ dm}^2 \text{ g}^{-1}$).

Os dados relacionados à altura da cultura, comprimento da raiz e do índice de área foliar, estão apresentados na Figura 11.

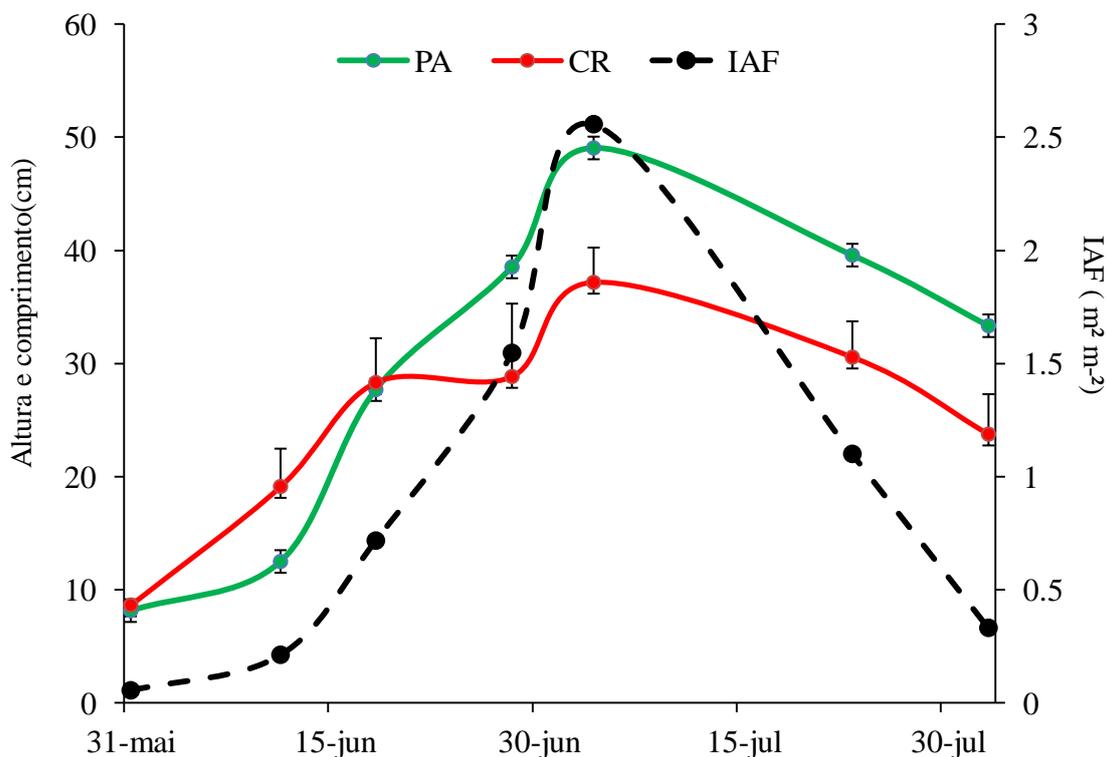


Figura 11. Evolução da altura da parte aérea (PA), comprimento da raiz (CR) e índice de área foliar (IAF) na cultura do feijão comum no período 31/05/2013 a 02/08/2013, São João, PE. As barras indicam o desvio padrão

As medições se iniciaram na etapa de desenvolvimento vegetativo (V3) 13 dias após o plantio da cultura, sendo nessa fase a altura média de $8,2 \pm 0,3$ cm, com comprimento de raiz médio de $8,7 \pm 0,5$ e (IAF) de $0,06 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Aos 47 DAP a cultura está no estágio de desenvolvimento fenológico R6 (limite da floração), onde o feijão inicia a fase reprodutiva de formação vagens. Nessa fase pode-se observar os valores máximos de altura e comprimento de raiz, que foram $49 \pm 3,2$ cm e $37 \pm 3,1$ cm, respectivamente.

O IAF também alcançou seu maior valor aos 47 DAP, com $2,56 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, para em seguida começar ocorrer seu declínio à medida que a planta atinge seu ciclo de crescimento. Esse comportamento do IAF é o normalmente encontrado em culturas de ciclo anual, onde ocorre um aumento da interferência das folhas superiores mais jovens sobre as inferiores (auto-sombreamento), causando uma redução na área fotossinteticamente útil (Benincasa, 2003).

Nas etapas de desenvolvimento subsequentes (R7-R8), correspondem ao início da redução da altura da parte aérea e diminuição do comprimento radicular, bem como do IAF, pois, à medida que a cultura vai chegando às fases de maturidade fisiológica e de senescência, nota-se uma acentuada redução dessas variáveis. Isso ocorreu devido à senescência natural das folhas, bem como pela incidência de sintomas de manchas e necrose foliar causadas pela doença fúngica antracnose (Figura 12).



Figura 12. Incidência de sintomas de mancha e necrose foliar causada por antracnose no feijão no dia 03/06/2013 em São João, PE

3.3. Componentes do balanço hídrico

A evolução dos componentes do balanço hídrico no feijão comum é apresentada na Tabela 5. O balanço hídrico foi realizado na camada de 0-35 cm, que corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular, no período de 82 dias.

Tabela 6. Componentes do balanço hídrico em feijão durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE

| Subperíodo | Fenologia | Duração (dias) | <i>P</i> | ΔA | <i>Q</i> | <i>ET</i> |
|--------------------|-----------|-------------------|--------------|------------|------------------------|-----------|
| | | | -----mm----- | | | |
| 31/05 - 09/06 | V3 | 10 | 13 | -1,9 | $-1,05 \cdot 10^{-11}$ | 16,7 |
| 09/06 - 19/06 | V3-V4 | 10 | 21,6 | 10,7 | $-7,65 \cdot 10^{-10}$ | 10,9 |
| 19/06 - 29/06 | V4 | 10 | 17,6 | 0,4 | $-1,95 \cdot 10^{-07}$ | 17,1 |
| 29/06 - 09/07 | R5-R6 | 10 | 28,6 | -6,6 | $-2,72 \cdot 10^{-07}$ | 35,1 |
| 09/07 - 19/07 | R7-R8 | 10 | 19,6 | -2,6 | $-2,24 \cdot 10^{-09}$ | 22,2 |
| 19/07 - 29/07 | R9 | 10 | 20,2 | 0,9 | $-2,78 \cdot 10^{-10}$ | 19,3 |
| 29/07 - 08/08 | SC | 10 | 13,6 | -1,1 | $-2,58 \cdot 10^{-10}$ | 14,7 |
| 08/08 - 20/08/2013 | PS | 12 | 8,8 | -1,4 | $-2,81 \cdot 10^{-10}$ | 10,0 |
| Total | | 82 | 143 | -1,4 | $-4,71 \cdot 10^{-07}$ | 146,0 |

SC, senescência a colheita; PS, período sem cultura; *P*, precipitação pluvial; ΔA , variação do armazenamento de água no solo; *Q*, fluxo de água no solo (valores negativos indicam drenagem e positivos, ascensão capilar); *ET*, evapotranspiração

O valor total de chuvas ocorridas no período de 31/05/2013 a 20/08/2013 foi de 143 mm, significando uma contribuição média de $1,74 \text{ mm d}^{-1}$, bem abaixo dos encontrados por Dourado-Neto & Fancelli (2000), os quais afirmaram que o volume precipitado deve variar de 300 a 600 mm para atender as necessidades hídricas do feijoeiro, com boa distribuição ao longo do ciclo e consumo diário de 3 a 4 mm.

Pode-se observar que a variação do armazenamento de água no solo (ΔA) acompanhou as variações dos eventos de precipitação, que foi a única entrada de água no sistema. Ao final do período estudado a ΔA apresentou valor de -1,4 mm, indicando que as saídas de água na camada de 0-35 cm, nesse período, foi superior a entrada de água.

O ΔA corresponde ao saldo de água no solo, se no intervalo de tempo considerado (nesta pesquisa cada subperíodo teve 10 a 12 dias); se a entrada (precipitação) de água no volume de solo for maior que as saídas (evapotranspiração e

drenagem) a ΔA será positiva (isto ocorreu em 03 subperíodos), caso contrário será negativa (isto ocorreu em 05 subperíodos). O ΔA apresentou uma variação de -6,6 a +10,7 mm, o que comprova que em determinados períodos ocorreu perda de água, isto é, as perdas por drenagem ($-Q$) que foram mínimas e o consumo pela cultura somado a evaporação da água diretamente da superfície do solo (ET) foi superior à quantidade fornecida pela precipitação (P), e em outros períodos ocorreu ganho de água.

Em relação aos fluxos de água na base do solo (profundidade de 35 cm), observa-se que somente existiu fluxo no sentido descendente (valores negativos), indicando a ocorrência de drenagem ($-Q$). No entanto, esses valores muito baixos, praticamente nulos, apesar das condições típicas dos Neossolos Regolíticos indicarem grande tendência à ocorrência de drenagem elevada, devido à constituição arenosa dos mesmos.

O valor total de ET no período de 31/05 a 20/08/2013 foi de 146,0 mm e o valor médio, de 1,78 mm d⁻¹. Na fase vegetativa do feijão, representada pelos três primeiros subperíodos (31/05 a 29/06/2013), o valor acumulado ET foi de 44,7 mm e média de 1,49 mm d⁻¹. Observou-se que os maiores valores de evapotranspiração (ET), ocorreram nos subperíodos com os maiores eventos de precipitação pluvial. Isso pode ser bem visualizado nos subperíodos 4-6, que engloba os dias 29/06 a 29/07/2013, com média de 2,56 mm d⁻¹, correspondendo aos 30 dias finais do estágio reprodutivo da cultura (R5-R9 e senescência a colheita). Lima et al. (2006) trabalhando com feijão caupi (*V. unguiculata*) em um Latossolo Amarelo, no município de Areia, PB, também sobre condições de sequeiro e utilizando a mesma metodologia, observaram valores médios de ET em torno de 4,12 mm d⁻¹, bem superiores ao encontrados nesse estudo. Essa diferença entre essas pesquisas pode ser explicada pela maior pluviosidade ocorrida em Areia, PB e pela maior capacidade de armazenamento de água pelo Latossolo Amarelo, quando comparada ao Neossolo Regolítico.

Pode-se observar, ainda, no quarto subperíodo (29/06/2013 a 09/07/2013), que a ET obteve o maior valor total (35,2 mm), com média de 3,52 mm d⁻¹, e que à medida que avança o ciclo da cultura há uma redução dos valores de ET . Essa diferença pode ser explicada pelo estágio fenológico da cultura, uma vez que no quarto subperíodo temos uma condição de intensa massa verde cobrindo toda área de cultivo, além dos maiores índices de precipitação com 28,6 mm, enquanto que nos últimos subperíodo a cultura está na fase de senescência e início da colheita, além da redução das chuvas.

4. CONCLUSÕES

Períodos de elevada pluviosidade resultaram em maior armazenamento de água no solo e maior evapotranspiração, como também, não ocorreram perdas de água no solo por drenagem.

A evapotranspiração total e média do feijão durante o período experimental foi de 146,0 mm e 1,78 mm d⁻¹, respectivamente. A cultura apresentou seu maior consumo de água na etapa de desenvolvimento reprodutivo, com valor médio de 2,56 mm d⁻¹.

Os resultados indicando que nessas condições a cultura apresenta risco de perdas de produtividade devido aos baixos índices de pluviosidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. V. D. L. **Caracterização morfológica, química e físico-hídrica de Neossolos Regolíticos no Agreste Meridional de Pernambuco**. 2014. p. 75 (Dissertação Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE/UAG.
- ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; DALL’OLIO, A.; SALCEDO, I. H. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p. 29-34, 2000.
- APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br>>. Acesso em 23/03/2014.
- AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 241-254, 2003.
- BACK, A. J. Necessidade de irrigação da cultura de feijão no sul do estado de Santa Catarina. **Revista de Tecnologia e Ambiente**, v.7, p. 35-44, 2001.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. p. 42
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. T.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola**, vol.16, 2012.
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; GIBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 295-303, 2009.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins, Colorado State University, 1964.
- CAIRO, P. A. R.; OLIVEIRA, L. E. M.; MESQUITA, A. C.; **Análise de Crescimento de Plantas**. Vitória da Conquista: UESN, 2008. p. 72
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v.1, n.2 (2013) – Brasília : Conab, 2013-v. Mensal. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 19/05/2014.

- CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; ROCHA, G. C. Balanço de água em volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 1-10, 2005.
- DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Descrição dos estádios fenológicos e ecofisiologia**. In: Produção de feijão. Guaíba: Agropecuária, 2000, p. 33-45.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. p. 212, 1997.
- GOMES, C. A.; LIMA, J. R. S.; PADILHA, K. M.; ANTONINO, A. C. D.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; SOUZA, E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Uso de Água em Cultivo de Mamona no Agreste Meridional de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, p. 77-87, 2013.
- GOUVEIA NETO, G. C.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, J. M.; SOUZA, C.; SILVA, I. F. Estimativa da evapotranspiração da mamona e seus componentes (evaporação e transpiração) na microrregião do Brejo Paraibano. **Irriga**, v.16, p. 246-258, 2011.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, p. 2.931-2.935, 1994.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO (IPA). Índices Pluviométricos. Disponível em: <http://www.ipa.br/indice_pluv.php#calendario_indices> Acesso em 02/03/2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Banco de dados agregados. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 01/06/2012.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba, ESALQ, 2000. p. 509
- LIMA, E. P. **Estimativa da evapotranspiração e do balanço hídrico a partir de imagens de satélite de duas sub-bacias do Paracatu**. 2010. p. 161 (Tese Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa – UFV.
- LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, p. 89-95, 2006.

- SILVA, R. A. B.; LIMA, J. R. S.; GONDIM, P. S. S.; SOUZA, E. S.; BARROS JÚNIOR, G. Balanço Hídrico em Neossolo Regolítico cultivado com braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p. 147-157, 2014.
- QUINTELA, E. D. Manejo integrado de pragas do feijoeiro. Santo Antônio de Goiás, GO: **Circular Técnica 46**, Embrapa Arroz e Feijão, 28 p, 2001 (Informe de Pesquisa).
- SILVA, T.R.B.; LEMOS, L.B.; TAVARES, C.A. Produtividade e característica tecnológica de grãos em feijoeiro adubado com nitrogênio e molibdênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p. 739-745, 2006.
- SILVA, V. R., REINERT, D. J., REICHERT, J. M. Densidade do Solo, Atributos Químicos e Sistema Radicular do Milho Afetados pelo Pastejo e Manejo do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p. 191-199, 2000.
- SOARES, W. A.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIRA, C. A. B. O. Simulação dos Fluxos de Água e de Energia na Microbacia Hidrográfica da Represa Vaca Brava no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, p. 185-196, 2013.
- SOUZA, C.; ANDRADE, A. P.; LIMA, J. R. S. ; ANTONINO, A. C. D. ; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p. 3-10, 2013.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.

**CAPÍTULO II - EVAPOTRANSPIRAÇÃO E FLUXOS DE CO₂ NA CULTURA
DO FEIJÃO SOB CONDIÇÕES DE SEQUEIRO**

RESUMO

Em virtude das mudanças climáticas globais, estudos que quantifiquem os fluxos de água e de energia (evapotranspiração) e os fluxos de CO₂ de culturas agrícolas são muito importantes. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo determinar os fluxos de energia (saldo de radiação, fluxos de calor latente, de calor sensível e de calor no solo), de CO₂, bem como a evapotranspiração (ET) do feijão em condições de sequeiro. O estudo foi realizado no Sítio Várzea do Barro, situado no município de São João, Pernambuco (8° 51' 17,9''S, 53° 22' 48'' W e altitude 694 m), durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013. Para a determinação dos fluxos de CO₂, de energia (LE, H e G) e da ET foi utilizada a metodologia da correlação dos turbilhões. Para isso, foi instalada uma torre micrometeorológica no centro de uma área cultivada com feijão, composta de um analisador de gás infravermelho (EC 150, Campbell Scientific), para medir os fluxos de CO₂ e de calor latente (LE), e de um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific), para medir o fluxo de calor sensível (H). Além disso, foram instalados um saldo radiômetro, para medir o saldo de radiação (Rn) e fluxímetros, para medir o fluxo de calor no solo (G). Dos resultados, verificou-se que o fechamento do balanço de energia (relação entre Rn-G e H+LE) apresentou bom coeficiente de determinação (R² de 0,967). A maior parte (78,46%) do Rn foi usada como LE, ou seja, para o processo de ET. Em relação a ET, observou-se que o valor total durante todo período experimental foi de 179,3 mm, com média de 2,2 mm d⁻¹. A produtividade do feijão foi de 2.050 kg ha⁻¹, com eficiência do uso de água de 1,16 kg m⁻³. Em relação aos valores de fluxos de CO₂, observou-se que os mesmos variaram de -0,75 a -11,21 μmol m⁻² s⁻¹, indicando a ocorrência de sequestro de carbono pelo feijão. Em média, o feijão sequestrou 54 kg de C ha⁻¹ por dia, o equivalente a 3,3 t de C ha⁻¹ durante o período experimental.

Palavras-chave: Correlação dos turbilhões, carbono, fluxo de calor latente.

ABSTRACT

Because of global climate change, studies that quantify the water and energy flows (evapotranspiration) and the crops CO₂ streams are very important. The study was conducted on Sítio Várzea do Barro, located in the municipality of São João Pernambuco (8 51 '17.9 "S, 536 22' 48 " W and altitude 694 m) during the period 31/05/2013 to 08/20/2013. To determine the CO₂ and energy fluxes (LE, H and G) and ET was used the eddy covariance method. For this, a micrometeorological tower in the center of the area was installed, consisting of an infrared gas analyzer (EC 150, Campbell Scientific), to measure CO₂ and latent heat (LE) fluxes, and an anemometer three-dimensional sonic (CSAT3, Campbell Scientific), to measure the sensible heat flux (H). In addition, a net radiometer was installed to measure the net radiation (Rn) and soil flux plate for measuring the soil heat flux (G). From the results, it was found that the closure of the energy balance (Rn-G/H+LE) showed good coefficient of determination ($R^2 = 0.967$). The major part of Rn (78.46%) was used as LE. In relation to ET, it was observed that the total value throughout the experimental period was 179.3 mm, with a mean of 2.2 mm d⁻¹. Crop yield was 2,050 kg ha⁻¹, with water use efficiency of 1.16 kg m⁻³. Regarding the CO₂ fluxes, it was observed that the same varied from -11.21 to -0.75 μmol m⁻² s⁻¹, indicating the occurrence of carbon sequestration by the crop. On average, bean sequestered 54 kg C ha⁻¹ per day, the equivalent to 3.3 t C ha⁻¹ during the trial period.

Keywords: Correlation of eddies, carbon, latent heat flux.

1. INTRODUÇÃO

Agroecossistemas são capazes de reter carbono na forma de biomassa viva durante o ciclo da cultura, como também os resíduos de biomassa podem ser incorporados na forma de matéria orgânica no solo, com isso desempenham um importante papel no ciclo global do carbono. A medição precisa dos fluxos de CO₂ é, portanto, necessária para melhor entendimento do ciclo do carbono nos ecossistemas terrestres (Pavelka et al., 2007).

A técnica de covariância de vórtices turbulentos vem sendo utilizada em estudos sobre os fluxos de superfície. Este método determina os fluxos de CO₂ e vapor d'água através da covariância entre as flutuações na velocidade vertical do vento, na temperatura e na concentração de CO₂ e H₂O. Esses fluxos são utilizados para estimar as trocas líquidas de carbono, água, fluxo de calor sensível e calor latente, entre a atmosfera e os ecossistemas (Wilson et al., 2001; Baldocchi et al., 2003; Souza Filho et al., 2005).

Pesquisas sobre a interação biosfera-atmosfera do fluxo de CO₂ permitem que se avaliem o impacto de eventuais mudanças ambientais no mesmo, incluindo mudanças no uso do solo, na variabilidade climática e no aumento de concentração de CO₂ na atmosfera (Gallon et al., 2006).

A partição do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE) interfere diretamente na determinação do ciclo hidrológico, no desenvolvimento da camada limite, no tempo e no clima, influenciando a precipitação (Andrade et al., 2009). Modificações na partição de energia entre calor latente e calor sensível podem afetar os fluxos da superfície e como resultado modificar o clima de uma microrregião (Wever et al., 2002; Foley et al., 2003)

Os estudos relacionados à troca de energia entre a superfície e a atmosfera são cada vez mais importantes para caracterização do microclima local, para a identificação das interações existentes entre a atmosfera e as culturas (Biudes et al., 2009).

Regiões onde grande parte da população desenvolve atividades agrícolas, como a agricultura de sequeiro, por exemplo, com baixo grau de tecnificação e elevada dependência do regime pluviométrico, estão sujeitas aos potenciais impactos negativos sobre os recursos hídricos e suas consequências sobre esse sistema de cultivo, poderão comprometer a população da região (Angelotti et al., 2011).

Assim sendo, pesquisas que quantifiquem os fluxos de CO₂, bem como os fluxos de energia e conseqüentemente a evapotranspiração, são muito importantes para

compreender os mecanismos ambientais que controlam o ciclo do carbono. Esses estudos também podem fornecer dados para que os tomadores de decisão possam definir melhores estratégias de adaptação das culturas, às prováveis mudanças climáticas globais.

Diante dessa importância, os fluxos de CO₂ e/ou de energia vêm sendo medidos em vários ecossistemas no Brasil e no mundo (Neves et al., 2008; Hernandez-Ramirez et al., 2011; Lima et al., 2011; Bai et al., 2012; Kim et al., 2012; Qun et al., 2013; Ago et al., 2014).

No entanto, apesar da grande importância da cultura do feijão, existem relativamente poucos estudos disponíveis medindo e/ou simulando continuamente os fluxos de CO₂ e energia, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo quantificar os fluxos de energia (evapotranspiração) e de CO₂ em feijão, sob condições de sequeiro no Agreste Meridional de Pernambuco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A localização, clima e solo da área experimental já foram descritos na metodologia do capítulo anterior. Assim, nesse capítulo, serão mostradas as metodologias e medições não descritas anteriormente.

2.1. Medições e sistema de aquisição de dados

Para as medições meteorológicas foi instalada, no centro da área, uma torre metálica para suporte de sensores eletrônicos de alta frequência, que obtiveram medidas de turbulência, e instrumentos eletrônicos de baixa frequência, que mediram velocidade e direção do vento, umidade relativa e temperatura do ar, radiação global, saldo de radiação, fluxo de calor no solo e precipitação pluvial (Tabela 1). Os dados desses sensores foram lidos a cada minuto e armazenados a cada 30 minutos em um sistema de aquisição de dados (CR1000, Campbell Scientific).

Tabela 1. Instrumentos utilizados nas medições meteorológicas

| Variável | Instrumento(s) | Modelo | Altura ou profundidade(m) |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------------------|
| *Fluxo de calor no Solo | Fluxímetro | HFP01 | 0,05 |
| Saldo de Radiação | Saldo | CNRL Net | 2 |
| | Radiômetro | Radiometer | |
| Radiação Global | Piranômetro | LI200X | 2 |
| Velocidade e Direção do Vento | Anemômetro | Met One 034b | 0,5 |
| | | Windset | 1 |
| Umidade Relativa e Temperatura do ar | Termohigrômetro | HMP45C | 0,5 |
| | | | 1 |
| Precipitação | Pluviógrafo | TB3 (CS700) | 1 |

* o fluxo de calor no solo foi medido a 0,05 m de profundidade

As medidas de alta frequência das componentes do vento, temperatura do ar e concentrações de vapor de água e de CO₂ foram realizadas com o sistema de covariância dos vórtices turbulentos, composto por um analisador de gás infravermelho para medir os fluxos de CO₂ e H₂O de caminho aberto (EC 150, Campbell Scientific) e um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell Scientific) de alta frequência para medir fluxo de calor sensível (H). Esses dados foram lidos numa taxa de 10 Hz (10 vezes por segundo) e os valores de cada 30 minutos, armazenados numa central de aquisição de dados (CR1000, Campbell Scientific).

2.2. Fluxos de CO₂, fluxos de calor latente (LE), sensível (H)

O cálculo dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e de dióxido de carbono (CO₂) foi realizado utilizando a técnica da correlação dos turbilhões. Para tanto foi utilizado um programa desenvolvido pelo CPTEC/INPE. O programa calcula as flutuações turbulentas em intervalos de 30 minutos, realizando uma série de correções necessárias para quantificar os fluxos, conforme a metodologia sugerida por Aubinet et al. (2000). Foi aplicada a rotação de coordenadas dos vetores de vento e correções de resposta de frequência de acordo com o método descrito por Moore (1986), enquanto as correções das covariâncias e variâncias, devido às flutuações de umidade, são realizadas de acordo com a metodologia de Schotanus et al. (1983).

Os fluxos turbulentos de H, LE e CO₂ foram determinados, respectivamente, por meio das equações 1, 2 e 3:

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (1)$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'} \quad (2)$$

$$F_c = \rho \overline{w'\rho_c'} \quad (3)$$

em que H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$); LE é o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); F_c é o fluxo de CO₂ ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$); w' representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média; T' é a componente turbulenta da temperatura do ar (K); q' é a componente turbulenta da umidade específica do ar ($kg kg^{-1}$); C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} K^{-1}$); L_v é o calor latente de vaporização ($J kg^{-1}$); ρ é a densidade do ar seco ($kg m^{-3}$) e ρ_c' representa a variação da densidade do escalar c em relação à sua média, sendo a barra horizontal sobre o produto a covariância entre $w'\rho_c'$, $w'q'$ e $w'T'$, respectivamente..

A ET foi obtida dividindo-se o LE, em $MJ m^{-2} d^{-1}$, pelo calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 MJ kg^{-1}$)

A evapotranspiração de referencia (ET_o) foi obtida pelo método de Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(Rn-G) + \left\{ \gamma \frac{900}{T+273} \right\} u_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma(1+0,34 u_2)]} \quad (4)$$

em que, *ET_o* é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar (kPa °C⁻¹); *Rn* é o Saldo de radiação medida em campo (MJ m⁻² dia⁻¹); *G* é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ a constante psicrométrica; *T* é a temperatura média do ar; *u₂* é a velocidade média do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); *e* é a pressão do vapor d'água do ar (kPa) e *e_s* é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa).

2.3. Produtividade do feijão

A determinação da produtividade do feijão foi realizada aos 82 dias após o plantio, por meio da colheita de todas as plantas dentro de uma área de 200 m². Após a colheita, colocou-se os grãos para secar, ficando numa umidade de 13%, e depois calculou-se a produtividade em kg ha⁻¹.

Também foi determinada a eficiência no uso da água pela cultura, conforme a equação proposta por Hatfield et al. (2001).

$$EUA = \frac{Y}{ET} \quad (5)$$

em que *EUA* é a eficiência no uso da água (kg ha⁻¹ mm⁻¹); *Y* é a produtividade de grãos da cultura (kg ha⁻¹); e *ET* é a evapotranspiração da cultura (mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor e precipitação pluvial

Todas as medições experimentais ocorreram no período de 31/05/2013 a 20/08/2013, totalizando 82 dias. Na Tabela 2, estão as Normais Climatológicas (1960-1990) da cidade de Garanhuns – PE, referentes aos meses de junho, julho e agosto.

Tabela 2. Normais Climatológicas para a cidade de Garanhuns, PE

| Meses | Precipitação (mm) | T _{máx} (°C) | T _{med} (°C) | T _{min} (°C) | UR (%) |
|--------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Junho | 127,1 | 23,0 | 19,2 | 16,8 | 90,1 |
| Julho | 135,3 | 22,1 | 18,4 | 16,0 | 91,6 |
| Agosto | 66,2 | 23,1 | 18,4 | 15,6 | 88,8 |

Fonte: INMET em 1992

O experimento ocorreu durante toda a estação chuvosa responsável pela manutenção hídrica do cultivo, onde apresentou temperaturas máximas do ar de 29,5°C, com mínimas de 15,03°C e uma média diária de 20,48 °C. Houve uma amplitude térmica média de 7,18°C no período estudado (Figura 1). Para o ano de 2013 as temperaturas máxima e média nos meses de junho, julho e agosto foram superiores aos valores da normal climatológica.

O feijoeiro exige valores médios de temperaturas em torno de 21°C com mínimas de 12°C e máximas de 29°C. Temperatura do ar acima dos 35°C pode influenciar de maneira negativa o percentual de vigamento das vagens, como também temperaturas abaixo dos 12°C, na fase de florescimento, podem causar aborto das flores e conseqüentemente redução de rendimento (Silva & Didonet, 2005). Dessa foram, como se pode observar pelos dados da Figura 1, não ocorreram valores de temperatura do ar que fossem prejudiciais ao cultivo do feijão no período de estudo.

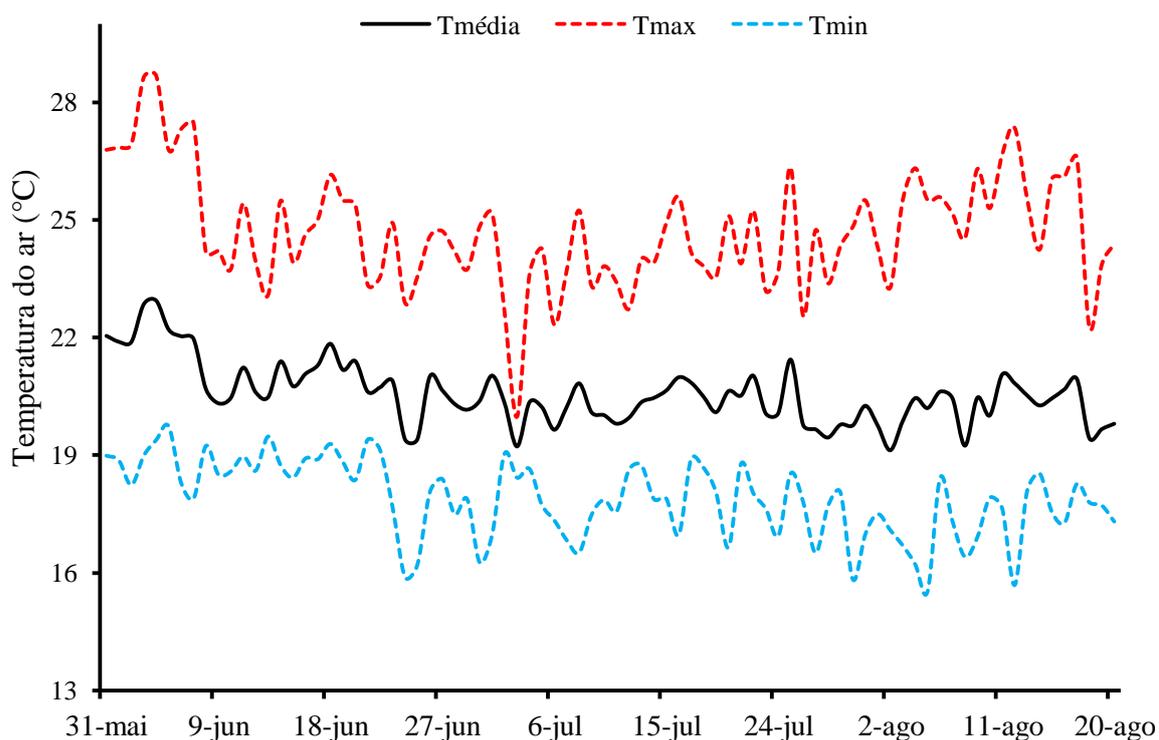


Figura 1. Variação dos valores médios, máximos e mínimos de temperatura do ar durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE

A umidade relativa (UR) apresentou valores elevados durante todo o período estudado, variando de 77,62 a 96,38%, com uma média de 87,8% (Figura 2). O déficit de pressão de vapor (DPV), apresentou pouca variação em todo o período de medições, apresentando média de 2,42 kPa. No entanto, ambos os parâmetro estão intimamente ligado com a temperatura do ar (T_{ar}) e, conseqüentemente, um aumento ou redução da temperatura do ar que irá se refletir em elevação ou diminuição dos valores de DPV, ocorrendo o inverso com a UR. Desse modo, espera-se que ao se aproximar o término do período chuvoso, possa haver aumento nos valores de DPV.

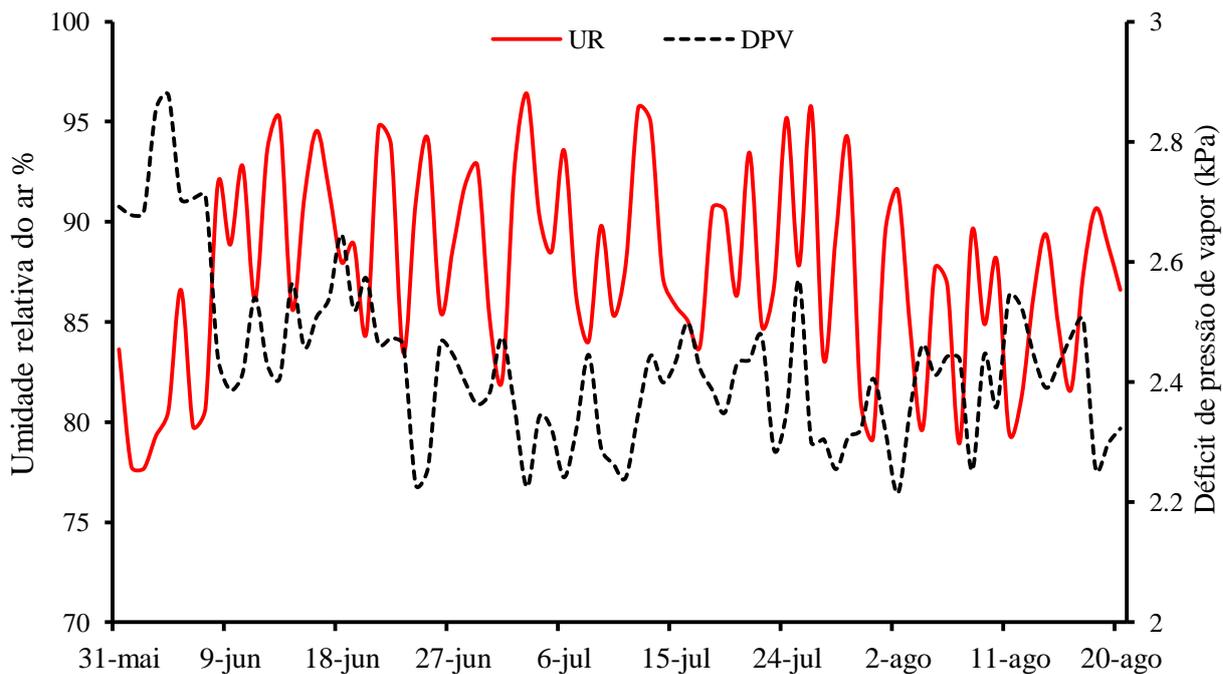


Figura 2. Variação dos valores médios de umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE

Na Figura 3 é apresentado o comportamento diário da precipitação no período compreendido de 31/05 a 20/08/2013.

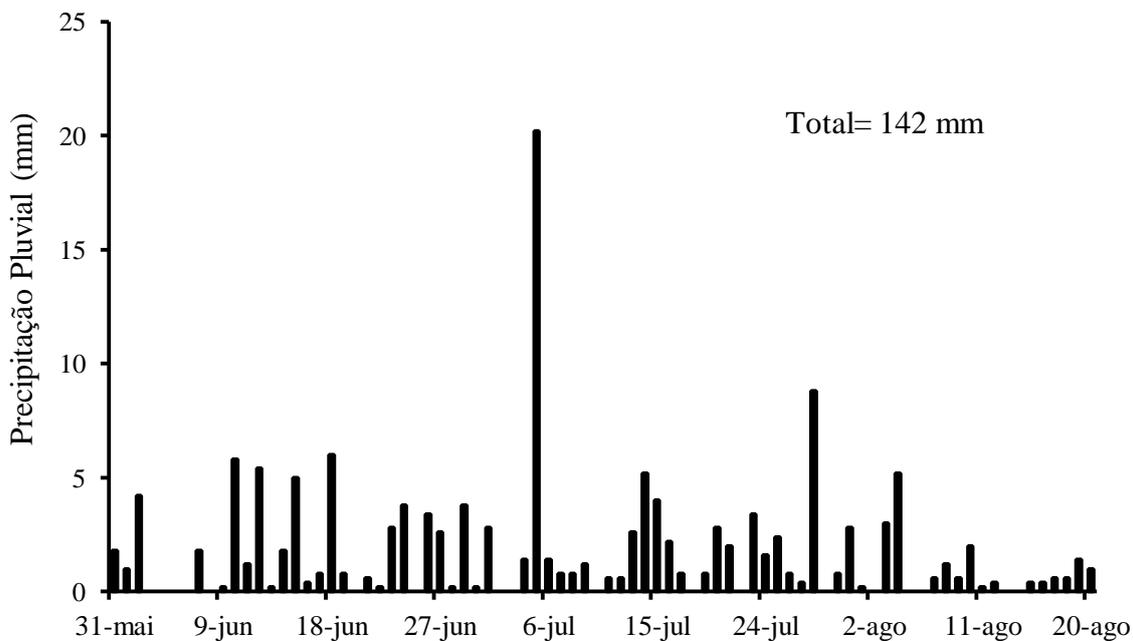


Figura 3. Precipitação pluvial durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013 em São João, PE

Observa-se que ocorreram chuvas bem distribuídas em todo período experimental, uma vez que dos 82 dias do período experimental ocorreram precipitações em 64 dias, apesar das mesmas apresentarem valores diários pequenos (média de $1,74 \text{ mm d}^{-1}$). O maior valor de precipitação ocorreu no dia 04/07/2013 com 20,2 mm, sendo o valor de todo período experimental de 144,6 mm.

3.2. Componentes do balanço de energia

Na Figura 4 tem-se o fechamento do balanço de energia diário durante o período experimental.

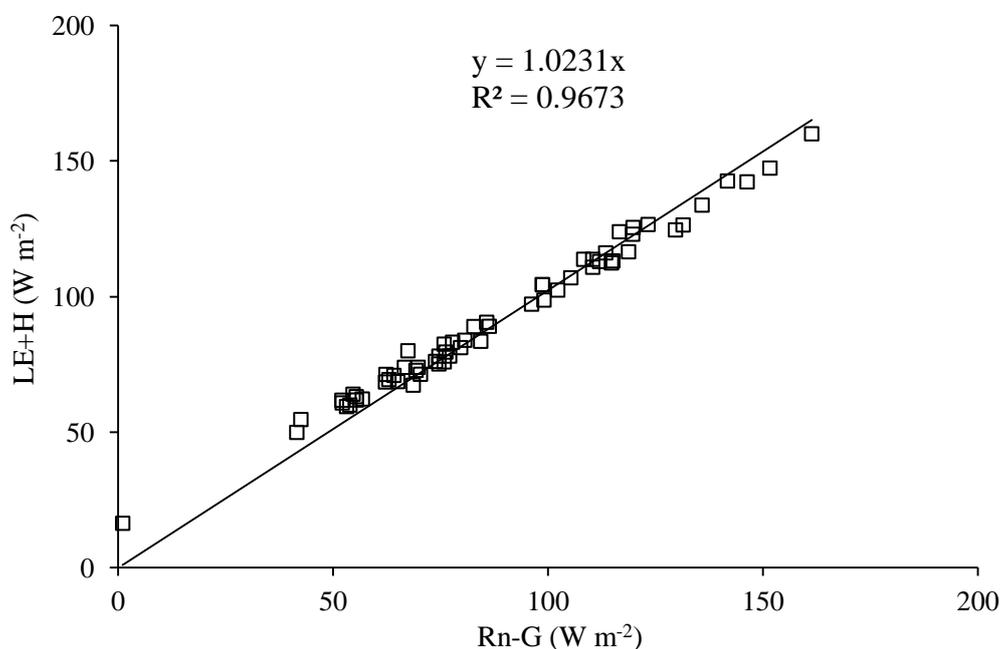


Figura 4. Fechamento do balanço de energia na cultura do feijão durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013, São João, PE

Esse fechamento do balanço de energia é necessário quando se realizam pesquisas com a metodologia da correlação dos turbilhões (eddy covariance), uma vez que os quatro termos (Rn, G, H e LE) do balanço de energia são medidos separadamente. O fechamento é feito por meio da relação entre a energia disponível (Rn-G) e a soma dos fluxos de calor latente e sensível (LE+H). Quanto maior for o coeficiente de determinação no fechamento do balanço de energia, mais confiáveis são os dados de fluxo de calor latente (LE) e de calor sensível (H), obtidos pela metodologia da correlação dos turbilhões.

Nesta pesquisa foi encontrado um R^2 de 0,967, o que está bem acima do intervalo de valores encontrados por muitos pesquisadores, que encontram problemas no fechamento do balanço de energia, o que não ocorreu. Wilson et al. (2002), em pesquisa realizada com dados de mais de 22 lugares da rede FLUXNET (rede mundial que mede os fluxos de energia e de CO_2), encontraram valores de R^2 variando de 0,53 a 0,99.

Na Figura 5, são apresentados os valores diários do comportamento da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn), como também sua partição em fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G).

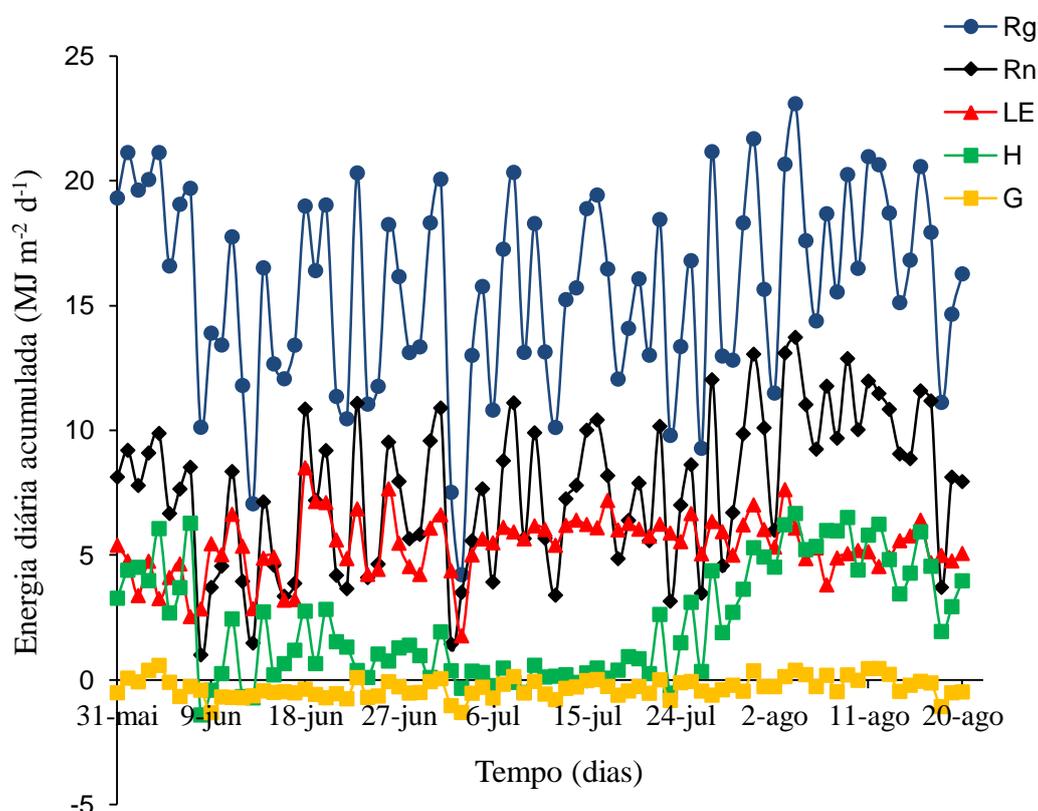


Figura 5. Variação diária da radiação global (Rg), do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G) durante o período de 31/05/2013 a 20/08/2013, São João, PE

Observou-se que a radiação solar global (Rg) variou de 4,21 a 23,08 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, com valor médio de 15,72 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$; já os valores do saldo de radiação (Rn) oscilaram de 0,99 a 13,72 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, com valor médio de 7,66 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$. Os valores do fluxo de calor do solo (G) praticamente não tiveram alterações, com valores muito reduzidos.

Em relação ao LE, observou-se que seus valores variaram de 1,75 a 8,49 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, e média de 5,36 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$. À medida que houve o desenvolvimento da cultura,

ocorreu um aumento do LE, desde a etapa de desenvolvimento vegetativo (V3-V4) até a fase de maturação fisiológica (R9) no período de 31/05 a 03/08/2013.

Já a energia utilizada para o aquecimento do ar, ou seja, fluxo de calor sensível (H) apresentou valores bem menores que o LE, com valores máximo, mínimo e médio de 6,66; -1,42 e 2,25 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente. Observa-se, ainda, que o H aumentou a partir da maturação fisiológica (R9), com os maiores valores na fase de senescência a colheita (SC). Esse aumento do H nessas fases, também está relacionada com a redução das chuvas e retirada da cultura (Figura 3).

Souza et al. (2012), em cultivo de soja na Amazônia, também encontraram comportamento semelhante do H, a diminuição total das chuvas durante a fase final do cultivo, fez com que consumo da energia disponível fosse preferencialmente para o aquecimento do ar, ou seja, fluxo de calor do sensível.

Durante os meses de junho e julho ocorreram precipitações durante praticamente todos os dias (Figura 3), conseqüentemente, proporcionou a manutenção e armazenagem da umidade do solo. Esse período de maior disponibilidade hídrica (maior umidade do solo) ajustou o fluxo de calor latente (LE) a se manter superior ao fluxo de calor sensível (H), o que ocorreu de maneira inversa e gradativa no final do ciclo, quando se inicia a redução do período chuvoso e diminuição da umidade do solo nas camadas superficiais.

As variações diárias da razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global (Rn/Rg) e das razões entre os fluxos de calor latente, sensível e no solo (LE/Rn, H/Rn e G/Rn) estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Médias diurna da radiação global (Rg), saldo de radiação (Rn), fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor sensível (H) e no solo (G) em Wm^2 , e razão Rg e Rn, durante as etapas de desenvolvimento do feijão no período de 31/05/2013 a 08/08/2013, São João, PE.

| Etapas de desenvolvimento | Duração Dias | Rg | Rn | LE | H | G | Chuva (mm) | Rn/Rg (%) | LE/Rn (%) | H/Rn (%) | G/Rn (%) | |
|---------------------------|--------------|--------------------------------------|-------|------|------|-------|------------|-----------|-----------|----------|----------|--|
| | | MJ m ⁻² dia ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| V3-V4 | 29 | 15,59 | 6,44 | 4,94 | 1,82 | -0,43 | 52 | 40,16 | 76,42 | 29,13 | -8,55 | |
| R5-R6 | 10 | 14,06 | 6,82 | 5,11 | 0,37 | -0,46 | 28,8 | 51,56 | 66,51 | 4,51 | -6,44 | |
| R7-R8 | 15 | 14,92 | 7,08 | 6,09 | 0,37 | -0,38 | 26,6 | 47,58 | 87,83 | 4,05 | -4,85 | |
| R9 | 11 | 15,83 | 8,58 | 6,06 | 3,49 | -0,22 | 24,4 | 53,81 | 62,97 | 40,31 | -3,38 | |
| SC | 5 | 18,25 | 11,38 | 4,99 | 5,94 | 0,03 | 2,4 | 62,83 | 44,12 | 50,65 | 1,46 | |
| PS | 12 | 17,20 | 9,52 | 5,17 | 4,38 | -0,18 | 8,8 | 56,29 | 55,22 | 48,19 | -1,20 | |
| Período | 82 | 15,72 | 7,66 | 5,36 | 2,25 | -0,33 | 143 | 47,80 | 78,46 | 26,03 | -6,47 | |

V3, primeira folha trifoliolada completamente expandida; V4, terceira folha trifoliada completamente expandida; R5-R6, período reprodutivo (desenvolvimento dos botões florais a floração); R7-R8, enchimento e maturação das vagens; R9, maturação fisiológica; SC, senescência a colheita; PS, período sem cultura

A razão entre o saldo de radiação (Rn) e a radiação global (Rg) apresentou crescimento gradativo quando comparadas as etapas de desenvolvimento do feijoeiro, no período vegetativo (V3-V4) a relação média foi de 40,16%, inferior a média de todas fases reprodutivas (R5-R9) com 50,98%, seu valor médio máximo foi de 64,51% no dia 01/08/2013 na maturação fisiológica (R9).

A partição do Rn em LE e H durante todo ciclo do feijão foi de 78,46% para LE (LE/Rn) e de 26,03% para o H (H/Rn). Essa partição do Rn em LE e H indica que a maior parte do Rn foi usada nos processos de evaporação da água do solo e da transpiração do feijão, ou seja, foi usada no processo de evapotranspiração. Esses valores da razão LE/Rn são superiores dos obtidos por Lima et. al. (2011), que mediram os fluxos de energia em feijão caupi (*V. unguiculata*) e encontraram que, em média, 65% do Rn foi utilizada como LE.

Já Neves et al. (2008), também trabalhando com feijão caupi no estado do Pará, encontraram que durante todo o ciclo da cultura, somente 28% do saldo de radiação (Rn) foi utilizado pelo fluxo de calor latente (LE). Os autores atribuíram esse comportamento a deficiência hídrica sofrida pela cultura no período em estudo.

É evidente que a comparação de estudos com a partição do Rn em LE e H vai apresentar algumas diferenças, as quais resultam das diferenças entre os locais em que foram realizadas as pesquisas, manejo cultural, condições climáticas e hídricas do solo. Souza et al. (2012), ressaltam que além desses fatores, outros, como tamanho da área de estudo e sensores utilizados com diferentes princípios de funcionamento e diferentes respostas, são responsáveis pelas diferenças encontradas na partição do Rn em LE e H.

Como uma forma de ilustrar o efeito da umidade do solo e da fase fenológica da cultura na partição dos fluxos de energia a variação horária do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), são apresentadas nas Figuras 6 e 7.

Na Figura 6 é apresentada a variação de Rn, LE e H durante um dia representativo da etapa reprodutiva (R7-R8) da cultura, no dia 07/07/2013.

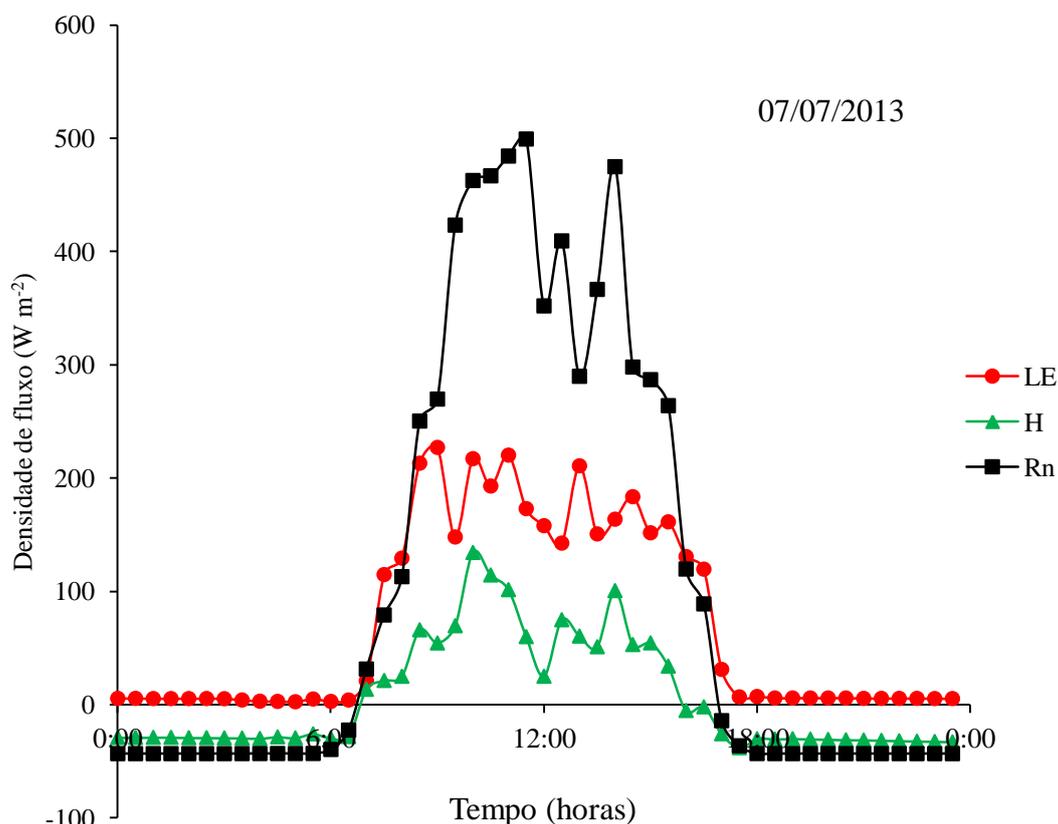


Figura 6. Variação horária do Rn, LE e H em feijão durante a fase reprodutiva em São João, PE

Observa-se que a evapotranspiração (LE) foi o principal consumidor do Rn, com valor de 69,6%, enquanto que a energia gasta para aquecimento do ar (H) teve apenas 25,4%. Esses resultados mostram bem os processos que ocorrem durante a fase reprodutiva das culturas anuais, como o feijão, uma vez que se tenha o solo úmido a maior parte do Rn será usada como LE. Isso ocorre devido ser nessa fase que a cultura usa a maior parte de suas reservas para a floração e enchimento de vagens, retirando mais água do solo e conseqüentemente tendo maior evapotranspiração.

Já na Figura 7 tem-se a variação horária dos fluxos de energia num dia (08/08/2013) representativo da fase de senescência.

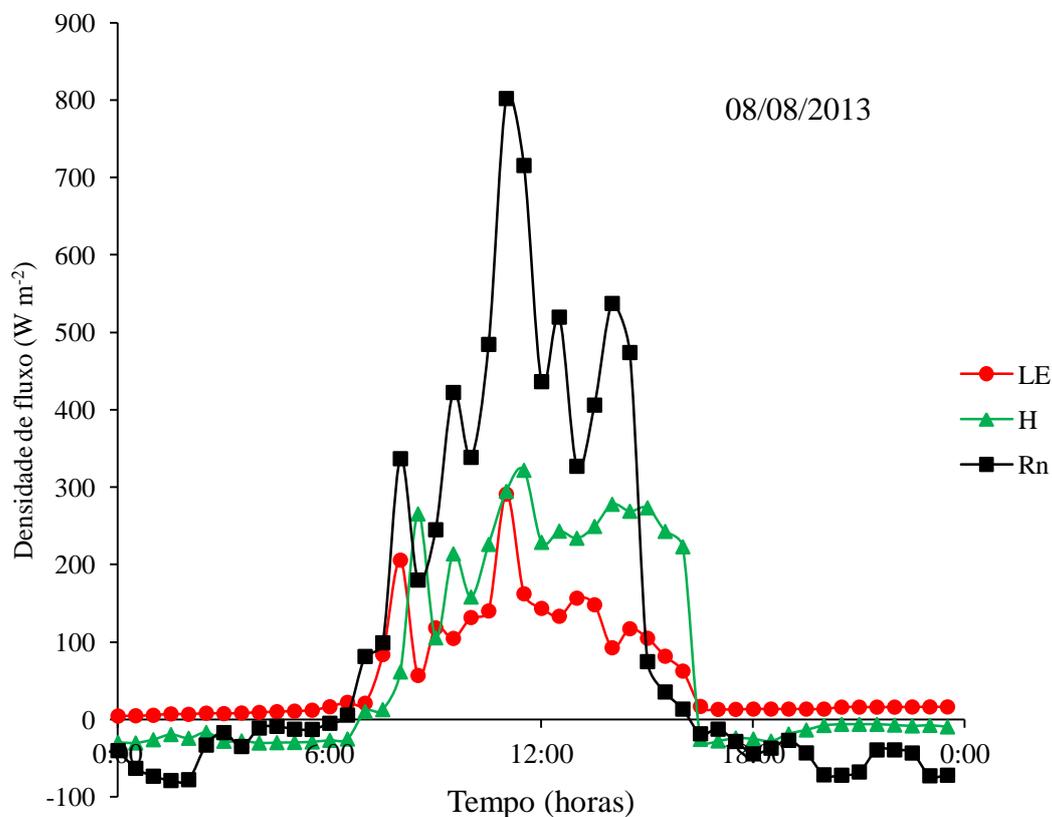


Figura 7. Variação horária do Rn, LE e H em feijão durante a fase de senescência em São João, PE

Contrariamente ao observado na fase reprodutiva (Figura 6), na fase de senescência o H representou 55% do Rn. Isso ocorreu devido a diminuição das chuvas e consequentemente da umidade do solo, além da cultura se encontrar numa fase em que não usa mais água nos seus processos fisiológicos. Essa maior partição de Rn em H faz com ocorra um aumento da temperatura do ar (Figura 1), o que é benéfico para o feijão, para que ocorra redução da umidade do grão e, com isso, não ocorram perdas na colheita, por meio da incidência de fungos patógenos e germinação precoce ainda na vagem.

3.3. Evapotranspiração da cultura do feijão (ET)

Nesse tópico são apresentados os dados de evapotranspiração do feijão (ET) e evapotranspiração de referência (ET_o) e sua relação no período de estudo (Figura 8).

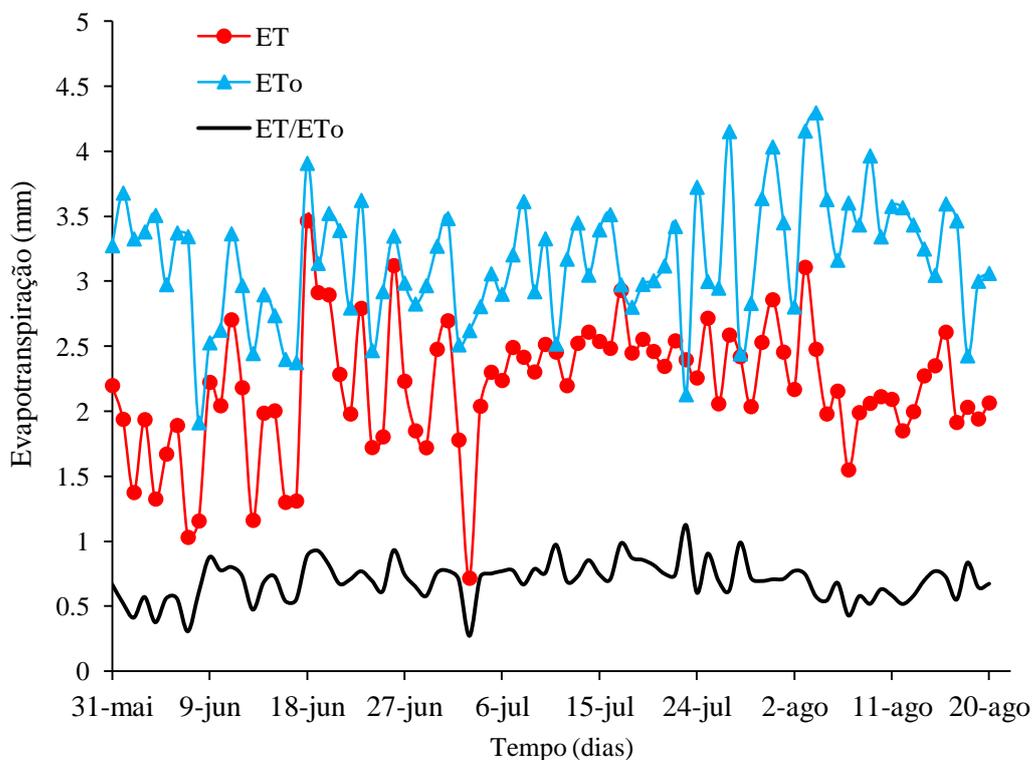


Figura 8. Comportamento diário evapotranspiração da cultura (ET), evapotranspiração de referência (ET) e relação ET/ET_o no período de 31/05/2013 a 20/08/2013 na cultura do feijão em São João, PE

A evapotranspiração do feijão (ET) variou de 0,72 a 3,46 mm d⁻¹, com valor médio de 2,2 mm d⁻¹. Os maiores valores de ET ocorreram nos períodos de maior umidade do solo, em função da maior pluviosidade.

Como ocorreram eventos de precipitação em praticamente todos os dias do ciclo da cultura, como já mencionado anteriormente na Figura 3, verifica-se uma redução da ET nos dias em que ocorrem maiores valores de precipitação. Isso acontece, pois, nos dias chuvosos ocorrem menores valores de R_n e com isso os valores de ET tendem a diminuir. Após o dia chuvoso, com maior umidade do solo, e com condições de céu claro (maior R_n), ocorrem os maiores valores de ET.

Em relação à ET_o, verifica-se que seus valores variaram de 1,91 a 4,30 mm d⁻¹, com média de 3,2 mm d⁻¹. Lima et al. (2013a), mediram a ET_o na mesma região de

estudo dessa pesquisa e encontraram que os valores variaram de 1,9 a 4,1 mm d⁻¹, com média de 3,2 mm d⁻¹, corroborando os resultados desta pesquisa.

A relação ET/ET_o média para todo período foi de 0,70 com pouca variação nas fases fenológicas. A relação ET/ET_o pode ser usada para avaliar se a cultura sofreu estresse hídrico, pois, de acordo com Fontana et al. (1991), a relação entre ET e ET_o pode indicar se a cultura está sofrendo estresse hídrico, uma vez que essa relação expressa o consumo relativo de água. A razão ET/ET_o inclui, além da disponibilidade de água no solo, também a demanda evaporativa da atmosfera (ET_o). Com esses valores encontrados na nossa pesquisa, pode-se dizer que o feijão pode ter passado por um pequeno estresse hídrico nas fases vegetativas e reprodutivas, uma vez que nessas fases o ideal é que a relação ET/ET_o seja igual ou maior que 1,0.

3.4. Produtividade e eficiência do uso de água

A produtividade do feijão foi de 2.050 kg ha⁻¹, o que representa o dobro da média nacional de feijão comum na safra de 2013, que foi de 1.020 kg ha⁻¹ (CONAB, 2013). Os valores de produtividade obtidos no presente estudo foram superiores aos reportados por Cardoso et al. (2013), em estudo de densidade de plantas e eficiência de uso da água em feijão caupi (*V. unguiculata* L.), em Teresina, Piauí, que obtiveram uma produtividade de grãos em torno de 1.500 kg ha⁻¹.

A eficiência do uso de água (EUA) foi de 1,16 kg m⁻³ valor superior aos encontrados por Lima et. al. (2013b), estudando o efeito da irrigação e da cobertura morta para o cultivo do feijoeiro (*P. vulgaris* L.), em Rio Largo, Alagoas, que obtiveram valores médios de 0,379; 0,280 e 0,272 kg m⁻³ para as cultivares BRS Valente, BRS Princesa e BRS Timbó, respectivamente.

3.5. Fluxos de CO₂

Os valores diários de fluxo de CO₂ durante o período de 21/06/2013 a 20/08/2013 são apresentados na Figura 9. As medições dos fluxos de CO₂ somente iniciaram a partir do dia 21/06/2013, em virtude de alguns problemas no analisador de gás infravermelho.

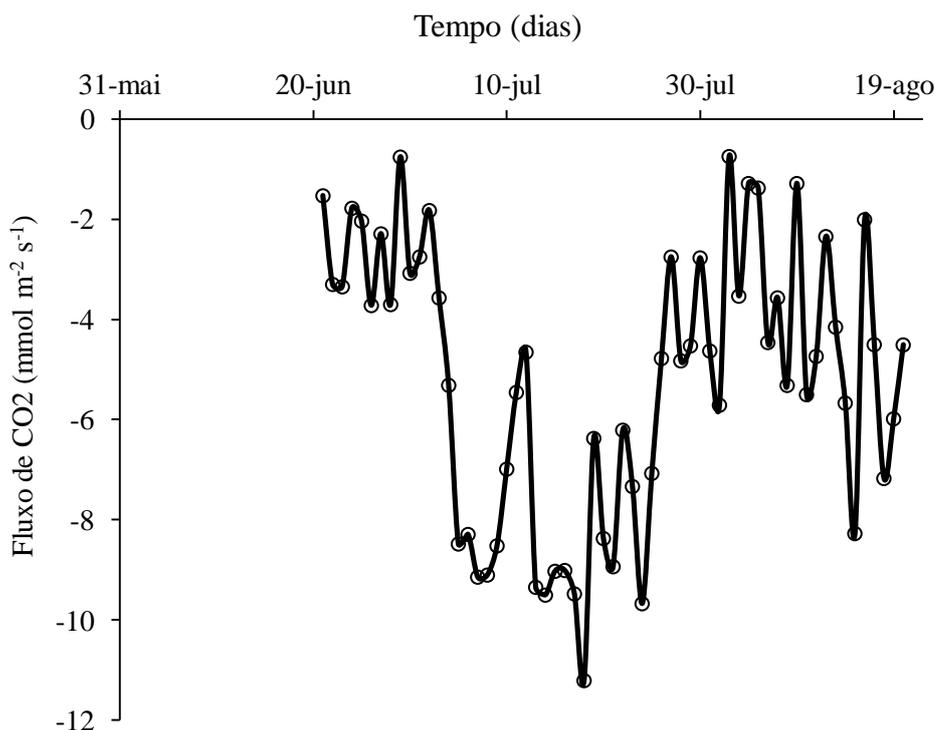


Figura 9. Variação diária dos fluxos de CO₂ em feijão cultivado em São João, PE

Observa-se que somente ocorreram valores negativos de fluxos de CO₂, com valores variando de 0,75 a -11,21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Observa-se também que os valores menos negativos ocorreram nos primeiros dias, devido o feijão se encontrar nas etapas iniciais de desenvolvimento, cobrindo menos o solo e, provavelmente, realizando fotossíntese em taxas mais baixas. Já os valores mais negativos de fluxo de CO₂ ocorreram no mês de julho, época em que o feijão se encontrava com maior índice de área foliar (cobrindo totalmente o solo) e no período reprodutivo, usando mais água do solo e realizando mais fotossíntese.

De acordo com Oliveira et al. (2006), como indicativos das taxas líquidas de fotossíntese e respiração sobre superfícies vegetadas, considera-se que valores positivos de fluxo de CO₂ indicam fluxos de carbono da vegetação para a atmosfera, oriundos de processos respiratórios, e valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação, devido à atividade fotossintética. Desse modo, durante todo ciclo de medida (valores negativos de CO₂), o feijão atuou como sumidouro de CO₂, ou seja, sequestrando carbono da atmosfera.

Considerando todo o período experimental, o valor médio do fluxo de CO₂ foi de -5,21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o que corresponde a um sequestro de carbono de 3,29 t C ha⁻¹ durante todo período experimental, e a 54 kg de C ha⁻¹ d⁻¹. Devido na literatura os

estudos com fluxos de CO₂ em feijão serem escassos, não se encontraram valores para se comparar com os desses estudos. No entanto, devido a similaridade entre as culturas do feijão e da soja, procurou-se comparar os valores obtidos nessa pesquisa com os obtidos por autores que trabalharam com a cultura da soja. Por exemplo, Baker & Griffis encontraram que a cultura da soja pode sequestrar de 1,3 a 2,3 kg de C ha⁻¹ d⁻¹. Já Hernandez-Ramirez et al. (2011), mediram os fluxos de CO₂ em soja durante 04 anos, e encontraram que a mesma sequestrou de 2,0 a 17,0 kg de C ha⁻¹ d⁻¹.

Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas a evolução horária dos fluxos de CO₂ (FCO₂) em dois dias representativos de diferentes fases fenológicas do feijão.

Observa-se que na fase reprodutiva (Figura 10) os fluxos de CO₂ foram negativos durante todo dia, com exceção de um único valor (5:30 h), sendo que os valores máximos de fotossíntese (em torno de -40 μmol m⁻² s⁻¹), valores mais negativos, ocorrem em torno de meio-dia. Esse comportamento dos fluxos de CO₂ ocorre devido nessa fase a cultura usar mais água nos seus processos fisiológicos, com isso a planta transpira mais (Figura 6) e conseqüentemente realiza mais fotossíntese.

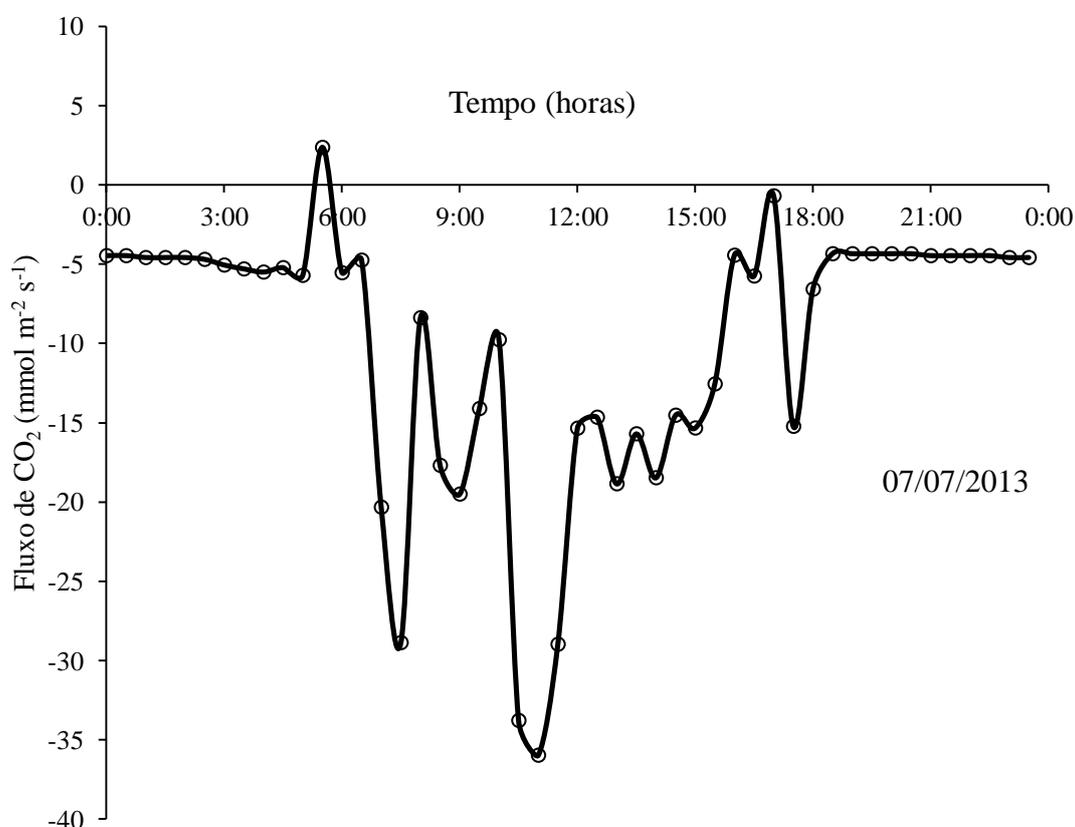


Figura 10. Variação horária dos fluxos de CO₂ em feijão durante a fase reprodutiva em São João-PE

Nesse dia (07/07/2013) o valor médio do fluxo de CO₂ foi de -9,14 40 μmol m⁻² s⁻¹, o que corresponde a uma absorção pelo feijão de 94,8 kg de C ha⁻¹ d⁻¹, ou seja, nesse dia o feijão atuou como dreno de CO₂, retirando carbono da atmosfera.

Já na fase de maturação fisiológica (Figura 11) vê-se que os fluxos de CO₂ tiveram muitos valores positivos, indicando que a área cultivada com feijão está atuando como fonte de carbono para a atmosfera nesses horários. Esse comportamento dos fluxos de CO₂ se explica devido na fase de maturação fisiológica a cultura já não usa muita água nos seus processos fisiológicos, e não realiza muita fotossíntese, uma vez que a cultura está chegando ao final do seu ciclo.

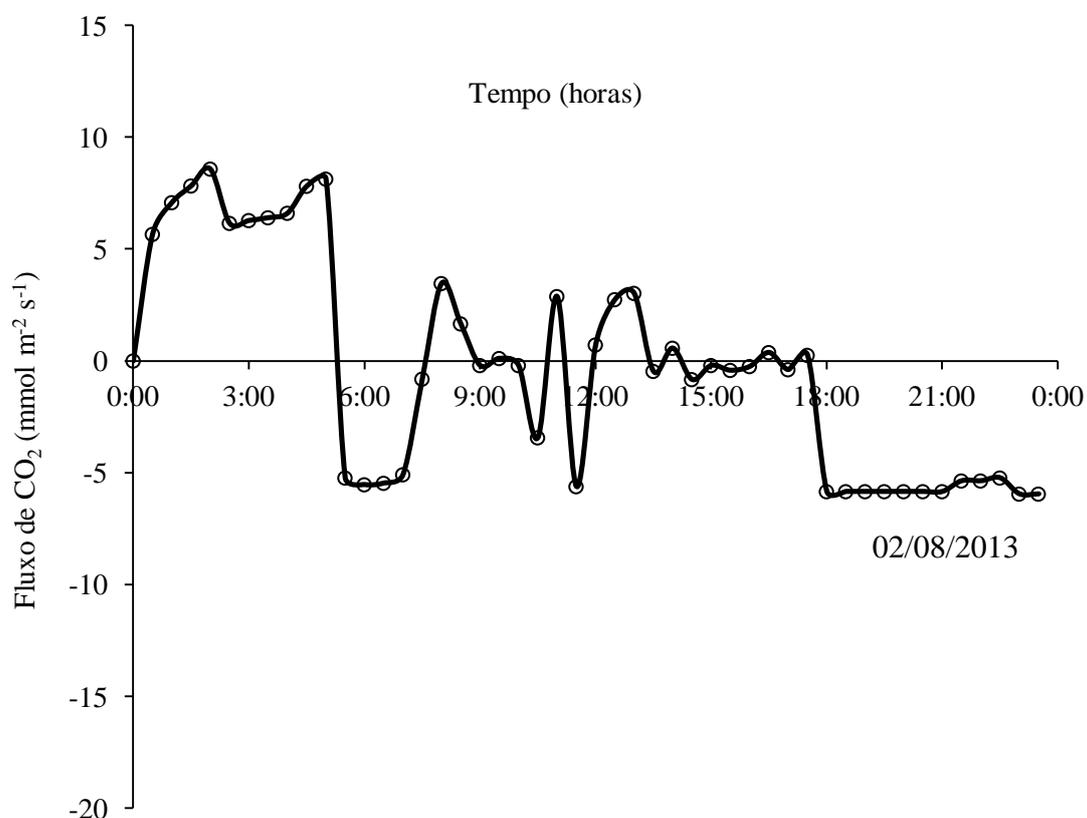


Figura 11. Variação horária dos fluxos de CO₂ em feijão durante a fase de maturação fisiológica em São João-PE

Nesse dia (02/08/2013), os fluxos de CO₂ variaram de -5,96 a 8,58 μmol m⁻² s⁻¹, com valor médio diário de -0,35 μmol m⁻² s⁻¹, o que corresponde a uma absorção de apenas 7,8 kg de C ha⁻¹ d⁻¹.

A relação entre os fluxos de CO₂ e algumas variáveis biométricas do feijão, como biomassa seca e índice de área foliar (IAF), são apresentadas nas Figuras 12 e 13.

Observa-se na Figura 12 que a produção de biomassa seca do feijão pode ser usada para estimar os fluxos de CO₂, sendo que em torno de 80% da variação encontrada nos fluxos de CO₂ pode ser explicada pelos dados de biomassa.

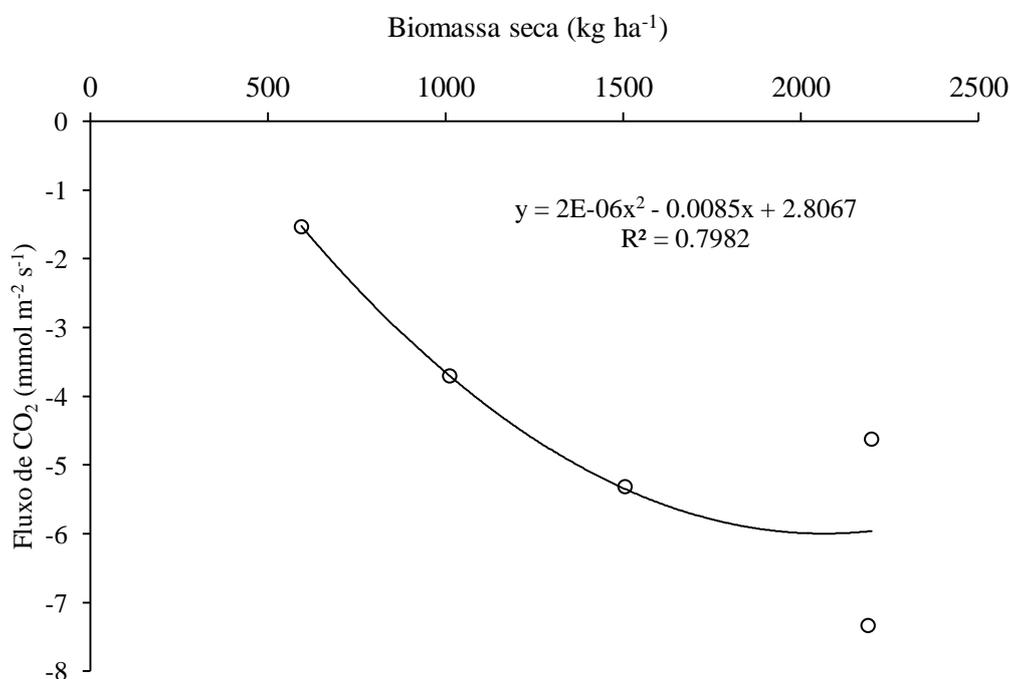


Figura 12. Relação entre os fluxos de CO₂ e a biomassa seca de feijão cultivado em São João-PE

Já o IAF (Figura 13), demonstrou uma maior relação com os fluxos de CO₂, sendo que em torno de 87% da variação encontrada nos fluxos de CO₂ pode ser explicada pelo IAF.

Essas relações de biomassa e IAF com os fluxos de CO₂ são importantes, uma vez que essas medidas biométricas são mais fáceis de serem obtidas em campo e, com isso, pode-se estimar os fluxos de CO₂ de maneira mais fácil e menos dispendiosa. Vários autores têm usado essas relações de fluxos de CO₂ com IAF e outras variáveis biométricas para explicar as variações dos fluxos de carbono em diversos ecossistemas mundiais. Por exemplo, Suyker et al. (2004), mediram os fluxos de CO₂ em milho irrigado e não irrigado, e encontraram uma boa relação entre esses fluxos e o IAF.

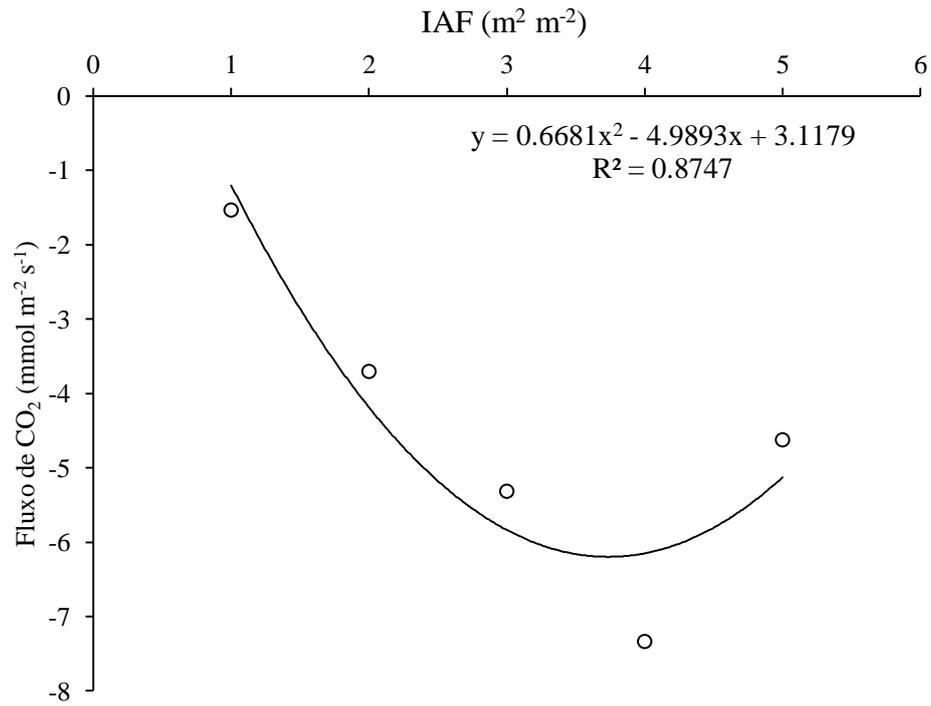


Figura 13. Relação entre os fluxos de CO₂ e o índice de área foliar (IAF) do feijão cultivado em São João-PE

4. CONCLUSÕES

A maior parte do saldo de radiação (78,46%) foi usada como fluxo de calor latente.

A evapotranspiração total e média do feijão foram 179,3 mm e 2,2 mm d⁻¹, respectivamente. O maior consumo de água pelo feijoeiro ocorreu na fase reprodutiva.

O feijão atuou durante todo ciclo como um dreno de CO₂ atmosférico, tendo sequestrado, em média, 54 kg de C ha⁻¹ d⁻¹.

Os fluxos de CO₂ tiveram uma forte relação com a biomassa seca e com o índice de área foliar.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGO, E. E.; AGBOSSOU, E. K.; GALLE, S.; COHARD, J-M.; HEINESCH, B.; AUBINET, M. Long term observations of carbon dioxide exchange over cultivated savanna under a Sudanian climate in Benin (West Africa). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.197, p. 13–25, 2014.
- ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, R. G.; SANCHES, L.; ALVES, E. C. R. F.; NOGUEIRA, J. S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição amazônia-cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, p 346-355, 2009.
- ANGELOTTI, F.; FERNADES JUNIOR, P. I.; SA, I. B. Mudanças climáticas no semiárido brasileiro: medidas de mitigação e adaptação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, p. 1097-1111, 2011.
- AUBINET, M.; GRELE, M. A.; IBROM, A. ; RANNIK, Ü.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A. S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C. H.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALA, T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, v.30, p. 113-175, 2000.
- BAI, Y.; WANG, J.; ZHANG, B.; ZHANG, Z.; LIANG, J. Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China. **Ecological Research**, v.27, p. 615-623, 2012.
- BAKER, J. M.; GRIFFIS, T. J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.128, p. 163–177. 2005.
- BALDOCCHI, D. D.: Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.9, p 479–492, 2003.
- BIUDES, M. S.; CAMPELO JÚNIOR, NOGUEIRA, J. H.; SANCHES, J. S. L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do pantanal pelo método da razão de bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 56-52. 2009.

- CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q.; BASTOS, E. A. Densidade de plantas e eficiência e uso da água em cultivares comerciais de feijão-caupi em ambiente do centro norte Piauiense. **III Conac - Congresso Nacional de Feijão-Caupi**, 2013.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v.1, n.2 (2013) – Brasília : Conab, 2013-v. Mensal. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 19/05/2014.
- FOLEY, J. A.; COSTA, M. H.; DELIRE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. **Frontier Ecology Environmet**. v.1, p. 38-44, 2003.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p. 403-410, 1991.
- GALLON, M. M. P.; SANCHES, L; PAULO, S R. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel de uma floresta tropical de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, p. 79-88. 2006.
- HATFIELD, J. L. SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, v.93, p. 271-280. 2001.
- HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; HATFIELD, J. L.; PARKIN, T. B.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Carbon dioxide fluxes in corn–soybean rotation in the midwestern U.S.: Inter- and intra-annual variations, and biophysical controls. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p. 1831– 1842, 2011.
- KIM, Y.; KNOX, R. G.; LONGO, M.; MEDVIGY, D.; HUTYRAK, L. R.; PYLE, E. H.; WOFSY, S. C.; BRAS, R. L.; MOORCROFT, P. R. Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an Amazon rainforest. **Global Change Biology**, v.18, p. 1322-1334, 2012.
- LIMA, J. R. S. ; ANTONINO, A. C. D.; HAMECKER, C.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S. Water and energy flux measurements in rainfed cowpea cultivated in Northeast Brazil. **Agrária**. v.8, p. 297-304, 2013a.
- 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, p. 65-74, 2011.

- LIMA, R. A. S.; SILVA, S.; SANTOS, M. A. L.; DANTAS NETO, J.; WANDERLEY, J. A.C.; ALVINO, F. C. G. Eficiência no uso da água por cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) com e sem cobertura morta. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.9, p. 18-25, 2013b.
- MOORE, C.J. Frequency Response Corrections for Eddy Correlation Systems. **Boundary Layer Meteorology**, v.25, p. 245-269, 1986.
- NEVES, L. O. ; COSTA, J. M. N.; ANDRADE, V. M. ; LÔLA, A. C.; FERREIRA, W. P. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, p. 21-30, 2008.
- NORMAIS CLIMATOLÓGICAS 1961-1990 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em 1992. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em 19/06/2014.
- OLIVEIRA, M. B. L. ; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, p. 166-174, 2006.
- PAVELKA, M.; SEDLÁK, P.; ACOSTA M.; CZERNÝ, R.; TAUFAROVÁ, K.; JANOUSH, D. Chamber techniques versus eddy covariance method during nighttime measurements. International Scientific Conference, Slovakia. 2007.
- QUN, D.; HUIZHI, L. Seven years of carbon dioxide exchange over a degraded grassland and a cropland with maize ecosystems in a semiarid area of China. **Agriculture, Ecosystems and Environments**, v. 173, p. 1-12, 2013.
- SCHOTANUS, P.; NIEUWSTADT, F. T. M.; BRUIN, H.A.R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. **Boundary-Layer Meteorology**, v.26, p. 81-93, 1983.
- SILVA. S. C.; DIDONET, A. D. Embrapa Arroz e Feijão Sistemas de Produção, No 5 ISSN 1679-8869 Versão eletrônica Dezembro/2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoIrrigadoNoroesteMG/clima.htm>> Acesso em 19/06/2014.
- SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de um floresta tropical no nordeste do Pará. **Acta Amazonica**, v.35, p. 223-229, 2005.

- SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; FARIAS, J. R. B.; SOUZA, E. B. Sazonalidade no balanço de energia em áreas de cultivo de soja na Amazônia. **Bragantia**. v.71, p. 548-557, 2012.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; HUBBARD, K. G. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.124, p. 1–13, 2004.
- WEVER, L.A.; FLANAGAN, L.B.; CARLSON, P.J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance, and surface conductance in northern temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.112, p.31–49, 2002.
- WILSON, K. B.; HANSON, P. J.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER S. D. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.106, p 153–168, 2001.
- WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.; GRELLER, A.; IBROM, A.; LAW, B. E.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Y. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, p. 223–243, 2002.