

BALANÇO DE ENERGIA E PRODUÇÃO DE BIOMASSA EM UM CULTIVO DE
CANA-DE-AÇÚCAR

BARBARA DOS SANTOS ESTEVES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO - 2011

BALANÇO DE ENERGIA E PRODUÇÃO DE BIOMASSA EM UM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

BARBARA DOS SANTOS ESTEVES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

ORIENTADOR: PROF. ELIAS FERNANDES DE SOUSA, D.Sc

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2011

BALANÇO DE ENERGIA E PRODUÇÃO DE BIOMASSA EM UM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

BARBARA DOS SANTOS ESTEVES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 21/02/2011

Comissão examinadora:

Prof. Cláudio Roberto Marciano (DSc. em Agronomia, Solos e Nutrição Mineral - UENF)

Prof. José Carlos Mendonça (DSc. em Produção Vegetal – Diretor SBMET/RJ)

Prof. Fábio Cunha Coelho (DSc. em Fitotecnia – UENF)

Professor Elias Fernandes de Sousa (DSc. em Produção Vegetal - UENF)
Orientador

*A meus pais, Osvaldo Maria Esteves (in memoriam) e Jane dos Santos Esteves;
A meu irmão, Bruno dos Santos Esteves;
À minha melhor amiga, Lidiane de Lima Lousada;
A meus avôs, Miguel, Ephigênia, Manoel e Maria (in memoriam).*

Dedico este trabalho

“Porque a sabedoria deste mundo é loucura diante de Deus; pois está escrito: Ele apanha os sábios na sua própria astúcia”. I Cor. 3,19

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo profundo amparo e amor a cada dia. Sem Ele não abriria nem meus olhos;

À minha família, por tudo que significam e pelos ensinamentos;

Ao mestre e amigo, Professor Elias Fernandes de Sousa, a quem aprendi a respeitar e admirar;

Ao professor, José Carlos Mendonça, pelo grande apoio e amizade;

Aos meus amigos, que me auxiliaram nos trabalhos de campo e pela convivência diária (Lidiane, Rosely, Rodrigo, Vitor Luiz e David);

Ao professor, Cláudio Roberto Marciano, por ter me auxiliado ao longo do trabalho de pesquisa;

Ao professor Fábio Cunha Coelho por aceitar o convite de participar da banca;

A todos os meus amigos que me apoiaram nesta empreitada;

A todos os colegas do LEAG, LFIT, LMGV, LSOL e dos cursos de Produção Vegetal e Animal;

A empresa Feliz Terra Agrícola, por ceder a área para a realização desta pesquisa;

A UENF pela oportunidade de realizar este trabalho e pelo apoio logístico;

Aos motoristas e às secretárias da ASTRAN;

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	li
SUMÁRIO	lii
RESUMO	IV
ABSTRACT	VI
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR	04
2.2 ANÁLISE DE CRESCIMENTO	05
2.3 NDVI e SAVI POR SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL	06
2.4 BALANÇO DE ENERGIA	09
3. TRABALHOS	11
DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ (PARTE I): BALANÇO DE ENERGIA	11
DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ (PARTE II): VARIAÇÕES DO ALBEDO E DO NDVI	29
CONSUMO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES NÃO IRRIGADAS EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ	45
5. RESUMOS E CONCLUSÕES	63
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

RESUMO

ESTEVES, Barbara dos Santos. Engenheira Agrônoma. M.Sc.. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro, 2011. **Balço de energia e produção de biomassa em um cultivo de cana-de-açúcar.** Orientador: Elias Fernandes de Sousa. Co-orientador: José Carlos Mendonça.

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância no cenário nacional, ocupando grandes extensões de terras, atuando como agente relevante tanto em relação a aspectos sociais, quanto ambientais. A micrometeorologia permite estudar as interações das culturas com o ambiente, quantificando os fluxos energéticos e permitindo avaliar as transformações da energia radiante em calor latente e sensível, tendo estas informações aplicabilidade direta na agricultura.

Os objetivos deste trabalho foram estabelecer o balanço de energia, acompanhar as variações do albedo, do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), da produção de biomassa e do consumo hídrico da cana-de-açúcar, em Campos dos Goytacazes, RJ. Para tal, instalou-se uma estação micrometeorológica em uma área de 33 ha, em cultivo comercial, variedade SP81-3250, na Fazenda Partido, pertencente à empresa Feliz Terra Agrícola, em um Cambissolo Háplico. O cultivo, em ressoça de 3º corte, foi acompanhado periodicamente aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). Em cada acompanhamento foi coletada a parte aérea da cana-de-açúcar em 40 m na linha de cultivo, sendo pesados separadamente os colmos e as folhas, medida a altura do dossel e contados o número de perfilhos. Após as coletas de campo as amostras de folhas foram levadas para o laboratório para a medição da área foliar com a utilização do equipamento LICOR-3100, para posterior estimativa da área foliar total e cálculo do índice de área foliar. O balanço de energia da cana-de-açúcar foi estabelecido pelo método de Penman-Monteih. O coeficiente de disponibilidade hídrica (Ks) foi calculado para o conhecimento do "status" hídrico do solo. Os NDVIs e SAVIs

foram obtidos a partir de imagens orbitais do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) da plataforma Terra, obtidas gratuitamente da National Aeronautics and Space Administration (NASA), no portal <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>. O consumo hídrico do cultivo foi determinado a partir da obtenção da evapotranspiração de cultura (ET_c), utilizando-se o coeficiente de cultura (K_c) proposto pela FAO e o fluxo de calor latente obtido através do método da razão de Bowen.

As variações de disponibilidade hídrica influenciaram diretamente nas taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia. As taxas de crescimento decresceram durante um período de baixa disponibilidade hídrica na fase de desenvolvimento dos colmos. No entanto, a matéria seca da cultura manteve-se crescente em todas as avaliações. A maior parte da energia disponível (R_n) durante todo o ciclo da cana-de-açúcar foi consumida pelo fluxo de calor latente (LE), sendo a porcentagem média de 53%. As variações do albedo foram afetadas pelas condições hídricas do período. O valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura da cana-de-açúcar foi de 0,26. De uma forma geral o albedo acompanhou as variações do IAF. O NDVI e o SAVI foram influenciados pelas condições hídricas do período, mas de forma geral acompanharam as variações do albedo e do IAF. Cerca de 62% dos dados avaliados foram classificados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa do fluxo de calor latente, utilizando-se a razão de Bowen. Os valores médios do K_c obtidos a partir do método da razão de Bowen foram os seguintes: na fase estabelecimento 0,79; na de perfilhamento 0,90; na fase de desenvolvimento dos colmos 1,25; e na fase maturação 1,04.

ABSTRACT

ESTEVEES, Barbara dos Santos. Agronomist. M.Sc.. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2011. **Energy balance and biomass production in a crop of sugar-cane**. Advisor: Elias Fernandes de Sousa. Supervisor: José Carlos Mendonça.

The sugar-cane is an important crop in the national scene, occupying large tracts of land, acting as agent for transforming both social, and environmental concerns. The micrometeorology allows studying the interactions of cultures with the environment, quantifying the energy flows and allowing the transformations of radiant energy into latent and sensible heat, and this information direct application in agriculture.

The objectives were to establish the energy balance, monitor changes in albedo, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) of biomass production and water consumption of sugar-cane, in Campos dos Goytacazes, RJ. To this end, it settled a micrometeorological station in an area of 33 ha in commercial cultivation, variety SP81-3250, the Farm Partido in a Cambisol. The culture was regularly monitored at 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 and 280 days after cutting (DAC). In each survey were collected at 40 m row length of the shoot of sugar-cane, being weighed separately stems and leaves as the canopy height and counted the number of tillers. After the collection of field samples of leaves were taken to the laboratory for leaf area measurement using the LICOR-3100 equipment for subsequent estimation of the total leaf area and calculation of leaf area index. The energy balance of sugar-cane was calculated by Penman-Monteith method. The coefficient of water availability (Ks) was calculated for the knowledge of the status and soil water. The NDVIs and SAVIs were obtained from images Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra platform, available free of charge on the website of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>. The water consumption of the crop was determined from the acquisition of culture evapotranspiration (ETc),

using the crop coefficient (Kc) FAO tabulated and latent heat flux calculated through a method of energy balance Bowen ratio. Variations in water availability directly influence the rates of crop growth and energy balance. Growth rates decreased during a period of low water availability. However, the dry matter of the culture was kept growing in all evaluations. Most of the available energy (Rn) during the entire cycle of sugar-cane was consumed by the latent heat flux (LE), the average percentage of 53%.

The variations of albedo were directly affected by the water conditions of the period. In general the albedo followed the variations of the IAF, the MST and the canopy height. The NDVI and SAVI were influenced by the water conditions of the period, but generally followed the variations of albedo and LAI. The total evapotranspiration for the crop grown sugar-cane was 1088,19 mm. 62% of the data evaluated were classified as acceptable for use on the evapotranspiration culture, using the Bowen ratio. The average values of Kc obtained from Bowen ratio method were: the establishment phase was 0,79; in the tillering 0,90; in the development stage was 1,25 and in the maturation phase the Kc was 1,04.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância no cenário nacional, ocupando grandes extensões de terras. Caracteriza-se por ser uma gramínea semiperene pertencente ao gênero *Saccharum*, apresentando máximo potencial de produção na fase vegetativa, completando seu ciclo através de um déficit hídrico a fim de acumular sacarose nos colmos (Magalhães, 1979).

Segundo Mello et al. (2009), a cana-de-açúcar vem recebendo cada vez mais destaque no cenário mundial por ser uma cultura de grande eficiência na produção de biocombustíveis e conseqüente mitigação da intensificação do efeito estufa. É uma cultura das mais tecnificadas e capacitadas no que diz respeito ao uso de técnicas para seu gerenciamento. Nesse particular, a micrometeorologia permite a quantificação dos parâmetros aerodinâmicos e de outras propriedades atmosféricas, informações importantes para problemas ligados aos estudos agrônômicos, ecológicos e à poluição ambiental (Toledo Filho et al., 2003).

A falta e/ou o excesso de água em uma cultura são prejudiciais ao desenvolvimento da planta (Doorenbos e Kassam, 1979). É indiscutível a necessidade do conhecimento da perda de água por evapotranspiração de diferentes superfícies em condições naturais (Villa Nova et al., 1975). A evapotranspiração pode ser definida como a soma dos componentes de transpiração das plantas e o processo de evaporação das superfícies. Allen et al. (1998) definiram o conceito de evapotranspiração de referência como de uma cultura hipotética, de 12 cm, com albedo de 0,23 e resistência aerodinâmica de 70 s m^{-1} . Outro conceito importante é o da evapotranspiração de cultura (ETc). A ETc é obtida através do valor da ETo corrigida pelo Kc (coeficiente de cultura), sendo este dependente do tipo de cultura e do estágio de desenvolvimento. O Kc é a expressão da demanda hídrica da planta, em relação à demanda hídrica do

ambiente, sendo que este não é valor fixo para todas as situações climáticas e fases fenológicas.

O saldo de radiação pode ser considerado como um dos elementos meteorológicos principais no controle da evapotranspiração (Rosenberg et al., 1983). Hayashi et al. (2002) citam que a radiação solar interceptada por um cultivo desempenha papel fundamental no microclima em que as plantas crescem, determinando qual a energia disponível para os processos fisiológicos associados com a produção de biomassa.

O coeficiente de reflexão (albedo) é outro fator importante no entendimento das trocas energéticas com a biomassa vegetal. Segundo André et al. (2009), os valores do albedo têm a tendência de aumentar com o desenvolvimento da cultura devido ao aumento da cobertura do solo. Para se acompanhar a evolução de uma cultura durante o ciclo de crescimento é possível a utilização de índices de vegetação, tal qual o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada), que pode ser relacionado com atributos da cultura como o acúmulo de biomassa, a radiação fotossinteticamente ativa e o próprio albedo.

Os métodos micrometeorológicos quantificam os fluxos energéticos e permitem avaliar as transformações da energia radiante em calor latente e sensível, representando, assim, a contabilidade dessas interações e seus reflexos no crescimento vegetal. O conhecimento da demanda atmosférica, para o fluxo de calor latente, fornece subsídios necessários ao planejamento pelo uso racional da água (Farias et al., 2004). Além disso, segundo André et al. (2010), as medidas dos componentes do balanço de radiação e de energia em condições de campo têm aplicabilidade direta em práticas agrícolas, principalmente no planejamento racional da irrigação, no uso adequado do solo, no zoneamento agrícola regional, no impacto das variações meteorológicas sobre os cultivos agrícolas, na proteção de plantas, dentre outros.

Dessa forma, este trabalho tem por objetivos:

1. Estabelecer o balanço de energia sobre a cultura da cana-de-açúcar pelo método de Penman-Monteith, a partir de dados de uma estação micrometeorológica;
2. Acompanhar a produção de biomassa do cultivo;
3. Acompanhar as variações do albedo, NDVI e SAVI em função do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar;

4. Quantificar o consumo hídrico da cana-de-açúcar não irrigada, através da determinação do coeficiente de cultivo simples, utilizando-se o método da razão de Bowen.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR

A cultura da cana-de-açúcar estabeleceu ciclos históricos de grande importância econômica e social para o Brasil desde sua introdução pelos portugueses na época colonial (Souza, 2005). Na Região Norte Fluminense é a principal cultura agrícola, estabelecendo ciclos de apogeu e decadência devido às modificações de valorização da cultura ao longo dos anos. Nos anos 80, com o programa Pró-álcool, criado em vistas de atenuar a crise do petróleo, a Região teve seu apogeu produtivo, contando com várias usinas e grandes extensões de terras destinadas à cana. Após este período, o setor entrou em profunda decadência que tem reflexos até os dias atuais, como as baixas produtividades das áreas cultivadas, mesmo após a revalorização da cultura.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é originária possivelmente da Ásia, sendo uma cultura perene, podendo produzir por quatro a seis anos. É um cultivo relativamente fácil de ser implantado e manejado, com baixo custo, podendo atingir rendimentos de massa verde superiores a 120 t/ha/ano (Townsend, 2000).

A cana caracteriza-se como cultura de clima tropical, exigindo de 1500 a 2500 mm de água durante o período de crescimento. Quando implantada, o ciclo produtivo da cana pode ser de 12 meses (cana de ano) ou de 18 meses (cana de ano-e-meio). Após o primeiro ano de produção o ciclo da cana passa a ser de 12 meses para todas as variedades. A cana-de-açúcar, em função do longo período de cultivo, é influenciada pelas variações climáticas durante todo o ano. Para atingir alta produtividade, a planta precisa de condições adequadas que permitam o máximo crescimento na fase vegetativa, seguidas de restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo de sacarose na época da colheita. A temperatura basal para a cana-de-açúcar está em torno de 20°C, porém a

temperatura ótima é de 32°C, pois nestas condições a cultura apresenta seu máximo crescimento (Barbieri et al., 1979).

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado a demanda de biocombustíveis, dentre os quais se destaca o etanol proveniente da cana-de-açúcar. Com isso, a área de cultivo tem se expandido muito, sobretudo no centro-sul brasileiro (Almeida et al., 2008). Atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo São Paulo o líder de produção brasileiro (UNICA, 2009). Segundo a CONAB (2009), a produção da safra 2008/2009 do Rio de Janeiro, foi de 3.558,3 toneladas, sendo a Região Norte a maior produtora do estado, porém com uma das menores produtividades do país.

2.2 ANÁLISE DE CRESCIMENTO

O crescimento das plantas depende da conversão da energia luminosa em energia química, proporcional à interceptação capturada de luz pelo dossel da cultura. A cana-de-açúcar é uma planta C4, altamente eficiente fotossinteticamente, sendo importante a análise das estimativas dos índices de crescimento, tais como o índice de área foliar (IAF), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), razão de peso das folhas (RPF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR) e taxa de assimilação aparente (TAA), para melhor compreensão do desenvolvimento desta cultura (Evans, 1972).

Segundo Machado et al. (1982), o crescimento da planta, em relação ao acúmulo de massa seca da parte aérea, pode ser dividido em três etapas: fase inicial, em que o crescimento é lento; fase de crescimento rápido, período que a planta acumula cerca de 75% da massa total, e fase final, ou de crescimento lento. Benincasa (1988) afirma que, como o crescimento é avaliado por meio de variações de tamanho, de algum aspecto da planta, geralmente morfológico, isto evidencia que a análise de crescimento está baseada na atividade fotossintética, sendo que esta passa a ser o componente fisiológico mais importante neste tipo de estudo.

Como a fotossíntese ocorre nas folhas, sua estrutura é um importante fator para determinar a produtividade de uma comunidade vegetal, sendo a

avaliação da área foliar uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão para se eleger uma cultivar mais produtiva (Magalhães, 1979). O significado deste parâmetro resume-se na premissa que materiais mais produtivos possuem maior facilidade em manter área foliar por um maior período, possibilitando melhor desempenho do aparato fotossintético.

Leme et al. (1984) relatam que o índice de área foliar (IAF) é efetivo para avaliar o rendimento final, sendo que os maiores valores durante o ciclo de desenvolvimento estariam relacionados com a maior produção final de colmos. Nesse sentido, o conhecimento da dinâmica de desenvolvimento da área foliar, bem como da arquitetura do sistema foliar, em diferentes cultivares de cana-de-açúcar, permite melhor compreensão das relações destas características com a evolução da biomassa e o rendimento final (Oliveira et al., 2007).

2.3 NDVI E SAVI POR SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

Para a cultura da cana-de-açúcar, inúmeros trabalhos são encontrados na literatura utilizando dados de sensoriamento remoto orbital, tais como: Mello et al. (2009), classificando as formas de colheita com dados espectrais-temporais; Aguiar (2007), estimando as áreas colhidas por queimada; Pontes et al. (2005), estudando a variação dos índices de vegetação; Fortes (2003) utilizando os dados para a discriminação varietal. O fato de esta cultura ser semi-perene facilita o seu acompanhamento ao longo da estação de crescimento com o uso de dados obtidos por meio de sensoriamento remoto orbital (Sugawara et al., 2009).

Os índices de vegetação (IVs) foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação e estão baseados fundamentalmente nas diferenças quantitativas entre a radiação refletida, absorvida e a transmitida na faixa espectral do vermelho e do infravermelho. No infravermelho a radiação é basicamente transmitida e refletida, e pouco absorvida, enquanto que no visível a radiação absorvida é a que predomina, com pequena reflexão e transmissão (Jackson e Huete, 1991).

As grandes vantagens do emprego de dados de sensoriamento remoto transformados em índices de vegetação são a redução do número de bandas utilizadas e a correlação com variáveis agrônômicas e biofísicas das culturas, podendo ser dados de entrada para o acompanhamento do cultivo.

De acordo com sua sensibilidade em relação às variáveis da vegetação, os índices de vegetação podem realçar a variação espacial da biomassa existente. Ji e Peters (2007) mostram uma função estatística que pode medir eficientemente a sensibilidade de alguns índices de vegetação. Segundo Jackson e Huete (1991), um índice de vegetação deve ser capaz de ser responsivo a pequenas variações no estado fenológico da vegetação e ao mesmo tempo não pode ser influenciável por variações das condições e tipologia de solos, da geometria da cena e das condições meteorológicas.

O índice mais utilizado em pesquisas relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal é o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) (Equação 1). Este índice é a razão entre a diferença e a soma da reflectância da região espectral do infravermelho próximo (IVP) e a reflectância na região espectral do vermelho (V) e varia de -1 a +1, sendo os valores negativos para solo nu e corpos hídricos.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

As modificações morfofisiológicas alteram o padrão de resposta espectral das plantas. A análise e a quantificação destas variações é o que possibilita o monitoramento da vegetação, bem como a integração dos dados obtidos a partir dos sensores remotos com modelos matemáticos para inferir sobre as propriedades biofísicas de um dossel (Fonseca, 2004).

Como exemplo, na Figura 1 está representado as variações do NDVI da Região Norte Fluminense (dia juliano 346/2009).

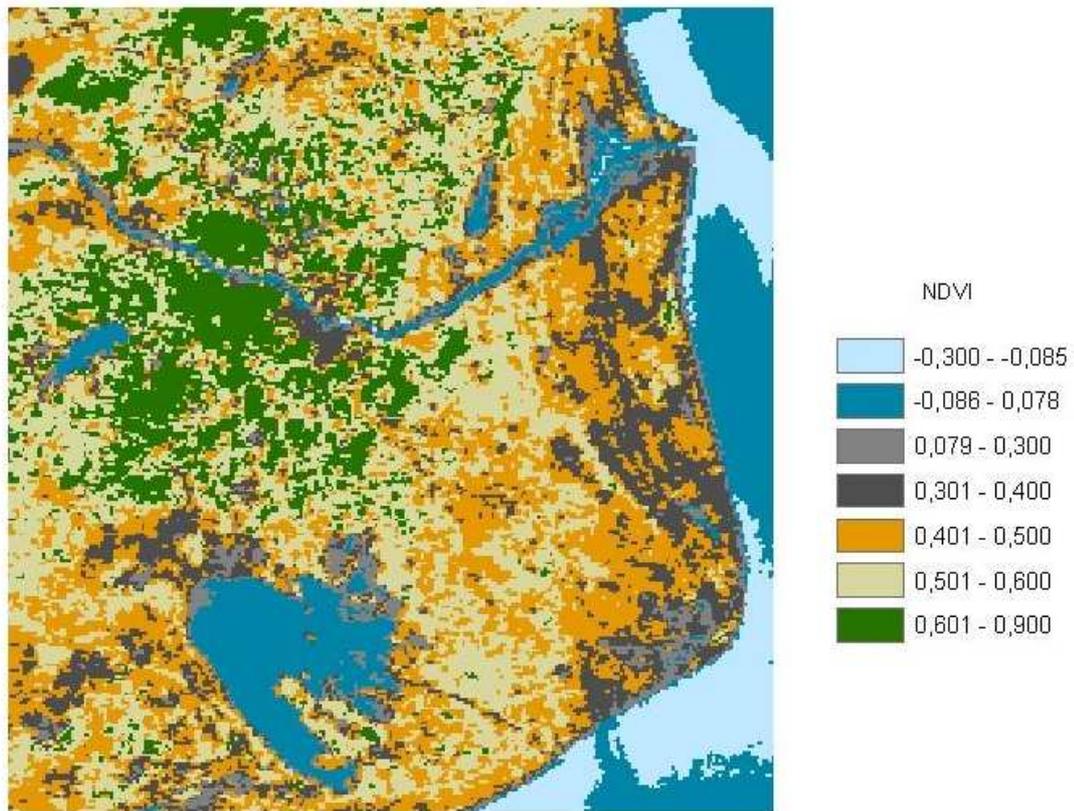


Figura 1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) da Região Norte Fluminense em dezembro de 2009.

A importância prática do índice de vegetação NDVI está na sua correlação com vários parâmetros biofísicos, como o índice de área foliar e a biomassa vegetal, sendo uma maneira prática de acompanhar temporalmente e espacialmente a evolução e as diferenças destes fatores.

Huete (1988) adicionou uma constante denominada L à equação do NDVI, criando assim o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) ou Índice de Vegetação Ajustado para as diferenças do Solo (IVAS) (Equação 2). Esta constante é um fator de correção que varia gradualmente de 0, para dosséis com alta cobertura vegetal, a 1, para áreas de pouca cobertura vegetal.

$$SAVI = \frac{(IVP - V) \cdot (1 + L)}{(IVP + V + L)} \quad (2)$$

Onde IVP é a refletância no infravermelho próximo; V é a refletância no vermelho e L é a constante de correção para fatores do solo.

2.4 BALANÇO DE ENERGIA

O processo de evapotranspiração é governado pela troca de energia na superfície vegetada, limitada pela energia disponível, sendo possível se estimar o fluxo de calor latente de evaporação através do princípio de conservação da energia, em que o ganho é igual à perda. Com base nesse princípio, estima-se a evapotranspiração através da fórmula simplificada da equação do balanço de energia, composta pelo saldo de radiação (R_n), pelos fluxos de calor latente (LE) e sensível na atmosfera (H) e pelo fluxo de calor no solo (G) (Teixeira, 2001). O saldo de radiação (R_n) representa a contabilização entre a radiação de onda curta incidente e a refletida e da radiação de onda longa incidente e emitida pela superfície (Moura, 2005).

O fluxo de calor latente (LE) envolve transferência de massa da superfície do sistema solo-planta para a atmosfera, tendo como resultado a evaporação da água. O fluxo de calor sensível (H) é o resultado da diferença entre as temperaturas do ar e da superfície e o fluxo de calor do solo (G) é determinado pelo aquecimento de sua superfície pela radiação solar, sendo então função do balanço de radiação. O G além do balanço de radiação é influenciado por fatores externos como o balanço de radiação, temperatura do ar, nebulosidade, vento e chuva. Os fatores intrínsecos para esse processo são: topografia, cobertura do solo e tipo de solo. Durante o dia o solo armazena energia na forma de calor, tendo como consequência o aumento da temperatura, sendo que à noite o processo se inverte e o solo libera calor e reduz sua temperatura (Pereira et al., 2002).

Bowen (1926) foi o pioneiro nos estudos de balanço de energia, determinando a razão entre os fluxos de calor sensível e latente emitidos por uma superfície de água, durante o processo de evaporação, em função da pressão de vapor e temperaturas do ar observadas sobre uma superfície, sendo essa razão denominada de “Razão de Bowen” (Cunha et al., 1994). O método da razão de Bowen é o mais utilizado em estudos desta natureza. Segundo Todd et al. (2000), as vantagens do método do balanço de energia utilizando a razão de Bowen (β) incluem a possibilidade de medidas simples e contínuas; a não necessidade de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície de interesse; a possibilidade de integrar o fluxo de calor latente sobre extensas áreas e o fornecimento de medidas em pequena escala de tempo. Suas desvantagens

incluem a influência da sensibilidade dos instrumentos que medem os gradientes e os termos do balanço de energia; a descontinuidade dos dados quando β aproxima-se de -1 e, a necessidade de uma bordadura adequada.

Outros métodos podem ser utilizados para obtenção do balanço de energia, como por exemplo, o método da co-variância dos vórtices turbulentos que vem sendo utilizado pelos pesquisadores, em vários sítios experimentais, para quantificar as magnitudes dos fluxos de massa e energia acima dos ecossistemas (Baldocchi, 2003). Outro método muito utilizado é o de Penman-Monteih, que foi estudado por Toledo Filho (2001), na cultura da cana-de-açúcar obtendo resultados satisfatórios. Destaca-se que o bom desempenho observado por esta metodologia se deve principalmente à consideração de informações sobre o potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor, uma vez que a abertura estomatal é em grande parte controlada pela turgescência e o movimento de água é governado pelo gradiente de potencial hídrico entre a superfície vegetada e a atmosfera (Rodrigues, 2006).

Ao redor do mundo e no Brasil vários pesquisadores (Allen et al., 1998; Perez et al., 1999; Teixeira, 2001; Toledo Filho, 2001; San José et al., 2003; Lima et al., 2005; Rodrigues, 2006; Vila Nova et al., 2006; Azevedo et al., 2007; Oliveira et al., 2009; André et al. 2010) têm se dedicado ao estudo da contabilização do processo de evapotranspiração a partir do método do balanço de energia, sendo importantes as informações geradas por estes trabalhos.

3. TRABALHOS

DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (PARTE I): BALANÇO DE ENERGIA

RESUMO

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado a demanda de biocombustíveis, se destacando o etanol proveniente da cana-de-açúcar. O objetivo deste estudo foi avaliar a evolução temporal dos componentes do balanço de energia, a partir do método de Penman-Monteih, e as variáveis do desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar cultivada nas condições de clima e solo de Campos dos Goytacazes, RJ. Para tal, instalou-se uma estação micrometeorológica em uma área de 13 ha, em cultivo comercial num Cambissolo. O cultivo foi acompanhado periodicamente aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). As variações da disponibilidade hídrica influenciaram diretamente nas taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia. Nas condições analisadas a maior parte da energia disponível (53%) foi consumida pelo fluxo de calor latente. PALAVRAS-CHAVE: balanço de energia, evapotranspiração, método de Penman-Monteih, agrometeorologia.

ABSTRACT

The growing concern for renewable energy sources and cleaner has increased the demand for biofuels, pointing out the ethanol from sugar-cane. The objective of this study was to evaluate the temporal evolution of the components of

energy balance, from the Penman-Monteith, and the variables of the development of the culture of sugar-cane grown on soil and climate conditions of Campos dos Goytacazes, RJ. To this end, its settled a micrometeorological station in an area of 13 ha in commercial cultivation. The culture was regularly monitored at 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 and 280 days after cutting (DAC). The variations in water availability directly influence the rates of crop growth and energy balance. Under the conditions studied most of the available energy (53%) was consumed by the latent heat flux.

KEY-WORDS: energy balance, evapotranspiration, Penman-Monteith method, agrometeoroly.

INTRODUÇÃO

A preocupação crescente por fontes de energias renováveis e menos poluentes tem elevado a demanda de biocombustíveis, dentre os quais se destaca o etanol proveniente da cana-de-açúcar (Almeida et al. 2008). O Brasil desponta como líder mundial em exportações de açúcar, além de ser líder mundial na utilização desta planta como fonte de energia renovável (Oliveira et al. 2007). A cultura da cana-de-açúcar tem grande importância econômica para a região de Campos dos Goytacazes, sendo este município o maior produtor do Estado do Rio de Janeiro. Pesquisas relacionadas aos aspectos agrometeorológicos desta cultura são importantes para o entendimento dos fluxos energéticos e suas trocas com a biomassa e os impactos inerentes a esta atividade agrícola.

O manejo adequado da cana-de-açúcar implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que a cultura expresse todo seu potencial genético (Keating et al., 1999).

A energia solar é a fonte primária para a atividade fotossintética e também para a transpiração das plantas em determinada localidade climática (Pereira et al. 2009). Neste contexto, a análise micrometeorológica, voltada para os diversos cultivos e, o conhecimento da evapotranspiração ou fluxo de calor latente (LE), se

torna uma ferramenta imprescindível no manejo da água, do solo e das culturas, para que se obtenha, então, sucesso na atividade agrícola (Souza et al. 2008).

O método do balanço de energia é utilizado, comumente, para se estimar a evapotranspiração de superfícies vegetadas e se baseia na análise do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radiativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante (Borges et al. 2008). Em muitos trabalhos, para a estimativa do balanço de energia, é utilizado o método de razão de Bowen. Buscando-se evitar erros na estimativa dos fluxos, os dados inerentes ao erro instrumental micrometeorológico do sistema Razão de Bowen são excluídos (Silva et al. 2007). Sob condições de seca ou de grande umidade do ar, em que não há formação de gradientes, não é aconselhável a utilização do método da razão de Bowen.

Para uma condição em que o método da razão de β não pode ser utilizado com confiabilidade, os fluxos podem ser obtidos pelo método de Penman-Monteih (PM) (Allen et al.,1998), que foi estudado por Toledo Filho (2001), na cultura da cana-de-açúcar, obtendo resultados satisfatórios para o estado de Alagoas, na região nordeste do Brasil. Ortega Farias et al. (2006) estudaram a quantificação do fluxo de calor latente na cultura do tomate, no Chile, também obtendo resultados satisfatórios. Abdelhadi et al. (2000) utilizaram o método de PM para estimar o requerimento hídrico do algodão, na região árida do Sudão, na África.

O melhor desempenho observado no método de PM, em condições mais secas, se deve principalmente à consideração de informações sobre o potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor, uma vez que a abertura estomatal é em grande parte controlada pela turgescência e o movimento de água é governado pelo gradiente de potencial hídrico entre a superfície vegetada e a atmosfera (Rodrigues, 2006). O mesmo autor argumenta que um potencial hídrico baixo induz ao fechamento estomatal, o que reduz a condutância foliar e inibe a transpiração.

Neste contexto este estudo objetivou avaliar a evolução temporal dos componentes do balanço de energia, utilizando-se o método de PM e acompanhar variáveis do desenvolvimento e crescimento da cultura da cana-de-açúcar cultivada nas condições de clima e solo de Campos dos Goytacazes, RJ.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área de 13 hectares, de um total de 33 hectares, em cultivo comercial de cana-de-açúcar na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, não irrigado, em Campos dos Goytacazes, RJ (coordenadas geográficas: 21°48'17,1" sul e 41°16'28, 8" oeste, referidas ao datum WGS84, altitude local de 9 m).

A variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada em um espaçamento de 1,5 m, estando na ressoca de 3^o corte. Segundo a COPERSUCAR (1995), a variedade utilizada nesse estudo, apresenta uniformidade e alto perfilhamento em condições normais; pouco acamamento; touceiras com hábito levemente decumbente, sendo as folhas arqueadas de largura média com o volume da copa denso; mesmo em solos de média para baixa fertilidade, projeta alta produtividade na média de cinco cortes; é recomendada para colheita do meio para o final de safra, podendo ser classificada como média.

No período pós-colheita, a área foi fertirrigada com uma lamina de 500 mm de vinhoto, diluído a 2% de potássio. Na Tabela 1 estão apresentados os atributos químicos dos horizontes que compõem o perfil do solo.

Tabela 1 - Atributos químicos dos horizontes que compõem o perfil do solo.

Hori- zonte	pH água	C (g ₁ kg ⁻¹)	P (mg ₁ kg ⁻¹)	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	T	t	m	V
----- (cmol _c dm ⁻³) -----														
----- (%) -----														
A _p	7,20	14,1	84,00	0,00	0,90	6,70	7,20	0,55	0,30	14,75	15,65	14,75	0,0	94,2
A ₂	6,90	16,2	30,00	0,20	1,30	6,50	6,70	0,25	0,44	13,89	15,19	14,09	1,4	91,4
Bi ₁	6,30	5,5	1,00	0,30	3,50	2,00	3,30	0,03	0,02	5,35	8,85	5,65	5,3	60,5
Bi ₂	6,20	3,0	2,00	0,10	3,30	0,90	3,30	0,06	0,03	4,29	7,59	4,39	2,3	56,5
Bi ₃	6,60	3,3	4,00	0,10	1,50	1,20	3,30	0,06	0,05	4,61	6,11	4,71	2,1	75,4
C ₁	6,70	3,0	12,00	0,10	2,00	1,20	0,80	0,03	0,68	2,71	4,71	2,81	3,6	57,5

Obs.: pH em água: potenciometria em solução solo-água 1:2,5; carbono orgânico: dicromato de potássio + colorimetria; fósforo disponível: extraído por Mehlich-1 + espectroscopia; alumínio: extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando-se azul de bromotimol como indicador; cálcio e magnésio: extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio e sódio trocáveis: extraídos pelo extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama; SB = Ca⁺² + Mg⁺² + K⁺ + Na⁺; T = SB + (H⁺+Al⁺³); T = SB + Al⁺³; m% = Al⁺³ x 100 / t; V% = SB x 100 / T (Embrapa, 1997).

O solo, que apresenta drenagem moderada, ausência de pedregosidade e propriedades vérticas, foi classificado como Cambissolo Háplico Eutrófico (Embrapa, 2006). A composição granulométrica e a densidade de partículas dos diferentes horizontes do solo estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição granulométrica e densidade de partículas para os horizontes identificados no perfil do solo.

Horizonte		Frações granulométricas			Densidade de
Símbolo	Espessura	Argila	Silte	Areia	Partículas
	-- (cm) --	-----(g kg^{-1})-----			-- (Mg m^{-3}) --
A _p	0 - 15	341,5	306,5	351,9	2,583
A ₂	15 - 35	407,9	379,5	212,6	2,598
Bi ₁	35 - 70	378,7	436,6	184,7	2,697
Bi ₂	70 - 95	373,0	465,8	161,2	2,743
Bi ₃	95 - 130	496,1	400,5	103,4	2,795
C ₁	130 - 150 ⁺	320,0	360,2	319,9	2,806

O clima de Campos dos Goytacazes é classificado como Tropical. A temperatura média da região é de 23,2 °C, sendo julho o mês mais frio (temperatura média 20,1 °C) e fevereiro o mês mais quente (temperatura média 26°C), sendo do tipo Aw segundo a classificação de Köppen. A umidade relativa do ar é bastante variável dependendo das condições de relevo e ventos. Para o litoral, registram-se valores entre 80 e 82 %, que diminuem à medida que se penetra para o interior do continente. Na região predominam os ventos de norte, nordeste e noroeste oriundos do Atlântico Sul, com ventos de norte e leste soprando principalmente no verão. A média anual de precipitação pluviométrica de Campos dos Goytacazes é de 1.087 mm, sendo o trimestre mais chuvoso os meses de novembro, dezembro e janeiro, com maior frequência em dezembro. Nesta época, é comum a ocorrência de uma seqüência de dias secos, caracterizando o chamado veranico, fator agravante para agricultura sob tecnologia de sequeiro. O inverno é seco, com um período crítico entre os meses de junho a agosto (Embrapa, 2003). Na Figura 1, estão apresentados os eventos de chuvas ocorridas no período experimental e as variações da temperatura média.

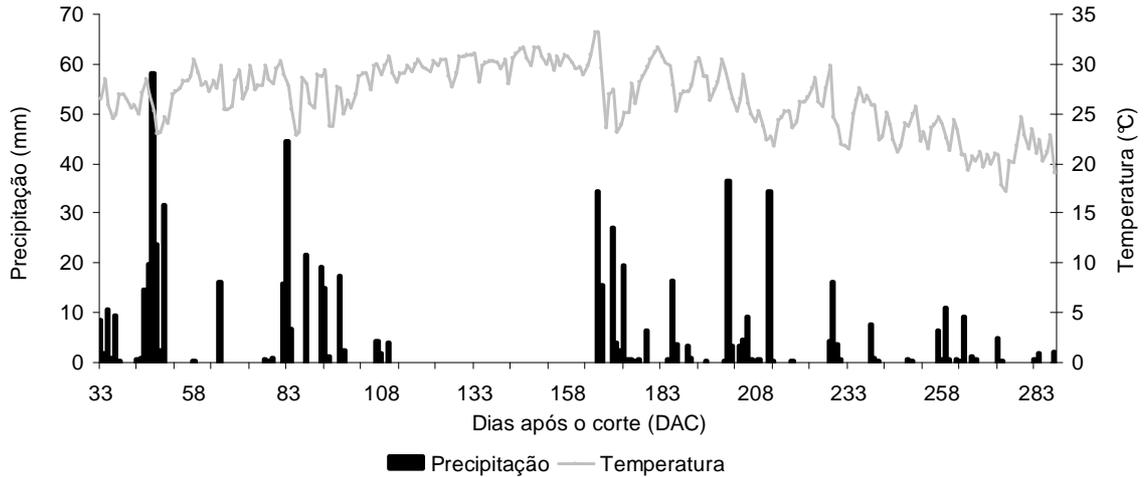


Figura 1. Precipitações (mm) ocorridas e variação da temperatura média (°C) durante o período experimental.

Na área do experimento foi instalada, no dia 12 de outubro de 2009, 30 dias após o corte da cana-de-açúcar, uma estação micrometeorológica contendo os seguintes sensores: 1 saldo radiômetro (NR Lite); 2 piranômetros LI 200 (X-Li-cor); 2 termohigrômetros HMP45C-L (Vaissala); 2 anemômetros Met One (RM Young); 3 fluxímetros HFP01SC-L (Hukseflux). Todos os dados foram coletados a cada minuto e armazenados em valores médios a cada 15 minutos por um coletor de dados (datalogger) CR21X (Campbell Scientific). As hastes horizontais foram dispostas a 0,50 m sobre o dossel da cultura (1ª haste) e a 2,5 m sobre o dossel (2ª haste), as quais foram elevadas de acordo com o crescimento da cultura. Junto à estação, foi instalado um pluviômetro registrador da Squitter do Brasil, com 0,25 mm de sensibilidade.

O método do balanço de energia utilizado para quantificar os fluxos entre a cana-de-açúcar e a atmosfera, foi baseado na Equação 1:

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

onde: R_n é o saldo de radiação; H é o fluxo de calor sensível; LE é o fluxo de calor latente; G é o fluxo de calor do solo.

O calor latente foi obtido pela equação de Penman-Monteith (Monteith, 1981) (Equação 2):

$$LE = \frac{sR_n + \rho C_p \Delta e}{s + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (2)$$

em que: R_n é o saldo de radiação ($W m^{-2}$), ρ é a massa específica do ar ($kg m^{-3}$), C_p é o calor específico do ar a pressão constante ($J kg^{-1} \text{°C}^{-1}$), Δe é o déficit de

pressão de vapor (kPa), γ é a constante psicrométrica, r_c e r_a são as resistências da cobertura vegetal e aerodinâmica da cultura ao transporte de vapor ($s\ m^{-1}$) e s é a tangente à curva de pressão de vapor saturante (kPa $^{\circ}C$).

As resistências da cobertura vegetal e aerodinâmica da cultura foram estimadas pelas Equações 3 (Allen et al.,1989) e 4 (Allen et al.,1998), respectivamente:

$$r_c = \frac{500 - 0,85Rn}{IAF} \quad (3)$$

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{(z_u - d)}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{(z_r - d)}{z_{ov}}\right]}{k^2 U_z} \quad (4)$$

em que: Rn em $cal\ cm^{-2}d^{-1}$; IAF é o índice de área foliar; z_u é a altura da medição da velocidade do vento, em m; z_{om} é o comprimento de rugosidade da cultura para transporte de *momentum*, em m; z_r corresponde a altura da medição da umidade do ar, em m; z_{ov} é o comprimento de rugosidade da cultura para transporte de vapor e calor sensível, em m; k é a constante de von Karman (0,41); U_z é a velocidade do vento ($m\ s^{-1}$) na altura z . O d representa o deslocamento do plano zero e foi obtido pela relação 2/3 da altura da cultura. Os valores de altura do dossel e IAF entre as coletas de campo foram estimados por interpolações.

O fluxo do calor sensível (H) foi obtido como resíduo do balanço de energia (Equação 5):

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

Para acompanhamento do cultivo foram feitas coletas de campo periódicas aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). Em cada coleta foram obtidas amostras em 40,0 m do cultivo, escolhidos de forma aleatória, sendo determinadas a cada metro as massas frescas totais de colmos e das folhas, para posterior estimativa por hectare, e medida a altura média do dossel.

As amostras de folhas e colmos foram retiradas e levadas para o laboratório. As amostras foliares seguiam para a determinação da área foliar, realizada com auxílio do equipamento LICOR-3100, para posterior estimativa da área foliar total e cálculo do IAF (área foliar/espacamento da planta). Após este procedimento as amostras de colmos e folhas foram levadas para secagem do material verde, sendo identificadas e colocadas em estufa de ventilação forçada a

uma temperatura média de 70°C até peso constante, seguido da pesagem das massas secas. Seguindo os procedimentos estabelecidos por Silva et al. (2000) obtiveram-se os seguintes índices fisiológicos: Taxa de Crescimento Absoluto (TCA), Taxa de Crescimento Relativo (TCR) e Taxa de Assimilação Líquida (TAL), sendo calculados através das Equações 6, 7 e 8, respectivamente.

$$TCR = \frac{\ln(MST2) - \ln(MST1)}{T2 - T1} \quad (6)$$

$$TCA = \frac{(MST2 - MST1)}{(T2 - T1)} \quad (7)$$

$$TAL = \left[\frac{MST2 - MST1}{AF2 - AF1} \right] \cdot \left[\frac{\ln(AF2) - \ln(AF1)}{T2 - T1} \right] \quad (8)$$

em que: MST corresponde a matéria seca total; T2-T1 é o intervalo de tempo entre duas amostragens e AF é a área foliar.

Os estádios fenológicos considerados foram: estabelecimento (0 a 60 DAC), perfilhamento (61 até os 110 DAC); desenvolvimento dos colmos (entre 111 a 240 DAC) e maturação (241 DAC em diante).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

a) Crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

Os acompanhamentos de campo foram feitos a partir do estágio de perfilhamento, sendo apresentados os resultados a partir desta fase. Monteith (1972) afirma que as taxas de crescimento de uma espécie podem ser expressas em função da quantidade de energia luminosa incidente, da interceptação e conversão dessa energia em massa seca. As taxas de crescimento sendo índices fisiológicos são indicativos de como a comunidade vegetal está aproveitando a energia líquida disponível, representada pelo Rn. Por essa razão a TCA, a TCR e a TAL foram analisadas neste estudo, nos distintos estádios de desenvolvimento da cultura (Tabela 3).

Tabela 3 - Taxa de crescimento absoluto (TCA em g d⁻¹), Taxa de crescimento relativo (TCR em g g⁻¹ d⁻¹) e Taxa de assimilação líquida (TAL em g dm⁻¹ d⁻¹).

Estádio	DAC	MST	TCA	TCR	TAL
Perfilhamento	85	3,18	-	-	-
Perfilhamento	102	4,47	0,092	0,024	0,926
Desenvolvimento dos colmos	128	12,84	0,311	0,039	3,262
Desenvolvimento dos colmos	149	16,08	0,153	0,011	1,596
Desenvolvimento dos colmos	174	19,43	0,134	0,008	1,425
Desenvolvimento dos colmos	194	21,08	0,082	0,004	0,880
Desenvolvimento dos colmos	215	26,67	0,280	0,012	3,034
Desenvolvimento dos colmos	235	27,53	0,043	0,002	0,469
Maturação	255	28,93	0,070	0,002	0,759
Maturação	280	29,75	0,041	0,001	0,433

A massa seca total (MST) observada aos 85 DAC foi de 3,18 Mg ha⁻¹; aos 102 DAC a MST obtida foi de 4,47 Mg ha⁻¹, representando aumento de 41% em relação à coleta anterior. A TCA obtida entre estas duas coletas foi de 0,092 g d⁻¹, enquanto que a TCR foi de 0,024 g g⁻¹d⁻¹ e a TAL de 0,926 g dm⁻¹d⁻¹.

Verifica-se que no período de 110 a 165 DAC, durante o estágio de desenvolvimento dos colmos, não houve precipitação (Figura 1), caracterizando um período prolongado de estiagem durante o ciclo da cana-de-açúcar. Ao todo choveram 664,25 mm durante o período de cultivo. Este valor ficou abaixo do ideal para a cana-de-açúcar, sendo que uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções (Almeida et al. 2008), sem utilização da irrigação.

A temperatura média durante todo o experimento foi de 25,1°C, enquanto que no período de estiagem foi de 28,0°C. Estes valores de temperatura situaram-se dentro da faixa ideal (25°C a 33°C), para a fase vegetativa da cana-de-açúcar (Keating et al., 1999). Todavia, a alta temperatura média combinada com o período prolongado sem precipitação e a baixa umidade relativa média diurna (59,2%) reduziram as taxas de crescimento da cultura, que se encontrava na fase de desenvolvimento vegetativo, reduzindo-as.

Durante o período de estiagem foram feitas duas observações do cultivo, aos 128 e aos 149 DAC. Aos 128 DAC a MST observada foi de 12,84 Mg ha⁻¹,

sendo o aumento em relação à coleta dos 102DAC de 287,2%. Em relação às taxas de crescimento, entre os 102 DAC e 128 DAC a TCA, TCR e TAL foram, respectivamente, de 0,311 g d⁻¹, 0,039 g g⁻¹d⁻¹ e 3,262 g dm⁻¹d⁻¹. As plantas mantiveram crescentes as suas taxas de crescimento, mesmo durante a seca, possivelmente devido às reservas de água presentes no solo nas camadas mais profundas. No entanto, com a continuidade do período sem chuvas, as taxas de crescimento se reduziram, sendo seus valores entre os dias 128 e 149 DAC de 0,153 g d⁻¹, 0,011 g g⁻¹d⁻¹ e 1,596 g dm⁻¹d⁻¹ (TCA, TCR e TAL, respectivamente).

Na Figura 2 está apresentada a variação do IAF da cana-de-açúcar, durante o ciclo e da MST.

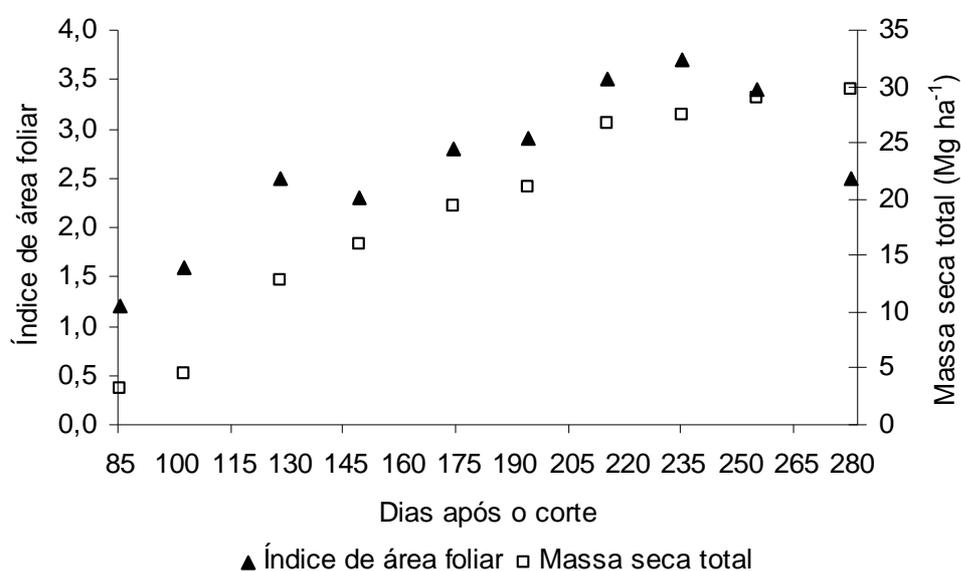


Figura 2. Índice de Área Foliar e Massa seca total da cana-de-açúcar durante o ciclo de cultivo (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

Observando-se a Figura 2, percebe-se que há incremento do IAF dos 85 aos 128 DAC, sendo os valores respectivamente de 1,2 e 2,5. Porém, a menor disponibilidade hídrica afetou o IAF, que aos 149 DAC caiu para 2,3. Taiz e Zeiger (2002) afirmam que o déficit hídrico pode afetar vários aspectos do crescimento vegetal, sendo os efeitos mais óbvios do estresse à redução das taxas de crescimento das plantas. Um efeito de particular importância em resposta a um déficit hídrico é a limitação à expansão da área foliar, sendo o seu decréscimo uma das conseqüências em resposta ao déficit hídrico, podendo ser considerado uma primeira linha de defesa contra a seca (Farias et al., 2008). Está redução da área foliar foi refletida pelo decréscimo do IAF. Porém, mesmo com a redução das

taxas de crescimento e do IAF, a MST se manteve crescente durante o período, alcançando o valor de $16,08 \text{ Mg ha}^{-1}$, aos 149 DAC, com um menor acréscimo em relação à coleta anterior (25%).

A coleta aos 174 DAC foi realizada no período após um evento de precipitação. Nota-se, que mesmo com a maior oferta hídrica e aumento do IAF (2,8), neste período, as taxas de crescimento foram menores do que o acompanhamento anterior, sendo os valores de TCA, TCR e TAL de $0,134 \text{ g d}^{-1}$, $0,008 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$ e $1,43 \text{ g dm}^{-1}\text{d}^{-1}$, respectivamente. A MST obtida para este dia foi de $19,43 \text{ Mg ha}^{-1}$. Estas menores taxas podem ser explicadas, provavelmente, ainda como efeitos do estresse hídrico sofrido pela cultura. Aos 194 DAC, com o IAF de 2,9, observa-se que as taxas de crescimento se mantiveram reduzidas, sendo a TCA e a TAL de $0,082 \text{ g d}^{-1}$ e $0,880 \text{ g dm}^{-1}\text{d}^{-1}$, respectivamente, e a TCR de $0,004 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$. A MST para esta observação foi de $21,08 \text{ Mg ha}^{-1}$. Aos 215 DAC, observaram-se taxas de crescimento maiores que as observadas aos 194 DAC, sendo os valores respectivamente, da TCA, TCR e TAL de $0,280 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$, $0,012 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$ e $3,034 \text{ g dm}^{-1}\text{d}^{-1}$. A MST para os 215 DAC foi de $26,67 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo o IAF deste dia de 3,5.

Aos 235 DAC observou-se o máximo IAF (3,7) da cultura da cana-de-açúcar. As taxas de crescimento obtidas foram menores em relação à coleta anterior, sendo a MST observada de $27,53 \text{ Mg ha}^{-1}$. Nas observações realizadas durante o estágio da maturação as TCA e TAL, foram respectivamente de $0,070 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$ e $0,759 \text{ g dm}^{-1}\text{d}^{-1}$, para os 255 DAC e de $0,041 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$ e $0,433 \text{ g dm}^{-1}\text{d}^{-1}$ para os 280 DAC. As TCR destas coletas ficaram próximas. A MST para os dias analisados para a fase de maturação, respectivamente, foi de 28,93 e 29,75 Mg ha^{-1} . De uma forma geral a MST foi crescente ao longo de todo o ciclo, concordando com Oliveira et al. (2007), que estudaram o crescimento de três variedades de cana-de-açúcar no Paraná. A MST final também obteve valores próximos aos encontrados por Almeida et al. (2008), estudando 4 variedades em cana-planta e cana-soca, em Alagoas.

A produtividade média obtida pela área acompanhada foi de $81,00 \text{ Mg ha}^{-1}$. Este valor ficou próximo ao resultado obtido por Benvenuti (2005), estudando a mesma variedade no estado de São Paulo, obtendo a produtividade média de $79,68 \text{ Mg ha}^{-1}$. Observa-se, no entanto, que a produtividade média da área total

do talhão foi de 63,00 Mg ha⁻¹. O autor supracitado também encontrou variação semelhante em sua área de estudo.

b) Balanço de energia na cana-de-açúcar

No decorrer do experimento, foi verificado os valores máximos de Rn ocorreram entre 11:00h e 13:00h. Este resultado foi similar ao encontrado por Moura (2005) estudando a cultura da goiabeira, na região Nordeste do Brasil. Durante o período de estudo o saldo de radiação máximo foi de 922 W m⁻² na fase de desenvolvimento de colmos, no horário de 12:30h.

A variação dos fluxos médios diurnos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), e o saldo de radiação (Rn) durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar são apresentados na Figura 3.

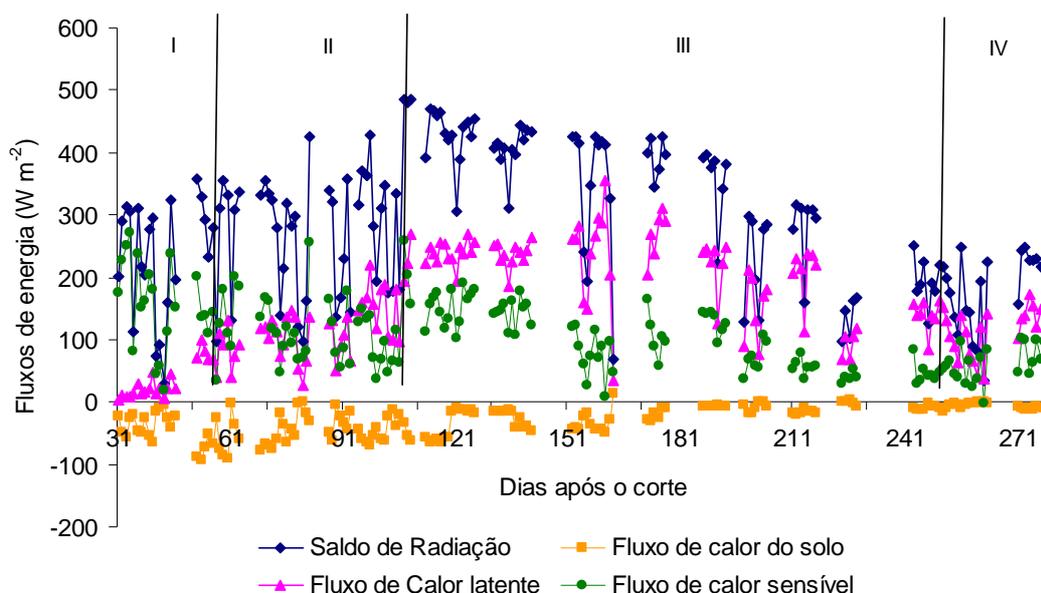


Figura 3. Variação das médias diurnas dos fluxos de energia durante o ciclo da cana-de-açúcar (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ (I – estabelecimento da cultura; II – perfilhamento; III – desenvolvimento dos colmos; IV - maturação).

Observa-se que no início do cultivo os valores de H são elevados, em função da cultura ainda não ter se estabelecido, tendo nenhuma ou pouca área foliar, sendo a maior parte da energia utilizada para o aquecimento do ar. Este maior consumo pode ser explicado pelo fato de que na fase de estabelecimento os fatores atmosféricos e do solo possuem maior participação do que os fatores da cultura na variação dos componentes do balanço de energia (Oliveira et al., 2009). Em torno de 90 dias após o corte (início da fase de perfilhamento) pode-se

perceber que o LE se transforma no maior consumidor da energia disponível, enquanto que o G mantém suas médias reduzidas durante todo o período. As médias diurnas dos fluxos durante o ciclo da cana-de-açúcar para Rn, LE, H e G foram de 284,41 W m⁻², 149,75 W m⁻², 106,62 W m⁻² e 28,10 W m⁻², respectivamente. Observa-se que a maior parte da energia disponível (Rn) foi consumida pelo fluxo de calor latente (LE), sendo a porcentagem média de 53%. A partição entre o fluxo de calor sensível e o saldo de radiação, apresentou o valor médio diurno durante o ciclo de 37%, enquanto que o G consumiu na média 10% da energia disponível. Estes resultados concordam com os obtidos em vários trabalhos com balanço de energia em culturas anuais e perenes, que concluíram que a maior porção do saldo de radiação é transformada em fluxo de calor latente (Cunha et al., 1994; Teixeira, 2001; Souza et al., 2008; André et al., 2009; Oliveira et al, 2009).

Na fase de estabelecimento, o H foi o maior consumidor da energia disponível, correspondendo a 63% do Rn. O LE representou apenas 18% da energia disponível. Observa-se que no período inicial do cultivo da cana-de-açúcar o G obteve sua maior proporção no consumo do saldo de radiação (19%), concordando com Lima et al. (2005), que também observaram o maior consumo do Rn com o G na primeira fase de desenvolvimento do feijão-caupi. As médias diurnas dos fluxos de energia (Rn, LE, G e H, respectivamente) para esta fase foram de 235,30 W m⁻², 42,37 W m⁻², 45,32 W m⁻² e 147,61 W m⁻². Durante o perfilhamento da cultura da cana-de-açúcar, pode-se perceber que o LE aumenta sua participação no consumo de Rn, sendo responsável por 43% do mesmo. O H correspondeu a 42% do Rn, enquanto que o G, 15%. As médias diurnas para este estágio foram de 277,43 W m⁻², 120,15 W m⁻², 42,17 W m⁻² e 115,11 W m⁻², para o Rn, o LE, o G e o H, respectivamente.

Na Tabela 4 está apresentado o resumo dos termos do balanço de energia para os dias de coleta de campo.

Tabela 4 - Termos do balanço de energia para o período diurno dos dias de coleta: Saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo (Rn, LE, H e G em $W m^{-2}$, respectivamente) e índice de área foliar (IAF).

DAC	IAF	Rn	LE	G	H	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
85	1,2	424,12	136,59	30,67	256,87	0,32	0,61	0,07
102	1,6	428,43	218,58	70,16	139,68	0,51	0,33	0,16
128	2,5	450,02	269,62	14,30	166,11	0,60	0,37	0,03
149	2,3	424,77	261,73	43,46	119,58	0,62	0,28	0,10
174	2,8	374,17	291,38	24,84	57,96	0,78	0,15	0,07
194	2,9	387,56	241,97	6,77	138,82	0,62	0,36	0,02
215	3,5	277,85	206,22	18,29	74,73	0,74	0,19	0,07
235	3,7	254,90	193,71	8,70	52,50	0,76	0,21	0,03
255	3,4	198,52	130,43	10,19	57,90	0,66	0,29	0,05
280	2,5	211,94	105,17	9,58	97,19	0,50	0,46	0,04

Para o estágio de perfilhamento, foram realizadas duas coletas de campo, uma aos 85 e outra aos 102 DAC. Percebe-se que aos 85 DAC a maior parte da energia foi destinada ao H, sendo o IAF de 1,2. Aos 102 DAC, com a maior cobertura do solo, representada pelo maior IAF (1,6), observa-se que o LE é o maior consumidor da energia disponível com 51%.

Durante o estágio de desenvolvimento dos colmos, observou-se que o LE correspondeu à maior parte do Rn, em todo o período, representando na média 62% da energia disponível. Andre et al. (2010) estudando o balanço de energia para a na região de Campos dos Goytacazes, encontraram para os dias analisados durante a fase de desenvolvimento dos colmos, o consumo de 86% do Rn pelo LE, em cultivo que não sofreu estresse hídrico. A menor taxa observada no presente estudo pode ser devido ao período prolongado de estiagem (55 dias) que ocorreu logo no início desta fase, correspondendo a 43% da etapa de desenvolvimento dos colmos. O H representou 31% do consumo de Rn e o G médio foi de 7% da energia disponível. Os valores médios dos fluxos energéticos durante o desenvolvimento de colmos foram de $349,14 W m^{-2}$, $216,18 W m^{-2}$, $109,50 W m^{-2}$ e $23,46 W m^{-2}$, para o Rn, LE, H e G, respectivamente.

Para os dias em que ocorreram as coletas de campo durante a fase de desenvolvimento dos colmos observa-se que o LE se mantém como o principal consumidor do Rn, mesmo durante a estiagem. Durante o período seco foram analisados os 128 e os 149 DAC. Observa-se que para estes dias a porcentagem média de energia consumida por LE foi de 60% do Rn. Para o H, o consumo de energia para os 128 DAC foi de 37%, enquanto que para o G foi de 3%. Observa-se que o IAF para este dia foi de 2,5. Aos 149 DAC o H foi responsável pelo

consumo de 29% da energia disponível e o G por 10%. O IAF para este dia foi de 2,3. O menor grau de cobertura do solo, representado pela redução do IAF pode estar relacionado ao acréscimo do G.

Após o período de estiagem foram feitas mais quatro observações durante o desenvolvimento dos colmos. Observa-se que para estes dias selecionados o grau de cobertura do solo é maior em relação aos dias analisados anteriormente e a disponibilidade hídrica também. O IAF para os 174, 194, 215 e 235 DAC, respectivamente, foi de 2,8, 2,9, 3,5 e 3,7, este último sendo o IAF máximo observado durante o ciclo da cana-de-açúcar. A média de consumo do Rn pelo LE para estes dias foi de 72,5%. Para os 194 DAC observou-se que o LE foi menor em relação à média. Este fato pode ser explicado pela ocorrência de chuva neste dia. A média do consumo de H para os dias analisados foi de 22,75% do Rn e para o G foi de 4,75%.

Observou-se durante o ciclo da cana-de-açúcar que os fluxos energéticos sofreram decréscimo ao longo do cultivo, fato associado à disponibilidade de energia na região, que foi maior no início, apresentando um maior fotoperíodo, e menor ao final do ciclo da cultura, mesma condição encontrada por Souza et al. (2008). As médias diurnas dos fluxos de energia durante a fase de maturação da cana-de-açúcar foram, respectivamente, para Rn, LE, H e G de $184,01 \text{ W m}^{-2}$, $121,44 \text{ W m}^{-2}$, $55,60 \text{ W m}^{-2}$ e $6,97 \text{ W m}^{-2}$.

Nos 255 DAC observa-se que o IAF foi de 3,4 e o LE consumiu 66% do Rn. O H correspondeu a 29% da energia disponível, enquanto que o G consumiu 5%. Para os 280 DAC o IAF decresceu, sendo acompanhado também do decréscimo do LE, que para este dia consumiu 50% da energia disponível. Observa-se que há acréscimo do H, representando 46% do Rn. O G para este dia foi de 4% da energia disponível. As menores taxas observadas em relação ao LE podem estar associadas à menor transpiração das plantas devido à redução da área foliar e das taxas de crescimento deste período.

CONCLUSÕES

As variações de disponibilidade hídrica influenciaram diretamente nas taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia.

As taxas de crescimento decresceram durante o período prolongado de estiagem. No entanto, a matéria seca da cultura manteve-se crescente em todas as avaliações.

A maior parte da energia disponível (R_n) foi consumida pelo fluxo de calor latente (LE), sendo a porcentagem média de 53%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELHADI, A.W.; HATA, T.; TANAKAMARU, H.; TADA, A.; TARIQ, M.A. (2000) Estimation of crop Water requirements in arid region using Penman-Monteith equation With derived crop coefficients: a case study on Acala cotton in Sudan Gezira irrigated scheme. *Agricultural Water Management* 45, 203-214.
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, J.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. (2008) Desenvolvimento Vegetativo e Produção de Variedades de Cana-de-Açúcar em Relação à Disponibilidade Hídrica e Unidades Térmicas. *Ciência agrotécnica*, v. 32, n. 5, p. 1441-1448.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) *Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements*. Rome: FAO. 301p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGTH, J.L., BURMAN, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*. n.81: 650-662.
- ANDRÉ, R.G.B; MENDONÇA, J.C.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, V. S. MARQUES, J. (2010) Aspectos Energéticos do Desenvolvimento da cana-de-açúcar Parte 2: Balanço de energia e Parâmetros Derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.4, 535 – 542.
- BENVENUTI, F.A. (2005) Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos. (Dissertação de mestrado) – Campinas, SP. Universidade Estadual de Campinas, 103 p.
- BORGES, C.J.R.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R.; CAMPOS, J.H.B.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; SILVA, B.B. (2008) Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.393–399.
- COPERSUCAR. (1995) Quinta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar. Boletim Técnico, Edição Especial, Piracicaba.

- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. (1994) Balanço de Energia em Alfafa. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 2, p.9-16.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (2006) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - Solos. (2003) Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Angra-PESAGRO-Rio: estação experimental de Campos / Enio Fraga da Silva... [et al.] – Rio de Janeiro. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 38), 93 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. (1997) Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; NETO, J.D. (2008) Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.4, p.356–362.
- KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. (1999) Modelling Sugarcane Production Systems I: Development and Performance of the Sugarcane Module. Field Crops Research, Amsterdam, v. 48, p. 27-36.
- MOURA, M.S.B. (2005) Consumo hídrico, Produtividade e Qualidade de Fruto da Goiabeira Irrigada na Região do Submédio São Francisco. (Tese de Doutorado) – Campina Grande-PB. Universidade Federal da Paraíba, 122 p.
- MONTEITH, J.L. (1981) Evaporation and surface temperature. Q.J. Royal Meteorological Society, London. v.107, p. 1-27.
- MONTEITH, J.L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, v. 9, p. 747-766.
- OLIVEIRA, I.A.; LIMA, J.R.S.; SILVA, I.F.; ANTONINO, A.C.D.; NETO, G.C.G.; LIRA, C.A.B.O. (2009) Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. Revista Brasileira de Ciências Agrárias v.4, n.2, p.185-191.
- OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. (2007) Área Foliar em Três Cultivares de Cana-de-açúcar e sua Correlação com a Produção de Biomassa. Pesquisa Agropecuária Tropical 37, 71-76.
- OLIVEIRA, M.B.L.; SANTOS, A.J.B.; MANZI, A.O.; ALVALÁ, R.C.S.; CORREIA, M.F.; MOURA, M.S.B. (2006) Trocas de energia e fluxo de carbono entre

a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 378-386.

- ORTEGA-FARIAS, S. O.; OLIOSSO, A.; FUENTES, S.; VALDES, H. (2006) Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman–Monteith equation With a variable surface canopy resistance. *Agricultural Water Management*. 82, 421-432.
- PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N. A. ALFARO, A.T. (2009) Necessidades hídricas de citros e macieiras a partir da área foliar e da energia solar. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal - SP, v. 31, n. 3, p. 671-679.
- RODRIGUES, H.J.B. (2006) Balanço de radiação, energia e fluxo de CO₂ em ecossistema de manguezal na Amazônia. (Tese de doutorado) – Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 202 p.
- SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C.R.; ALVES JÚNIOR, J.; BONFIM-SILVA, E. M. (2007) Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de BoWen. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.392-403.
- SILVA, L. C.; BELTRÃO, N. E. M.; AMORIM NETO, M. (2000) Análise de crescimento de comunidades vegetais. Campina Grande: Embrapa CNPA, 46p. Circular Técnica, 34.
- SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R. (2008) Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.400–407.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. (2002) *Plant physiology*. 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, 798p.
- TEIXEIRA, A.H.C. (2001) Avaliação dos Componentes do Balanço de Energia Durante o Primeiro Ano de Cultura da Banana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.1, p.28-32.
- TOLEDO FILHO, M.R. Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas. (2001) Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 168p.

DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ (PARTE II): VARIAÇÕES DO ALBEDO, NDVI E SAVI

RESUMO

O albedo é um parâmetro muito importante no balanço de radiação de uma superfície e bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos, tais como estimativas do fluxo de vapor d'água e do saldo de radiação, dentre outros; entretanto, este parâmetro nem sempre está disponível. O objetivo deste estudo foi apresentar as variações do albedo, NDVI e SAVI durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar. Para tal, instalou-se uma estação micrometeorológica em uma área de 13 ha, em cultivo comercial da Fazenda Partido. O cultivo foi acompanhado periodicamente aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC), para obtenção da matéria seca e do índice de área foliar. O NDVI e o SAVI durante o ciclo da cultura foram obtidos a partir de imagens MODIS/Terra, sendo todas as rotinas computacionais necessárias executadas no programa Erdas, versão 8.7. As variações do albedo foram afetadas pelas condições hídricas do período. De uma forma geral o albedo acompanhou as variações do IAF. O NDVI e o SAVI foram influenciados pelas condições hídricas do período, mas de forma geral acompanharam as variações do albedo e do IAF.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço de radiação, índices de vegetação, IAF.

ABSTRACT

The albedo is an important parameter in the radiation balance of a surface and is commonly used in climate models and crop weather, such as estimates of the flow of water vapor and net radiation, among others, however, this parameter is not always available. The aim of this study was to show the variations of albedo, NDVI and SAVI during the growing cycle of sugar-cane. To this end, he settled a micrometeorological station in an area of 13 ha in commercial cultivation of Farm Partido. The culture was regularly monitored at 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 and 280 days after cutting (DAC), to obtain the total dry weight and leaf area index. The NDVI and SAVI during the crop cycle were obtained from MODIS image, and all necessary computing routines implemented in Erdas program, version 8.7. The variations of albedo were affected by water conditions throughout the period. In general the albedo followed the variations of the LAI. The NDVI and the SAVI were influenced by the water conditions of the period, but generally followed the variations of albedo and LAI.

KEY-WORDS: Net radiation, vegetation index, LAI.

INTRODUÇÃO

A Região Norte Fluminense, especialmente o município de Campos dos Goytacazes, se destaca como um pólo da cultura da cana-de-açúcar (Reis Júnior e Monnerat, 2002). Apesar da atividade canavieira fluminense não ter acompanhado o crescimento nacional do setor, tal atividade continua sendo um dos principais suportes da agricultura do Estado do Rio de Janeiro, quer na geração de receita, quer na geração de empregos diretos e indiretos (Oliveira, 2005).

A cana-de-açúcar é cultura produzida em grandes extensões territoriais, sendo sua produção afetada por variações climáticas. No entanto, por ser um monocultivo que ocupa extensas áreas, suas relações afetam também o ambiente onde está inserida. Para que se possa compreender e analisar os impactos de uma determinada cultura em uma região, é preciso se conhecer suas relações e suas trocas energéticas com o ambiente.

O albedo é um parâmetro muito importante no balanço de radiação de uma superfície e bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos, tais como estimativas do fluxo de vapor d'água e do saldo de radiação, dentre outros; entretanto, este parâmetro nem sempre está disponível, visto que sua medida não é efetuada de forma rotineira, como ocorre com muitos outros parâmetros meteorológicos (Leitão, et al. 2002). Em sistemas ecológicos, o albedo controla as condições microclimáticas das culturas e sua absorção de radiação, afetando aspectos físicos, fisiológicos e processos biogeoquímicos, tais como o balanço de energia, evapotranspiração, fotossíntese e respiração (Wang et al., 2001).

Diversos estudos têm sido realizados no Brasil e no mundo buscando-se compreender e relacionar as variações do albedo e suas interações ambientais. Wang e Davidson (2007) investigaram o impacto climático das variações do albedo, no Canadá; Souza et al. (2010) estudaram as modificações do albedo da soja durante seu ciclo produtivo, em uma região de avanço da fronteira agrícola na Amazônia; Pereira et al. (2009) realizaram estudo preliminar do impacto do cultivo da cana-de-açúcar nas variações do albedo, na região de Araraquara, São Paulo; Leitão et al. (2002) analisaram medidas do albedo obtidas nos ecossistemas de Campina, Campinarana e Mata Densa na floresta amazônica.

Os índices de vegetação podem ser definidos como a combinação de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com características da vegetação, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o mais utilizado. O NDVI é uma relação entre as refletâncias das bandas do infravermelho próximo e do vermelho e varia de -1 a +1, sendo que valores maiores, segundo Silva et al. (2007) estão associados à vegetação vigorosa. O estudo de fenologia da cultura constitui um parâmetro importante para a avaliação do desenvolvimento e manejo da cana-de-açúcar, através do NDVI associados à precipitação, dando suporte ao monitoramento da biomassa (Lucas e Shuler, 2007).

Mas, mesmo que o solo esteja completamente coberto pela vegetação, o mesmo influencia os índices de vegetação gerados. Nos primeiros estádios de desenvolvimento das culturas, essa influência deve ser considerada, pois não há cobertura total do solo. Huete (1988) adicionou uma constante denominada L à

equação do NDVI, criando assim o Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) ou Índice de Vegetação Ajustado para as diferenças do Solo (IVAS).

Tendo em vista a importância do agrossistema da cana-de-açúcar no Norte Fluminense, o objetivo deste estudo foi apresentar as variações do albedo, NDVI e SAVI durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar nas condições de clima e solo locais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área de 13 hectares, de um total de 33 hectares, em cultivo comercial de cana-de-açúcar na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, não irrigado, em Campos dos Goytacazes, RJ (coordenadas geográficas: 21°48'17,1" sul e 41°16'28, 8" oeste, referidas ao *datum* WGS84, altitude local de 9 m).

A variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada em um espaçamento de 1,5 m, estando na ressoca de 3^o corte. Segundo a COPERSUCAR (1995), esta variedade apresenta uniformidade e alto perfilhamento em condições normais; pouco acamamento; touceiras com hábito levemente decumbente, sendo as folhas arqueadas de largura média com o volume da copa denso; mesmo em solos de média para baixa fertilidade, projeta alta produtividade na média de cinco cortes; é recomendada para colheita do meio para o final de safra, podendo ser classificada como média. A produtividade média obtida na área experimental foi de 81 Mg ha⁻¹. A média de produtividade do talhão total foi de 63 Mg ha⁻¹. No período pós-colheita, a área foi fertirrigada com lâmina total de 90 mm de vinhoto, diluído a 2% de potássio. O solo, que apresenta drenagem moderada, ausência de pedregosidade e propriedades vérticas, foi classificado como Cambissolo Háplico Eutrófico (Embrapa, 2006). A composição granulométrica e a densidade de partículas dos diferentes horizontes do solo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição granulométrica e densidade de partículas para os horizontes identificados no perfil do solo.

Horizonte		Frações granulométricas			Densidade de
Símbolo	Espessura	Argila	Silte	Areia	Partículas
	-- (cm) --	----- (g kg ⁻¹) -----			-- (Mg m ⁻³) --
A _p	0 - 15	341,5	306,5	351,9	2,583
A ₂	15 - 35	407,9	379,5	212,6	2,598
Bi ₁	35 - 70	378,7	436,6	184,7	2,697
Bi ₂	70 - 95	373,0	465,8	161,2	2,743
Bi ₃	95 - 130	496,1	400,5	103,4	2,795
C ₁	130 - 150 ⁺	320,0	360,2	319,9	2,806

O clima de Campos dos Goytacazes é classificado como Tropical. A temperatura média da região é de 23,2 °C, sendo julho o mês mais frio (temperatura média 20,1 °C) e fevereiro o mês mais quente (temperatura média 26 °C), sendo do tipo Aw segundo a classificação de Köppen. A umidade relativa do ar é bastante variável dependendo das condições de relevo e ventos. Para o litoral, registram-se valores entre 80 e 82 %, que diminuem à medida que se penetra para o interior do continente. Na região predominam os ventos de norte, nordeste e noroeste oriundos do Atlântico Sul, com ventos de norte e leste soprando principalmente no verão. A média anual de precipitação pluviométrica de Campos dos Goytacazes é de 1.087 mm, sendo o trimestre mais chuvoso os meses de novembro, dezembro e janeiro, com maior frequência em dezembro. Nesta época, é comum a ocorrência de uma seqüência de dias secos, caracterizando o chamado veranico, fator agravante para agricultura sob tecnologia de sequeiro. O inverno é seco, com um período crítico entre os meses de junho a agosto (Embrapa, 2003).

Na área do experimento foi instalada no dia 12 de outubro de 2009, 30 dias após o corte, uma estação micrometeorológica contendo os seguintes sensores: 1 saldo radiômetro NR Lite; 2 piranômetros LI 200 X-Li-cor; 2 termohigrômetros HMP45C-L, da Vaissala; 2 anemômetros Met One, da RM Young; 3 fluxímetros HFP01SC-L, da Hukseflux. Todos os dados foram coletados a cada minuto e armazenados em valores médios a cada 15 minutos por um coletor de dados (datalogger) CR21X, da Campbell Scientific. As hastes horizontais foram dispostas a 0,50 m sobre o dossel da cultura (1ª haste) e a 2,5 m sobre o dossel (2ª haste), as quais foram elevadas de acordo com o crescimento da cultura. Junto à estação, foi instalado um pluviômetro registrador da Squitter do Brasil, com 0,25 mm de sensibilidade.

Para acompanhamento do cultivo foram feitas coletas de campo periódicas aos 85, 102, 128, 149, 174, 194, 215, 235, 255 e 280 dias após o corte (DAC). Em cada coleta foram obtidas amostras em 40,0 m do cultivo, de forma aleatória, sendo determinadas as massas frescas totais de colmos e das folhas e coletada a palhada, a cada metro. As amostras de folhas foram levadas para a determinação da área foliar, que foi realizada com auxílio do equipamento LICOR-3100 no laboratório, para posterior estimativa da área foliar total e cálculo do IAF (índice de área foliar = área foliar/área ocupada pela planta). Após este procedimento as amostras de colmos e folhas foram levadas para secagem do material verde, sendo identificadas e colocadas em estufa de ventilação forçada a uma temperatura média de 70°C até peso constante, seguido da pesagem do massa da matéria seca total, para posterior estimativa da massa da matéria seca total por hectare.

Obteve-se o albedo (α) como sendo a razão entre a irradiância solar refletida ($R\uparrow$) e a irradiância solar incidente ($R\downarrow$) da radiação global, sendo apresentada na Equação 1:

$$\alpha = \frac{R\downarrow}{R\uparrow} \quad (1)$$

As imagens digitais orbitais utilizadas para obtenção do NDVI foram provenientes do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) da plataforma Terra, obtidas gratuitamente no portal da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Todas as rotinas computacionais necessárias a geração do NDVI e do SAVI foram executadas no módulo Model Maker do programa Erdas Imagine, versão 8.7. Os dias julianos analisados foram: 346/2009, 355/2009, 20/2010, 36/2010, 125/2010, 150/2010 e 168/2010. Estes dias foram selecionados devido à ausência de nuvens e ao fato de estarem próximos aos acompanhamentos de campo. O NDVI e o SAVI foram obtidos de acordo com as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(IVP - V)(1 + L)}{(IVP + V + L)} \quad (3)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas da variação do albedo para quatro dias, sendo um para a fase de estabelecimento, outra para o perfilhamento, outra para o desenvolvimento dos colmos e uma para a fase de maturação da cultura da cana-de-açúcar.

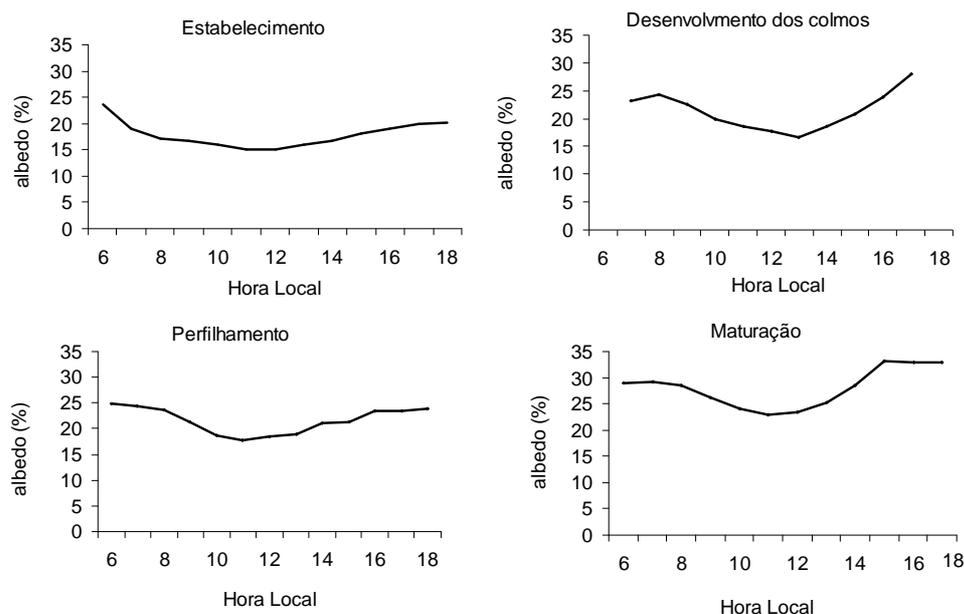


Figura 1. Variação horária diurna do albedo para cada estágio fenológico da cana-de-açúcar, durante o ciclo da cultura (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

Observa-se na Figura 1 que nos dias apresentados os valores do albedo máximos ocorreram próximos ao nascer e pôr-do-sol e os valores mínimos ocorreram próximos ao meio-dia nas fases de perfilhamento e maturação da cana-de-açúcar. Este resultado concorda com o encontrado por Moura (2005), para a goiabeira, sendo este ajustamento atribuído ao ângulo de elevação solar. Alves (1997) fez análise do albedo, para a cultura do melão irrigado por gotejamento, em Mossoró – RN, obtendo comportamento semelhante, com valores máximos no início da manhã e final da tarde e mínimos em torno do meio-dia. Na fase de desenvolvimento dos colmos observou-se que os valores do albedo se iniciaram mais baixos, se elevando próximo às 8 horas, depois seguindo o padrão das outras fases. O albedo médio para a fase de estabelecimento foi de $0,20 \pm 0,03$; para o perfilhamento foi de $0,26 \pm 0,03$; para a fase de desenvolvimento dos colmos foi de $0,28 \pm 0,03$; e para a fase de

maturação da cana-de-açúcar foi de $0,26 \pm 0,02$. O valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura foi de $0,26 \pm 0,04$. André et al. (2010) estudando o balanço de radiação no Norte Fluminense, utilizando a variedade RB5536, encontraram 0,24 para o estágio de perfilhamento; 0,30 para o desenvolvimento dos colmos e 0,31 para a maturação. O valor médio para todo o ciclo encontrado por estes autores foi de 0,28.

Na Figura 2 está apresentada a variação do albedo em relação à chuva no período de estudo.

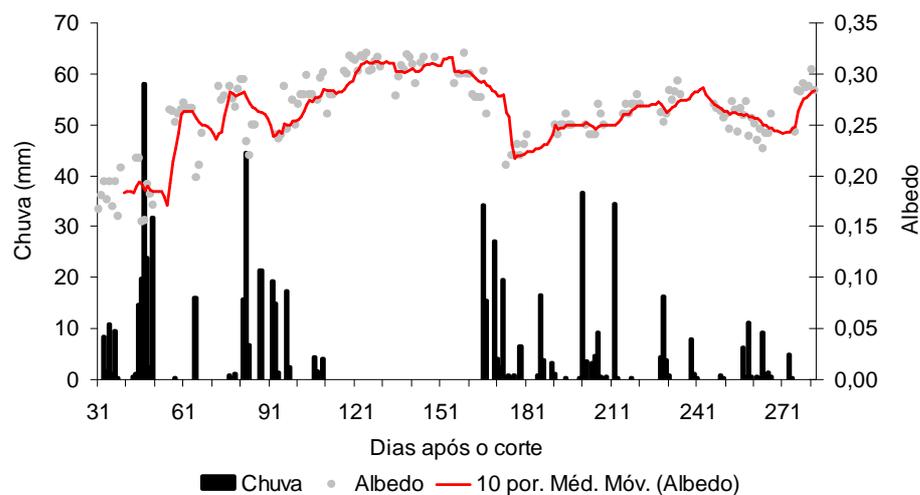


Figura 2. Variação do albedo diário em relação à ocorrência de chuvas durante o período de estudo, na cultura da cana-de-açúcar, em Campos dos Goytacazes, RJ (12 de outubro de 2009 a 26 de junho de 2010).

Observa-se na Figura 2 que o albedo variou de acordo com a pluviosidade do período, sendo maior em períodos com menor disponibilidade hídrica e menor em períodos chuvosos, mesmo comportamento obtido por Lima et al. (2009), estudando pastagens e a caatinga na região Nordeste do Brasil. Leitão e Oliveira (2000) observaram que em condições irrigadas o albedo do amendoim reduziu, demonstrando também sua dependência em relação ao teor de umidade do solo. O solo mais úmido absorve mais radiação eletromagnética e, por estar mais hidratado causa redução da refletância, abaixando o albedo. Este resultado também concorda com os obtidos por Leitão e Oliveira (2000). Wang e Davidson (2007), afirmaram que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente nos padrões sazonais do albedo.

Na Figura 3 estão apresentadas as variações do albedo em função da MST, do IAF e da altura do dossel.

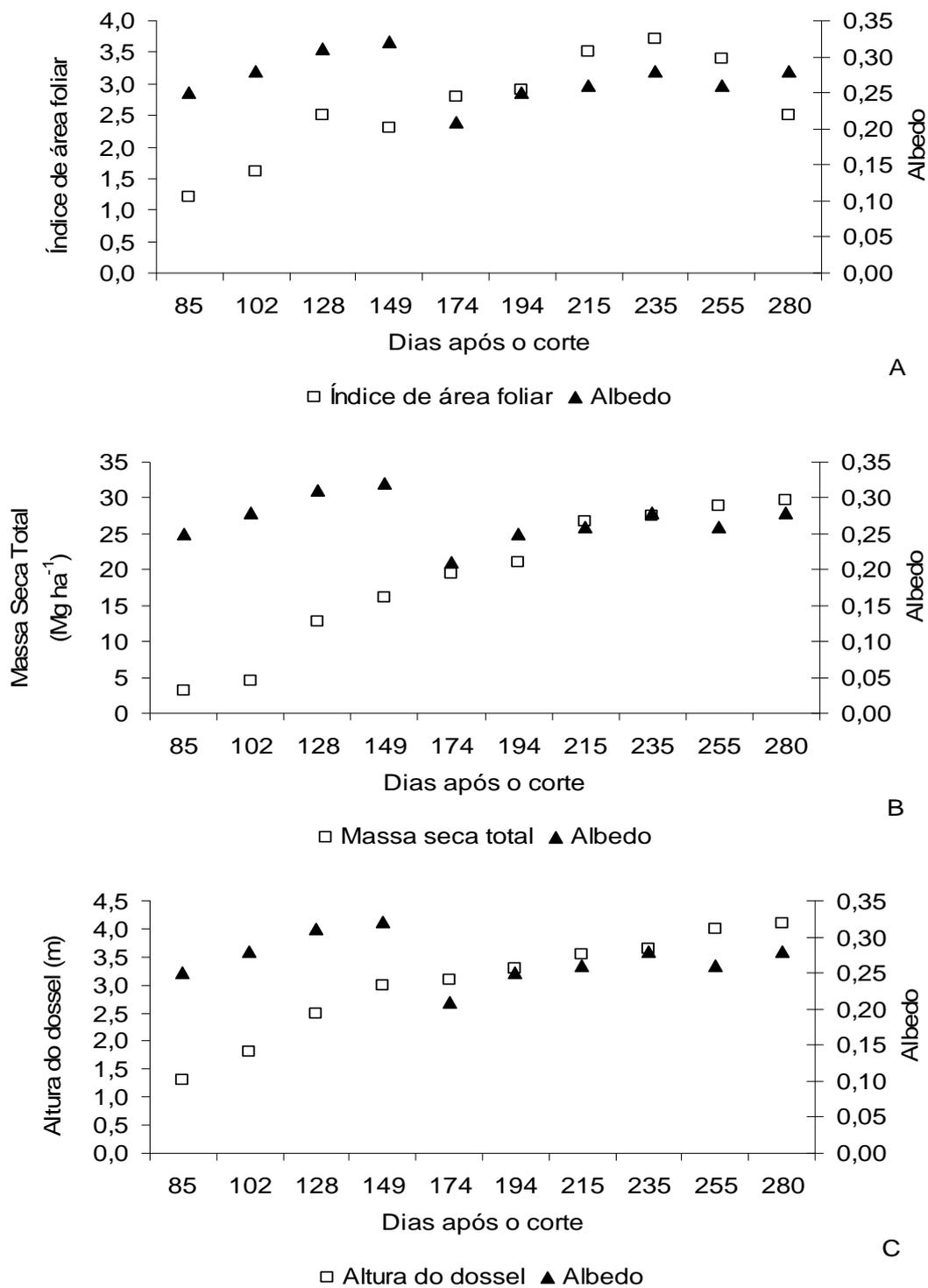


Figura 3. Variações do albedo junto do IAF (A), da MST (B) e da altura do dossel (C), durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

Observa-se na Figura 3 que nas quatro primeiras observações de campo o albedo foi crescente com a MST e a altura do dossel, concordando com André et al. (2010). Estes autores afirmam que os valores do albedo têm a tendência de aumentar com o desenvolvimento da cultura devido ao aumento da cobertura do

solo. Este padrão ocorreu para as três primeiras observações do IAF, que também acompanhou a crescente do albedo, concordando com Souza et al. (2010), estudando a cultura da soja. A palhada da cana-de-açúcar também foi crescente ao longo de todo o cultivo, como pode ser observado na Figura 4.

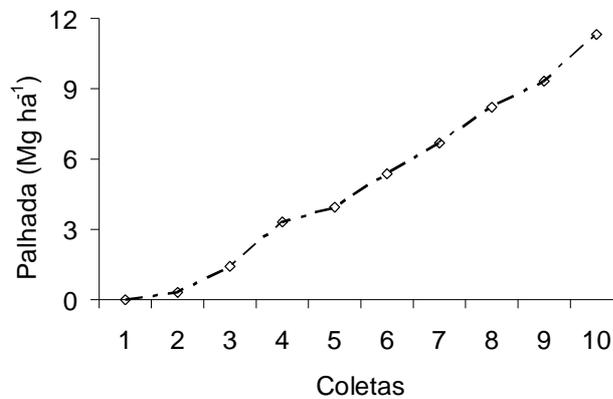


Figura 4. Evolução da palhada da cana-de-açúcar durante o ciclo da cultura (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

Observando-se ainda a Figura 2, onde há a apresentação das chuvas ocorridas durante o período experimental, pode-se perceber que entre os 110 e 165 DAC, há um período prolongado de estiagem. Este período influenciou diretamente no IAF da cultura, reduzindo-o, e no albedo, ocorrendo seus valores máximos. Observa-se que em torno dos 170 DAC há a redução dos valores do albedo, possivelmente devido à diminuição da quantidade de radiação refletida, principalmente durante o período chuvoso e também pela re-hidratação da cultura que vinha sofrendo estresse hídrico. Esta condição também foi observada por Silva et al. (2011). Dessa forma, o aumento do albedo não foi contínuo durante o ciclo. Este fato pode explicar também porque o maior albedo não coincidiu com o maior IAF da cultura da cana-de-açúcar, discordando de Souza et al. (2010), que encontraram o albedo máximo da soja associado ao máximo IAF.

Outras variáveis analisadas foram o NDVI e o SAVI obtidos pelo uso de técnicas de sensoriamento remoto orbital. Observam-se na Figura 5 as variações do NDVI e do SAVI em relação ao albedo e ao IAF, durante o ciclo da cana-de-açúcar.

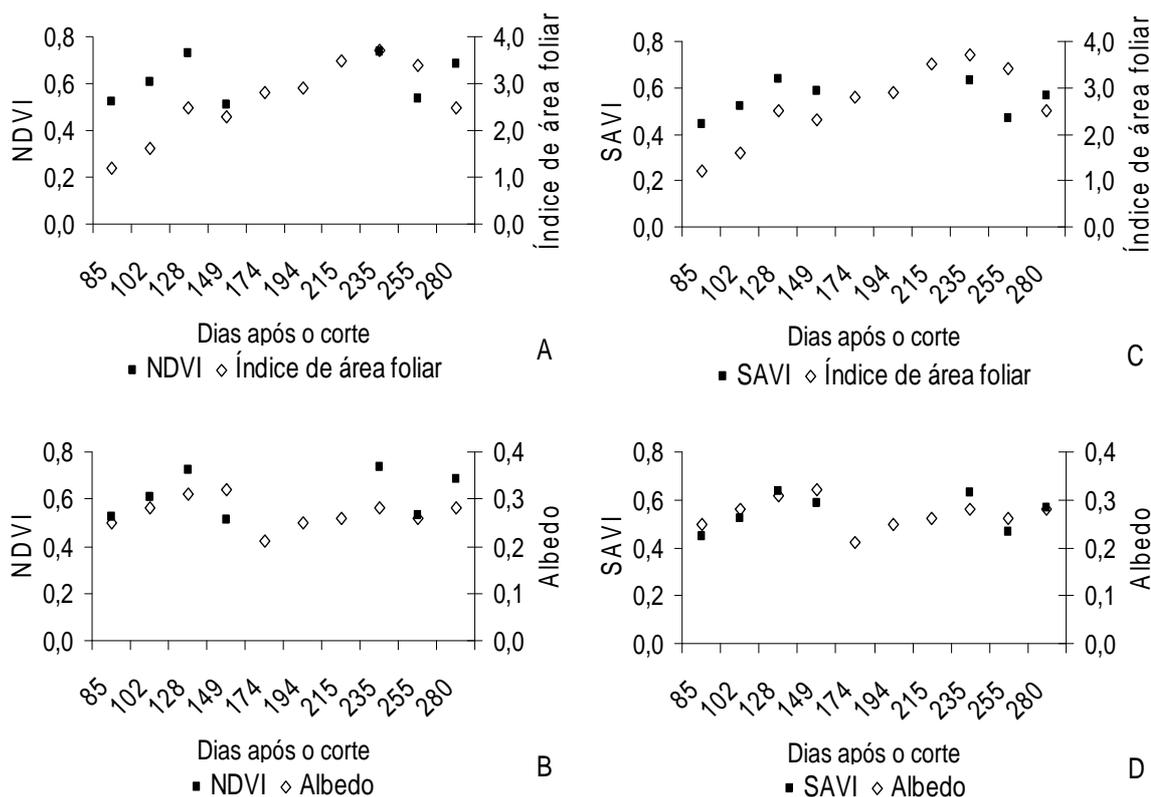


Figura 5. Variações do NDVI e do SAVI em relação ao IAF (A e C) e ao albedo (B e D) nos acompanhamentos de campo, durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar (setembro de 2009 a outubro de 2010), em sequeiro, variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

Na Figura 5 percebe-se que o NDVI e o SAVI, de uma forma geral, acompanharam as variações do albedo e do IAF, com exceção dos 235 DAC, o qual o NDVI e o SAVI obtiveram ajustamento diferente do IAF. Neste período a cultura passou por um breve período de baixa disponibilidade hídrica, devido a baixas precipitações, o que pode ser observado na Figura 2, porém este período não interferiu no IAF. Na Figura 6 observam-se as relações do NDVI e do SAVI com a interação IAF-albedo.

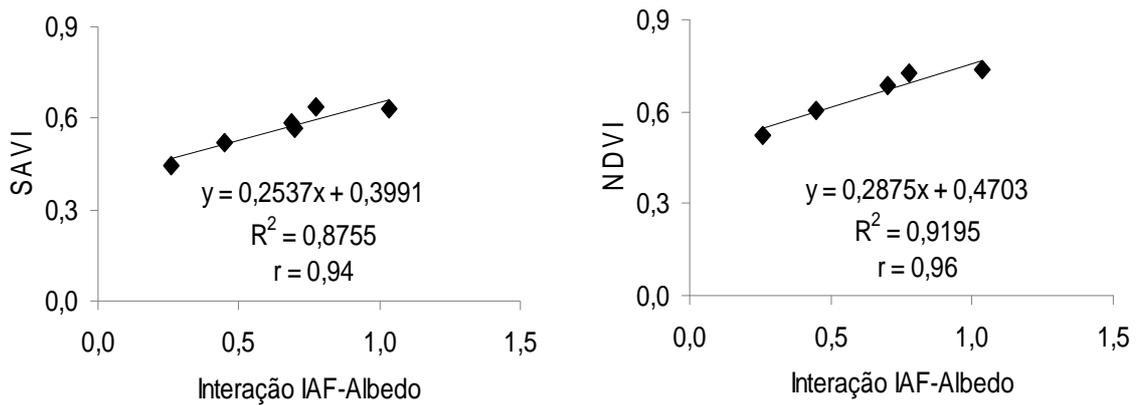


Figura 6. Relações do NDVI e do SAVI com a interação IAF-albedo, durante o ciclo da cana-de-açúcar (SP81-3250), em sequeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.

O coeficiente R^2 para o SAVI foi de 0,8755 e para o NDVI foi de 0,9195. O coeficiente r para o SAVI foi de 0,94 e para o NDVI foi de 0,96, mostrando correlação satisfatória dos índices de vegetação analisados com a interação IAF-albedo. Foram excluídos da análise estatística dados discrepantes, possivelmente afetados por outras variáveis.

Aos 85 DAC, com o IAF de 1,2, quando o solo se encontrava parcialmente coberto, o albedo da cana-de-açúcar foi de 0,25. O NDVI para este dia foi de 0,524 e o SAVI foi de 0,445. Aos 102 DAC, o IAF encontrado foi de 1,6, sendo acompanhado pelo aumento do albedo de 0,25 para 0,28. O NDVI e o SAVI obtidos também foram maiores em relação à primeira coleta, sendo de 0,605 e 0,521, respectivamente.

Nos acompanhamentos dos 128 e 149 DAC a cultura da cana-de-açúcar estava sofrendo um intenso estresse hídrico por conta da falta de chuvas do período em análise (Figura 2). O IAF se reduziu de 2,5 para 2,3, respectivamente, sendo também observado o aumento da palhada (Figura 4). Os albedos destes dias ficaram próximos, sendo 0,31 para o primeiro e 0,32 para o segundo. O NDVI é fortemente relacionado à umidade do solo, como já mencionado. Durante o período de estiagem observa-se que quando o IAF se reduziu, o NDVI também se reduziu de 0,726 para 0,511. Segundo Silva et al. (2007), embora o NDVI não seja uma medida direta da umidade do solo, estudos anteriores mostram que ele pode ser utilizado para monitorá-la, pois durante períodos de estiagem a cobertura vegetal sofre diretamente os impactos da queda da umidade no solo. Observa-se que o SAVI também reduziu, porém de maneira menos acentuada

que o NDVI. Seus valores foram de 0,638 para os 128 DAC e 0,584 para os 149 DAC.

Aos 174,194 e 215 DAC, sendo estas avaliações da cultura feitas após a chuva, os IAFs encontrados para estes dias foram de 2,8, 2,9 e 3,5, respectivamente, e os valores do albedo foram de 0,21, 0,25 e 0,26. Os NDVIs e SAVIs da cultura não foram observados neste período devido à grande nebulosidade, sendo que não foram encontradas imagens passíveis de utilização.

Aos 235 DAC o albedo sofreu um incremento, em relação aos dias anteriores, sendo de 0,28. O aumento dos valores do albedo foi acompanhado pelo incremento do IAF, sendo de 3,7. O NDVI obtido para este dia foi de 0,738 e o SAVI foi de 0,633. Para a fase de maturação, o IAF encontrado para os dias analisados (255 e 280 DAC) foi de 3,4 e 2,5, sendo o albedo destes dias de 0,26 e 0,28, respectivamente. Os valores mais elevados do albedo no período de maturação podem ser relacionados à maior quantidade de palhada, material mais claro, e, por conseguinte, com maior poder reflexivo (Figura 4). Para os dias analisados na fase de maturação os NDVIs encontrados foram respectivamente, de 0,534 e 0,684 e os SAVIs foram de 0,468 e 0,565.

CONCLUSÕES

As variações do albedo foram afetadas pelas condições hídricas do período.

O valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura da cana-de-açúcar foi de 0,26.

De uma forma geral o albedo acompanhou as variações do IAF. O NDVI e o SAVI foram influenciados pelas condições hídricas do período, mas de forma geral acompanharam as variações do albedo e do IAF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Rome: FAO. 301p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALVES, A.V. (1997) Balanços de radiação e de energia em um cultivo de melão. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB. 95p. (Dissertação de Mestrado).
- ANDRÉ, R.G.B; MENDONÇA, J.C.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, V. S. MARQUES, J. (2010) Aspectos Energéticos do Desenvolvimento da cana-de-açúcar Parte 1: Balanço de radiação e Parâmetros Derivados. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.3, p.375-382.
- BERNARDO, S. (1995) Manual de irrigação. 6ª ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 657p.
- COPERSUCAR. (1995) Quinta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar. Boletim Técnico, Edição Especial, Piracicaba.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (2006) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - Solos. (2003) Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Angra-PESAGRO-Rio: estação experimental de Campos / Enio Fraga da Silva... [et al.] – Rio de Janeiro. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 38), 93 p.
- HUETE, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, v. 25, n. 3, p. 295-309.
- LEITÃO, M.M.V.B.R.; OLIVEIRA, G. M. (2000) Influência da irrigação sobre o albedo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, p.214-218.
- LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, G. M. O. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta Amazônica. (2002) Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.256-261.
- LIMA, P.C.S.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; AZEVEDO, P.V.; OLIVEIRA, G.M.; SOBRINHO, J.E.; MOURA, M.S.B.; MENEZES, H.E.A.; PINTO, M.G.C.L. (2009) Albedo de pastagem e caatinga. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Belo Horizonte, MG, Anais...2009.

- LUCAS, A.A.; SCHULER, C. A. B. (2007) Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no Litoral Norte de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.6, p.607–614.
- MOURA, M.S.B. (2005) Consumo hídrico, Produtividade e Qualidade de Fruto da Goiabeira Irrigada na Região do Submédio São Francisco. (Tese de Doutorado) – Campina Grande-PB. Universidade Federal da Paraíba, 122 p.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>. Acessado em 20/06/2010.
- OLIVEIRA; A.R. (2005) Levantamento Fitossociológico e Controle de Capim Camalote (*Rottboellia exaltata* L.) na Cultura da Cana-de-Açúcar. (Tese de Doutorado) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 97p.
- PEREIRA, G; CARDOZO, F.S.; MORAES, E. C. PRADO, B. R.; SILVA, G.B.S.; ARAI, E. (2009) Estudo Preliminar do Impacto do Cultivo da Cana-de-açúcar: Alterações no Albedo e Liberação de Energia Radiativa Através das Queimadas. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 325-332.
- REIS JR., R. A.; MONNERAT, P. H. (2002) Diagnóstico Nutricional da Cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p.367-372.
- SILVA, M.R.; RIBEIRO, M.G.; CENTENO, J. A. S. (2007) Monitoramento de estiagens com imagens MODIS. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, SC, Anais... 2007
- SILVA, T.G.F., MOURA, M.S.B, ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. (2011) Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.2, p.139-147.
- SOUZA, P.J.O.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; LOUREIRO, R.S.; BISPO, C.J.; SOUSA, A.M.L. (2010) Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.65–73.
- WANG, S.; DAVIDSON, A. (2007) Impacto of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. 142,133-142.
- WANG, S. (2005) Dynamics of land surface albedo for a boreal forest and its simulation. *Ecology Modelling*. 183, 477-494.

WANG, S.; GRANT, R.F.; VERSEGHY, D.L.; BLACK, T.A. (2001) Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in Class – the Canadian Land surface Scheme. *Ecology Modelling*. 142, 135-154.

CONSUMO HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CONDIÇÕES NÃO IRRIGADAS EM CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ

RESUMO

Um fator significativo que influencia diretamente na produtividade da cana-de-açúcar é a disponibilidade hídrica. Na agricultura, informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos. O objetivo deste trabalho foi obter o consumo hídrico da cana-de-açúcar, em um cultivo não irrigado, a partir da determinação da evapotranspiração de cultura (ET_c) e o coeficiente de cultura (K_c) através da metodologia do balanço de energia utilizando a razão de Bowen (β), em função da disponibilidade hídrica do solo. Para tal, instalou-se uma estação micrometeorológica em uma área de 13 ha, em um cultivo comercial, na Fazenda Partido pertencente ao grupo Feliz Terra Agrícola, sendo o solo da área experimental classificado como Cambissolo Háplico Eutrófico. A ET_c obtida a partir da razão de Bowen foi considerada quando o solo se encontrava dentro do limite de manejo de água no solo e os valores de β foram considerados fisicamente consistentes. Cerca de 62% dos dados avaliados foram classificados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa da evapotranspiração de cultura, utilizando-se a razão de Bowen. A evapotranspiração total de cultura obtida para a cana-de-açúcar foi de 1088,19 mm. Os valores médios do K_c obtidos a partir do método da razão de Bowen foram os seguintes: na fase de estabelecimento 0,79; na de perfilhamento 0,90; na fase de desenvolvimento dos colmos 1,25; e na fase maturação 1,04.

PALAVRAS-CHAVE: evapotranspiração, balanço de água no solo, déficit hídrico.

ABSTRACT

A significant factor that directly influences the productivity of sugar-cane is water availability. In agriculture, quantitative information of evapotranspiration is of great importance in evaluating the severity, distribution and frequency of water deficits. The aim of this study was to obtain the water consumption of sugar-cane in a non-irrigated cultivation, from the determination of crop evapotranspiration (ET_c) and crop coefficient (K_c) using the methodology of using the energy balance ratio Bowen, depending on the soil water availability. To this end, he settled a micrometeorological station in an area of 13 ha, in a cash crop, in the Farm Partido, and the experimental area classified as Cambisol. The ET_c derived from the Bowen ratio was seen when soil was at the limit of water management and the values of β were considered physically consistent. The total evapotranspiration for the crop grown sugar-cane was 1088,19 mm. 62% of the data evaluated were classified as acceptable for use on the evapotranspiration culture, using the Bowen ratio. The average values of K_c obtained from the Bowen ratio method were: the establishment phase 0,79, at tillering 0,90, in the development stage of stem 1,25 and 1,04 in the maturation phase.

KEY-WORDS: evapotranspiration, soil water balance, water deficit.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar está entre as principais culturas produzidas no Brasil. No Estado do Rio de Janeiro, a Região Norte Fluminense, especialmente o município de Campos dos Goytacazes, se destaca como um pólo de produção desta cultura (Reis Júnior e Monnerat, 2002). Um fator significativo que influencia diretamente na produtividade da cana-de-açúcar é a disponibilidade hídrica. Na agricultura, informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e freqüência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (Henrique e Dantas, 2007).

Ao redor do mundo e no Brasil vários pesquisadores (Silva et al., 2011; Zhang et al., 2008; Azevedo et al., 2007; Savage et al., 2009, Oliveira et al., 2009;

Lima et al., 2005, Perez et al., 1999) têm se dedicado ao estudo da contabilização do processo de evapotranspiração a partir do método do balanço de energia. Métodos micrometeorológicos quantificam os fluxos energéticos e permitem avaliar as transformações da energia radiante em calor latente. O conhecimento da demanda atmosférica, para o fluxo de calor latente, fornece subsídios necessários ao planejamento pelo uso racional da água (Farias et al., 2004).

O método do balanço de energia utilizando a razão de Bowen (β) é um método micrometeorológico para a estimativa da evapotranspiração que tem sido amplamente utilizado em uma grande variedade de condições de campo (Zhang et al., 2008), inclusive para estimativa do coeficiente de cultivo (K_c). Conceitualmente, o valor de β representa a relação entre os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), conforme a equação:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (1)$$

Dados relativos à condição de umidade do solo de um determinado local, que traduz sua disponibilidade hídrica às plantas, também podem ser relacionados ao processo evapotranspiratório. No solo, a água ocupa parte dos espaços porosos formados do arranjo físico das partículas da fase sólida, sendo a parte restante ocupada, de forma complementar pela fase gasosa. As propriedades físicas do solo são importantes componentes de sua produtividade, uma vez que influenciam a aeração, a capacidade de armazenamento de água e sua disponibilidade para as plantas (Bognola et al., 2010).

O objetivo deste trabalho foi determinar o consumo hídrico da cana-de-açúcar em condições não irrigadas, utilizando o método do balanço de energia, razão de Bowen, em função da disponibilidade hídrica do solo, para um cultivo em Campos dos Goytacazes, RJ.

MATERIAIS E MÉTODOS

a) Caracterização da área do experimento

O experimento foi conduzido em 13 hectares, em uma área de cana-de-açúcar total de 33 hectares, em cultivo comercial na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, não irrigado, em Campos dos Goytacazes, RJ (coordenadas

geográficas: 21°48'17,1" sul e 41°16'28,8" oeste, referidas ao datum WGS84, altitude local de 9 m).

A variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada em um espaçamento de 1,5 m, estando na ressoça de 3^o corte. Segundo a COPERSUCAR (1995), a variedade utilizada nesse estudo, apresenta uniformidade e alto perfilhamento em condições normais; pouco acamamento; touceiras com hábito levemente decumbente, sendo as folhas arqueadas de largura média com o volume da copa denso; mesmo em solos de média para baixa fertilidade, projeta alta produtividade na média de cinco cortes; é recomendada para colheita do meio para o final de safra, podendo ser classificada como média. As fases fenológicas da cana-de-açúcar consideradas foram: estabelecimento (60 DAC); perfilhamento (dos 61 aos 110 DAC); desenvolvimento dos colmos (entre 111 a 240 DAC) e maturação (241 DAC em diante).

O clima de Campos dos Goytacazes é classificado como Tropical. A temperatura média igual da região é de 23,2 °C, sendo julho o mês mais frio (temperatura média 20,1 °C) e fevereiro o mês mais quente (temperatura média 26 °C), sendo classificado como pertencente ao tipo Aw de Köppen. A umidade relativa do ar é bastante variável dependendo das condições de relevo e ventos. Para o litoral, registram-se valores entre 80 e 82 %, que diminuem à medida que se penetra para o interior do continente. Na região predominam os ventos de norte, nordeste e noroeste oriundos do Atlântico Sul. A média anual de precipitação pluviométrica de Campos dos Goytacazes é de 1.087 mm, sendo o trimestre mais chuvoso os meses de novembro, dezembro e janeiro, com maior frequência em dezembro. Nesta época, é comum a ocorrência de uma seqüência de dias secos, caracterizando o chamado veranico, fator agravante para agricultura sob tecnologia de sequeiro. O inverno é seco, com um período crítico entre os meses de junho a agosto (Embrapa, 2003).

Para a descrição morfológica, classificação e obtenção dos atributos físico-hídricos do solo foram retiradas amostras com estrutura deformada e indeformada do perfil até 1,5m de profundidade, em uma trincheira aberta na área experimental, a cerca de 200 m da estação micrometeorológica. As amostras deformadas foram utilizadas para a determinação da densidade das partículas (D_p) (Tabela 2), da composição granulométrica (areia, silte e argila) (Tabela 1),

conforme metodologias descritas em Embrapa (1997). As amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação da densidade do solo (Ds) e da porosidade total (PT), conforme Embrapa (1997), e da curva de retenção de água, utilizando funis de placa porosa e câmaras de pressão de Richards, conforme Libardi (1995). A partir da curva de retenção foram determinadas a macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) (Tabela 1). Os valores de Mi, CC e PMP foram considerados como correspondentes às umidades sob as tensões de 0,6 e 1,0, 1,5 m de coluna de água, respectivamente. O solo, que apresenta drenagem moderada, ausência de pedregosidade e propriedades vérticas, foi classificado como Cambissolo Háplico Eutrófico (Embrapa, 2006).

Tabela 1. Espessura, composição granulométrica dos horizontes identificados na descrição morfológica do perfil do solo.

Horizonte		Frações granulométricas		
Símbolo	Espessura -- (cm) --	Argila	Silte	Areia
		----- (g kg ⁻¹) -----		
AP	0 - 15	342	306,5	351,9
A2	15 - 35	408	379,5	212,6
Bi1	35 - 70	378,7	436,6	184,7
Bi2	70 - 95	373,0	465,8	161,2
Bi3	95 - 130	496,1	400,5	103,4
C1	130 - 150 ⁺	320,0	360,2	319,9

Tabela 2. Densidade do solo (Ds), densidade das partículas (Dp), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) obtidos para o solo da área experimental.

Camadas	Ds	Dp	PT	Ma	Mi	CC	PMP	AD
	---- Mg m ⁻³ ----			----- m ³ m ⁻³ -----				
AP	1,42	2,58	0,45	0,02	0,43	0,42	0,28	0,14
A2	1,54	2,60	0,41	0,00	0,41	0,41	0,32	0,09
Bi1	1,53	2,70	0,43	0,00	0,43	0,43	0,34	0,09
Bi2	1,34	2,74	0,51	0,02	0,50	0,49	0,35	0,14
Bi3	1,29	2,80	0,54	0,04	0,50	0,49	0,39	0,10
C	1,32	2,80	0,53	0,05	0,48	0,47	0,35	0,11

b) Estação micrometeorológica

Na área do experimento foi instalada, no dia 12 de outubro de 2009, uma estação micrometeorológica contendo os seguintes sensores: 1 saldoradiômetro (NR Lite); 2 piranômetros LI 200 (X-Li-cor); 2 termohigrômetros HMP45C-L,

(Vaissala); 2 anemômetros Met One (RM Young); 3 fluxímetros HFP01SC-L (Hukseflux). Todos os dados foram coletados a cada minuto e armazenados em valores médios a cada 15 minutos por um coletor de dados (datalogger) CR21X, da Campbell Scientific. As hastes horizontais foram dispostas sobre o dossel da cultura a 0,50 m (1ª haste) e a 2,5 m (2ª haste), as quais foram elevadas de acordo com o crescimento da cultura. Junto à estação, foi instalado um pluviômetro registrador da Squitter do Brasil, com 0,25 mm de sensibilidade.

c) Balanço de água no solo

Para obtenção da lamina atual de água no solo utilizaram-se os princípios do balanço hídrico, apresentados na Equação 2:

$$LAA_{atual} = LAA_{anterior} + P - ETR_{anterior} \quad (2)$$

em que: LAA_{atual} é a lamina atual de água no solo, no dia em questão, em mm; $LAA_{anterior}$ é a lamina atual de água no solo, no dia anterior, em mm; P é a precipitação, em mm, e $ETR_{anterior}$ é a evapotranspiração real do dia anterior em $mm\ d^{-1}$, sendo apresentada na Equação 3:

$$ETR = EToKcKs \quad (3)$$

Para a obtenção da ETo foi utilizado o método de Penman-Monteith através da Equação 4:

$$ETo_{PM} = \frac{0,408\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (4)$$

em que: ETo_{PM} é a evapotranspiração potencial, em $mm\ d^{-1}$; Δ é a tangente da curva de pressão de saturação de vapor em função da temperatura do ar em $kPa\ ^\circ C^{-1}$; T é a temperatura média em $^\circ C$; U_2 é a velocidade média diária do vento, em $m\ s^{-1}$; $(es - ea)$ é o déficit de pressão de vapor, em kPa .

Em períodos em que houve perda de dados na estação micrometeorológica a ETo foi obtida pelo método do tanque classe, apresentado na Equação 5.

$$EToTCA = Ev.Kt \quad (5)$$

em que: $EToTCA$ é a evapotranspiração de referência obtida através do método do tanque classe A; EV é a evaporação do tanque classe A, em $mm\ d^{-1}$; Kt é o coeficiente do tanque (adimensional). O valor de Kt utilizado foi 0,69, proposto por Bernardo et al. (1996). Os dados da $EToTCA$ foram corrigidos segundo a

recomendação de Esteves et al. (2010). A evaporação do tanque foi obtida da estação convencional meteorológica, localizada na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Dr. Leonel Miranda, a 1900 m do experimento.

O K_c utilizado foi o tabelado da FAO, cujo valor da fase inicial (0,40) foi corrigido pelo método gráfico da FAO (Allen et al., 1998), em função do intervalo de tempo entre os eventos de chuva e a magnitude da ETo, sendo no valor de 0,8. E os valores do K_c dos estádios intermediário e final foram corrigidos pela Equação 6:

$$K_c = K_{c_{Tabelado}} + [0,04(U_2 - 2) - 0,004(UR_{\min\ima} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (6)$$

em que, K_c = Coeficiente de cultura, K_c tabelado = K_c tabelado para cana-de-açúcar, UR_{\min} = Umidade relativa do ar mínima e h = Altura do dossel vegetativo da cultura.

O valor corrigido para a fase intermediária foi de 1,2 e para a fase final foi de 0,67.

O parâmetro K_s (coeficiente de umidade do solo) foi obtido segundo Bernardo (1995), representado na Equação 7:

$$K_s = \frac{\ln((UA - PMP) + 1)}{\ln((CC - PMP) + 1)} = \frac{\ln(LAA + 1)}{\ln(CRA + 1)} \quad (7)$$

em que: UA é o teor de umidade atual do solo, em mm; LAA é a lâmina atual de água no solo, em mm; CRA é a capacidade real de água no solo, em mm.

Nos cálculos, todas as vezes que a lâmina atual de água no solo apresentou valores acima do limite superior de água no solo (capacidade de campo) a lâmina excedente foi computada como escoamento total.

Após o corte da cana-de-açúcar, foi aplicada a lâmina de 90 mm de vinhoto, diluído a 2% de potássio, deixando o solo com umidade elevada. Por conta deste fato, assumiu-se que o solo estava na capacidade de campo no início do período do experimento. Após o período inicial não houve outros eventos de irrigação, sendo o cultivo conduzido em sequeiro. O limite de manejo de água no solo foi estabelecido de acordo com a profundidade efetiva das raízes, que nos primeiros 90 dias, encontra-se distribuído nos primeiros 30 cm do solo (Casagrande, 1991). Após este período inicial a profundidade efetiva considerada foi de 50 cm.

d) Determinação da ETc através do método do Balanço de energia e critérios de exclusão de dados

O fluxo de calor latente (LE) pelo método do balanço de energia, foi determinado a partir da Equação 8:

$$LE = \frac{(Rn - G)}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

onde: LE é o fluxo de calor latente em MJ m⁻²d⁻¹; Rn é o saldo de radiação em MJ m⁻²d⁻¹; e G é o fluxo de calor do solo, em MJ m⁻²d⁻¹. Para se obter β foi utilizada a Equação 9:

$$\beta = \gamma \frac{(\Delta T)}{(\Delta e)} \quad (9)$$

em que γ é um parâmetro psicrométrico, e ΔT e Δe são, respectivamente, as diferenças da temperatura do ar (°C) e da pressão de vapor (kPa). O valor de γ foi obtido pela Equação 10:

$$\gamma = CpP / 0,622L \quad (10)$$

onde: Cp é o calor específico do ar à pressão constante; P é a pressão atmosférica média local; e L é o calor latente de vaporização da água, atribuí-se o valor de 2,45 MJ kg⁻¹.

A pressão de vapor do ar (ea em kPa) foi obtida pela Equação 11:

$$ea = \frac{UR}{100} es \quad (11)$$

em que: UR é a umidade relativa do ar; es é a pressão de vapor de saturação na temperatura do ar (em kPa), descrita pela Equação 12:

$$es = 6,1078 \left[10^{\left(\frac{7,5T}{237,3T} \right)} \right] \quad (12)$$

A partir dos critérios propostos por Perez et al. (1999) os dados inconsistentes de β foram excluídos. Na Tabela 3 está apresentado o resumo de classes de erros gerados pelo método do balanço de energia razão de Bowen.

Tabela 3. Resumo das classes de erros gerados pelo método do balanço de energia razão de Bowen (PEREZ et al., 1999).

Classes de erro	Condição
A	$(Rn-G) > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
B	$(Rn-G) > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 - \epsilon $
C	$(Rn-G) < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 - \epsilon $
D	$(Rn-G) < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
E	Mudanças rápidas na Temperatura e pressão de vapor

De forma adicional foi utilizado o critério de Ortega-Farias et al. (1996), em que desconsiderou-se os valores de $\beta < -0,75$.

Assumiu-se a evapotranspiração da cultura (ET_c) igual ao fluxo de calor latente (Equação 13).

$$ET_c = \frac{LE}{\lambda} \quad (13)$$

em que: ET_c é a evapotranspiração de cultura; LE é o fluxo de calor latente; e λ é o calor latente de vaporização da água.

O K_c pelo método da razão de Bowen foi obtido pela Equação 14.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (14)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

a) Características de solo e condições meteorológicas do período

O solo analisado tem grande capacidade de reter água, apresentando também baixa porosidade total e predomínio de microporosidade, indicando adensamento das primeiras camadas, até 0,70 m (Tabela 1). Os cambissolos são solos cujas condições desfavoráveis, tanto físicas quanto mineralógicas, influenciam no adensamento natural, nas características morfológicas, na restrição à infiltração de água e lixiviação ao longo do perfil (Pereira et al., 2010). Por outro lado, Bognola et al. (2010) afirmam que um solo com dominância de microporosidade tem mais poros saturados, facilitando os fluxos de massa e difusão dos nutrientes, mas com menor circulação do ar e com oxigenação deficiente. Silva et al. (2005), comparando efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas em Argissolo, afirmaram que os sistemas de

manejo com cana-de-açúcar influenciaram as propriedades físicas do solo, resultando em aumento da densidade com conseqüente redução do volume de macroporos e aumento dos microporos, em relação a um solo da mata nativa da sua região.

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios diários da temperatura, da velocidade do vento, da umidade relativa e da radiação solar para cada estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar, obtidos na área experimental, com os dados provenientes da estação micrometeorológica.

Tabela 3. Valores médios diários da temperatura (T em °C), velocidade do vento (Vv em m s⁻¹), umidade relativa (UR em %) e radiação solar (Rs em W m⁻²) para cada estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar, na área experimental.

Fases	T	VV	UR	RS
Estabelecimento	24,96	3,14	81,40	190,68
Perfilhamento	26,35	2,27	78,10	215,47
Desenvolvimento vegetativo	26,60	2,18	75,42	239,93
Maturação	20,98	1,55	79,82	125,08

Observa-se na Tabela 3 que as maiores médias de temperatura e radiação solar foram obtidas no estágio de desenvolvimento vegetativo da cultura e que UR% média, de maneira geral, esteve acima de 75% em todas as fases da cana-de-açúcar. A maior média da velocidade do vento foi obtida na fase de estabelecimento. A temperatura, a velocidade do vento, a radiação e a umidade relativa são elementos meteorológicos importantes que condicionam a evapotranspiração (Pereira et al., 2002).

b) Evapotranspiração e consumo hídrico

Na Figura 1 estão apresentadas a evolução das chuvas e a variação do balanço hídrico na camada dos primeiros 50 cm, durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Percebe-se que a chuva máxima ocorrida foi de 58,00 mm, na fase de estabelecimento da cultura, mantendo o Ks elevado, neste período. Pode-se observar que dos 110 aos 165 DAC, na fase de desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, não ocorreram precipitações resultando em valores próximos de zero em relação à disponibilidade hídrica do solo.

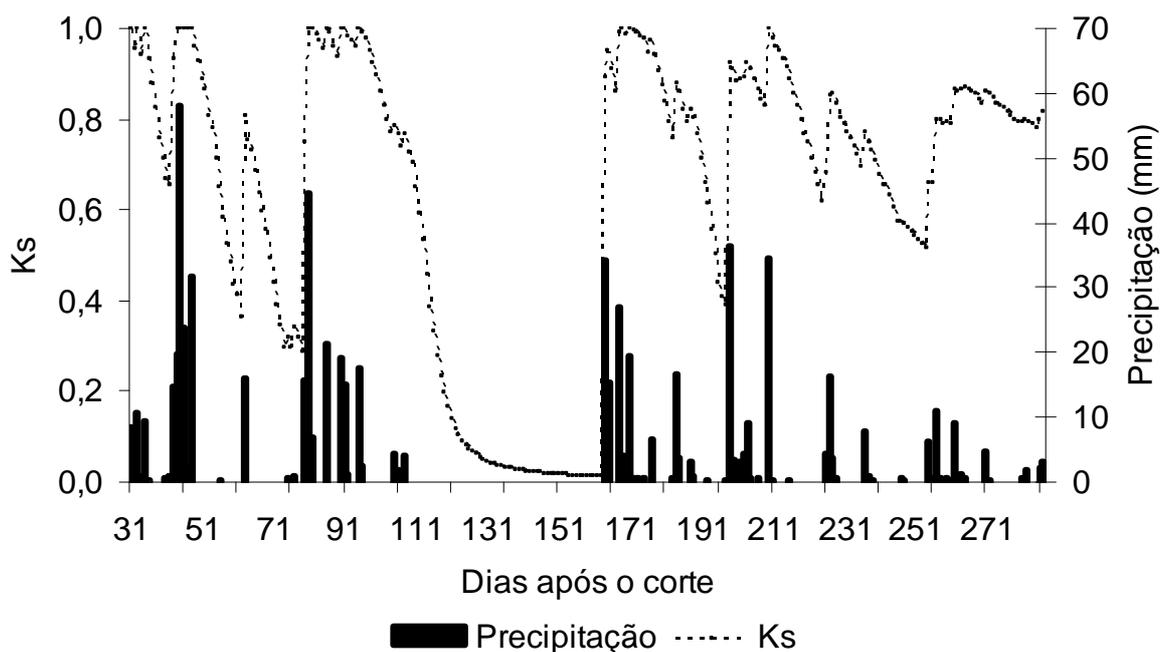


Figura 1. Precipitação e variação do Ks na área experimental ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar (outubro de 2009 até junho de 2010), variedade SP81-3250, Campos dos Goytacazes, RJ.

A produtividade de culturas em sistema não irrigado depende, inevitavelmente, da quantidade, da distribuição e da intensidade das chuvas (Silva et al., 2009). Percebe-se que o suprimento hídrico, de uma forma geral, ficou abaixo do desejável para a cultura da cana-de-açúcar, sendo o valor total da chuva de 664,25 mm. Almeida et al. (2008) citam que uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções, sem utilização da irrigação. A evapotranspiração potencial total foi de 1013,63 mm e a evapotranspiração de cultura total, obtida através do Kc tabelado corrigido FAO 56, foi de 1088,19 mm. A evapotranspiração potencial média diária foi de 3,95 mm d⁻¹. Observa-se que a produtividade média obtida na área acompanhada foi de 81 Mg ha⁻¹. Esta produtividade foi próxima à encontrada por Benvenuti (2005), estudando a mesma variedade em São Paulo, que sofreu restrição hídrica apenas durante a fase de maturação da cultura.

A obtenção de resultados satisfatórios com a razão de Bowen requer gradientes de temperatura e, principalmente, de vapor de água. Tais condições, normalmente, são obtidas em áreas úmidas sob ventos com velocidades maiores do que 2,0 m s⁻¹. Nesta situação o β tende a se aproximar de zero. Como comentado por Perez et al. (1999), sob baixos gradientes de vapor de água,

originários de baixa velocidade do vento ou de déficit hídrico no solo, a razão de Bowen tende a valores elevados inviabilizando a metodologia. Segundo Silva et al. (2005), a estimativa da evapotranspiração, obtida pela razão de Bowen, pode ser influenciada também pela ausência de gradiente de temperatura e umidade em períodos chuvosos. Segundo Savage et al. (2009), o principal causador de erro total em LE é o erro na medição do gradiente de pressão de vapor de água. O erro nessa medição pode ser devido à sensibilidade dos instrumentos. Levando-se em consideração todos estes aspectos, observou-se que 62% dos dias analisados durante o ciclo da cana-de-açúcar obtiveram o β consistente fisicamente. Estes resultados ficaram próximos aos encontrados por Silva et al. (2011), que estudando a razão de Bowen em uma área canavieira do semi-árido nordestino obtiveram 62,7% dos dados considerados consistentes. Silva et al. (2007) concluíram que a utilização dos critérios de análise e exclusão de intervalos em que o método da razão de Bowen falha, melhora a qualidade dos dados, permitindo verificar diferenciação na evapotranspiração da cultura nos períodos de análise.

A determinação do K_c da cana-de-açúcar, utilizando-se a razão de Bowen, foi realizada para os dias em que o solo se encontrava dentro do limite de manejo da água no solo, representando os períodos em que a cultura não estava sofrendo estresse hídrico, e em que o β foi considerado consistente. Na Figura 2 está apresentado o balanço de água no solo da área experimental.

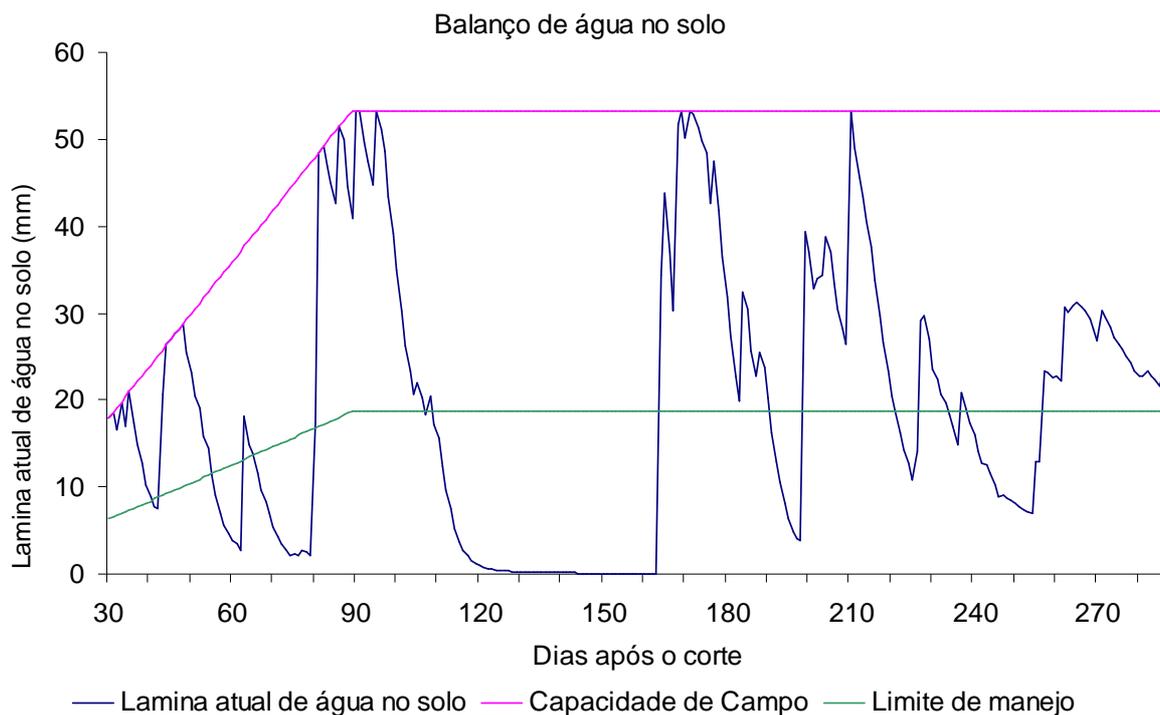


Figura 2. Evolução da lâmina de água no solo durante o período experimental em um cultivo de cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ, de outubro de 2009 até junho de 2010 (I – estabelecimento; II – perfilhamento; III – desenvolvimento dos colmos e IV - maturação).

Observa-se que nas fases de estabelecimento e perfilhamento foram encontrados 36 dias em que o solo estava na capacidade de campo; na fase de desenvolvimento dos colmos foram 23 dias; e durante a fase de maturação não se observou nenhum dia na condição da capacidade de campo. Na Figura 3 está apresentada a evolução do K_c tabelado corrigido FAO 56 e os valores do K_c obtidos pelo método da razão de Bowen.

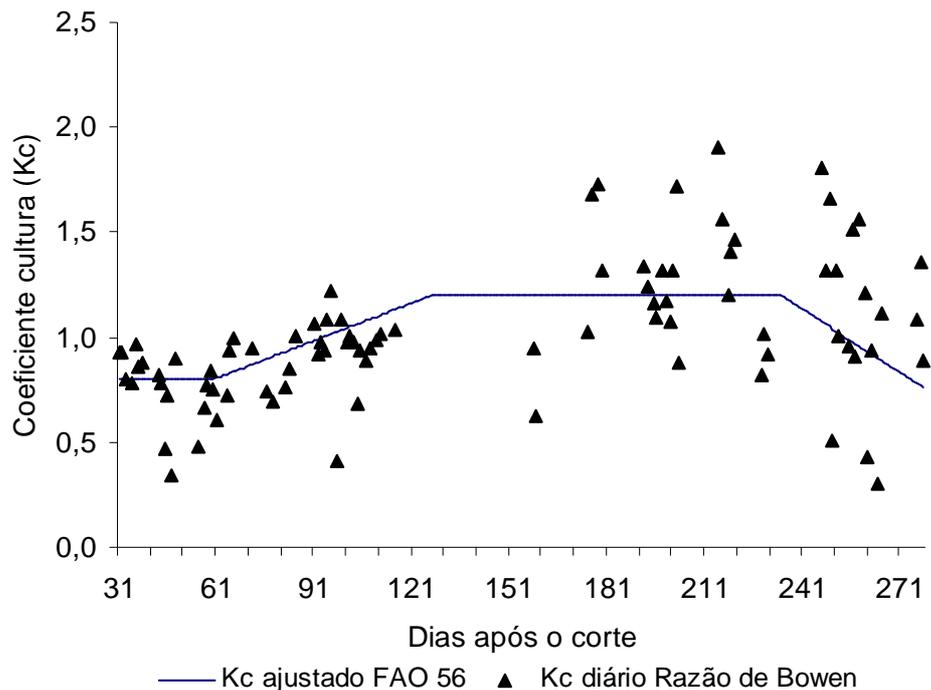


Figura 3. Evolução do coeficiente cultural da cana-de-açúcar (SP81-3250) durante o ciclo produtivo (outubro de 2009 até junho de 2010).

Para as fases de estabelecimento e de perfilhamento os Kcs médios obtidos pela razão de Bowen foram, respectivamente de 0,79 e 0,90. Na fase de desenvolvimento dos colmos houve um período de 55 dias sem precipitação, como já mencionado. Neste período o solo esteve abaixo do limite de manejo, refletindo a lacuna observada na Figura 3. Em relação ao Kc obtido pelo método do balanço de energia observou-se o valor médio de 1,25, para os dias em que foi possível se obter o LE. Para o período de maturação o valor médio foi de 1,04. Toledo Filho (1988), trabalhando com a cana-planta e a cana-soca determinou o Kc para Alagoas, região com clima semelhante ao da área de estudo, obtendo os valores de 0,25, 1,65 e 1,18, para a fase inicial, desenvolvimento vegetativo e maturação, respectivamente. Observa-se que o Kc tabelado corrigido FAO 56 para a fase de estabelecimento foi de 0,8; o valor médio interpolado para a fase de perfilhamento foi de 0,96; para a fase de desenvolvimento dos colmos o valor obtido foi de 1,20; e para a fase de maturação o valor interpolado médio foi de 0,93, sendo valores próximos aos obtidos pela metodologia do balanço de energia, pela razão de Bowen.

CONCLUSÕES

A evapotranspiração total da cultura obtida para a cana-de-açúcar foi de 1088,19 mm.

Cerca de 62% dos dados avaliados foram classificados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa da evapotranspiração de cultura, utilizando-se a razão de Bowen.

Os valores médios do Kc obtidos a partir do método da razão de Bowen foram os seguintes: na fase estabelecimento de 0,79; na de perfilhamento 0,90; na fase de desenvolvimento dos colmos 1,25; e na fase maturação 1,04.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Rome: FAO. 301p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALMEIDA, C.S.A.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I. BARBOSA, G.V.S.; FILHO, G.M.; JUNIOR, R.A.F. (2008) Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência agrotecnica*, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448.
- AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; SILVA, V. DE P.R. (2007) Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.88, n.1-3, p.201-208.
- BERNARDO, S. (1995) Manual de irrigação. 6ª ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 657p.
- BENVENUTI, F.A. (2005) Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos. (Dissertação de mestrado) – Campinas, SP. Universidade Estadual de Campinas, 103 p.
- BOGNOLA, I.A.; DEDECEK, R.A.; LAVORANTI, O.J.; HIGA, A. R. (2010) Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49.
- CASAGRANDE, A.A. (1991). Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar. Jaboticabal, FUNEP. 157p.
- COPERSUCAR. (1995) Quinta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar. Boletim Técnico, Edição Especial, Piracicaba.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (2006) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - Solos. (2003) Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Angra-PESAGRO-Rio: estação experimental de Campos / Enio Fraga da Silva... [et al.] – Rio de Janeiro. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 38), 93 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. (1997) Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p.
- ESTEVES, B.S.; MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S. (2010) Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Campos dos Goytacazes, RJ. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v.14, n.3, p.274–278.
- FARIAS, S.E.M.; MEIRELLES, M.L.; FRANCO, A.C.; NOGUEIRA, J.L.M.; GUERRA, A.F.; MANZI, A.O. (2004) Balanço de Energia em Cultivo de Milho no Cerrado. Revista Brasileira Agrometeorologia, v. 12, n. 2, p. 227-233.
- HENRIQUE, F. A. N. e DANTAS R.T. (2007) Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.6, p.594–599.
- LIBARDI, P.L. (1995) Dinâmica da água no solo. Piracicaba – ESALQ/ESALQ. 497 p.
- LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A.; BORGES, E.; SILVA, I.F.; LIRA, C.A.B.O. (2005) Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.4, p.527-534.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. (2001) Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.1, p.33-41.
- OLIVEIRA, I.A.; LIMA, J.R.S.; SILVA, I.F.; ANTONINO, A.C.D.; NETO, G.C.G.; LIRA, C.A.B.O. (2009) Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. Revista Brasileira de Ciências Agrárias v.4, n.2, p.185-191.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. (1996) Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. Agricultural and Forest Meteorology, v. 81, p. 131-143.

- PEREIRA, T.T.C.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; ALMEIDA, C.C. (2010) Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1283-1295.
- PEREIRA A.R. ; ANGELOCCI L.R. ; SENTELHAS P.C. (2002) *Agrometeorologia : fundamentos e aplicações*. Editora Agropecuária; Guaíba. RS. 472 p.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. (1999) Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.97, p.141-150.
- REIS JÚNIOR, R. A. e MONNERAT, P. H. (2002) Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 26: 367-372.
- SAVAGE, M.J.; EVERSON, C.S.; METELERKAMP, B.R. (2009) Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. *Journal of Hydrology* 376, 249–260.
- SILVA, T.G.F., MOURA, M.S.B, ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. (2011) Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.2, p.139–147.
- SILVA, L.L.; COSTA, R.F.; CAMPOS, J.H.B.C.; DANTAS, R.T. (2009) Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.454–461.
- SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C.R.; ALVES JÚNIOR, J.; BONFIM-SILVA, E. M. (2007) Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.392-403.
- SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A. (2005) Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.3, p.705-712.
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; LIMA, J.F.W.F. (2005b) Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.1, p.833-842.
- TOLEDO FILHO, M.R. Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas. (1988) *Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba*. 72p.

ZHANG, B.; KANG,S;; LI, F.; ZHANG, L. (2008) Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1629-1640.

4. RESUMO DAS CONCLUSÕES

A cana-de-açúcar é uma cultura muito importante para o Brasil, sendo de interesse o conhecimento de suas relações e os seus impactos com o ambiente onde está inserida. O manejo adequado da cana-de-açúcar implica em conhecer os padrões de crescimento de cada variedade, fazendo com que as fases de máximo desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, permitindo que a cultura expresse todo seu potencial genético (Keating et al., 1999). Estudos micrometeorológicos são importantes neste sentido.

O albedo é um parâmetro muito importante no balanço de radiação de uma superfície e bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos, tais como estimativas do fluxo de vapor d'água e do saldo de radiação, dentre outros; entretanto, este parâmetro nem sempre está disponível, visto que sua medida não é efetuada de forma rotineira, como ocorre com muitos outros parâmetros meteorológicos (Leitão, et al. 2002).

Dados relativos à condição de umidade do solo de um determinado local, que traduz sua disponibilidade hídrica às plantas, também podem ser relacionados ao processo evapotranspiratório.

Desta forma, os objetivos deste trabalho foram estabelecer o balanço de energia sobre a cultura da cana-de-açúcar, acompanhar as variações do albedo, do NDVI e do SAVI, da produção de biomassa e o consumo hídrico em Campos dos Goytacazes, RJ.

O experimento foi conduzido em área de 13 hectares, de um total de 33 hectares, em cultivo comercial de cana-de-açúcar na Fazenda Partido, da empresa Feliz Terra Agrícola, não irrigado, em Campos dos Goytacazes, RJ (coordenadas geográficas: 21°48'17,1" sul e 41°16'28, 8" oeste, referidas ao *datum* WGS84, altitude local de 9 m).

A variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a SP81-3250, plantada em um espaçamento de 1,5 m, estando na ressoca de 3^o corte. Segundo a COPERSUCAR (1995), a variedade utilizada nesse estudo, apresenta uniformidade e alto perfilhamento em condições normais; pouco acamamento; touceiras com hábito levemente decumbente, sendo as folhas arqueadas de largura média com o volume da copa denso; mesmo em solos de média para baixa fertilidade, projeta alta produtividade na média de cinco cortes; é recomendada para colheita do meio para o final de safra, podendo ser classificada como média.

Em função dos resultados obtidos pode-se concluir, em relação ao balanço de energia que:

- As variações de disponibilidade hídrica influenciaram diretamente nas taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia;
- As taxas de crescimento decresceram durante um período de baixa disponibilidade hídrica. No entanto, a matéria seca da cultura manteve-se crescente em todas as avaliações;
- A maior parte da energia disponível (R_n) durante todo o ciclo da cana-de-açúcar foi consumida pelo fluxo de calor latente (LE), sendo a porcentagem média de 53%;
- As variações do albedo foram afetadas pelas condições hídricas do período;

Para as variações do albedo, NDVI e SAVI conclui-se que:

- O valor médio do albedo para todo o ciclo da cultura da cana-de-açúcar foi de 0,26;
- De uma forma geral o albedo acompanhou as variações do IAF;
- O NDVI e o SAVI foram influenciados pelas condições hídricas do período, mas de forma geral acompanharam as variações do albedo e do IAF.

Em relação à determinação do consumo hídrico da cultura da cana-de-açúcar durante o período experimental, pode-se concluir que:

- A evapotranspiração total de cultura obtida para a cana-de-açúcar foi de 1088,19 mm;

- 62% dos dados avaliados foram classificados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa da evapotranspiração de cultura, utilizando-se a razão de Bowen;
- Os valores médios do K_c obtidos a partir do método da razão de Bowen foram os seguintes: na fase estabelecimento de 0,79; na de perfilhamento 0,90; na fase de desenvolvimento dos colmos 1,25; e na fase maturação 1,04.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABDELHADI, A.W.; HATA, T.; TANAKAMARU, H.; TADA, A.; TARIQ, M.A. (2000) Estimation of crop water requirements in arid region using Penman-Monteith equation with derived crop coefficients: a case study on Acala cotton in Sudan Gezira irrigated scheme. *Agricultural Water Management* 45, 203-214.
- AGUIAR, D. A. (2007) Monitoramento da Área Colhida de Cana-de-Açúcar por Meio de Imagens do Sensor MODIS. Dissertação - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 103 p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Rome: FAO. 301p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGTH, J.L., BURMAN, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*. n.81: 650-662.
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, J.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. (2008) Desenvolvimento Vegetativo e Produção de Variedades de Cana-de-Açúcar em Relação à Disponibilidade Hídrica e Unidades Térmicas. *Ciência agrotécnica, Lavras*, v. 32, n. 5, p. 1441-1448.
- ANDRÉ, R.G.B; MENDONÇA, J.C.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, V. S. MARQUES, J. (2010) Aspectos Energéticos do Desenvolvimento da cana-de-açúcar Parte 1: Balanço de radiação e Parâmetros Derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.3, p.375-382.
- ANDRÉ, R.G.B; MENDONÇA, J.C.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, V. S. MARQUES, J. (2010) Aspectos Energéticos do Desenvolvimento da cana-de-açúcar Parte 2: Balanço de energia e Parâmetros Derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.4, 535 – 542.
- ALVES, A. V. (1997) Balanços de radiação e de energia em um cultivo de melão. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB. 95p. (Dissertação de Mestrado).

- AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; SILVA, V. DE P.R. (2007) Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.88, n.1-3, p.201-208.
- BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, Oxford, v. 9, p. 479-492, 2003.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., Mossoró, Anais. Mossoró, p. 192-7, 1979.
- BENINCASA, M.M.P. Análise do crescimento de plantas. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42p
- BERNARDO, S. (1995) Manual de irrigação. 6ª ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 657p.
- BENVENUTI, F.A. (2005) Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos. (Dissertação de mestrado) – Campinas, SP. Universidade Estadual de Campinas, 103 p.
- BOGNOLA, I.A.; DEDECEK, R.A.; LAVORANTI, O.J.; HIGA, A. R. (2010) Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49.
- BORGES, C.J.R.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R.; CAMPOS, J.H.B.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; SILVA, B.B. (2008) Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.393–399.
- CASAGRANDE, A.A. (1991). Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar. Jaboticabal, FUNEP. 157p.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Safras. Capturado em 30 de agosto de 2010. On line. Disponível em http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1cana_de_acucar.pdf.
- COPERSUCAR. (1995) Quinta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar. Boletim Técnico, Edição Especial, Piracicaba.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. (1994) Balanço de Energia em Alfafa. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 2, p.9-16.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A H. (1979) Efectos del Agua Solbre el Rendimiento de los Cultivos. Roma: FAO, 212p. (FAO. Irrigation e Drainage, 33).

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (2006) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - Solos. (2003) Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Angra-PESAGRO-Rio: estação experimental de Campos / Enio Fraga da Silva... [et al.] – Rio de Janeiro. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 38), 93 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. (1997) Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p.
- ESTEVES, B.S.; MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S. (2010) Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Campos dos Goytacazes, RJ. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, v.14, n.3, p.274–278.
- EVANS, G.C. The quantitative analysis of plant growth. Londres: Blackweel Sci. Public., p. 734, 1972.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; NETO, J.D. (2008) Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.4, p.356–362.
- FARIAS, S.E.M.; MEIRELLES, M.L.; FRANCO, A.C.; NOGUEIRA, J.L.M.; GUERRA, A.F.; MANZI, A.O. (2004) Balanço de Energia em Cultivo de Milho no Cerrado. Revista Brasileira Agrometeorologia, v. 12, n. 2, p. 227-233.
- FONSECA, E. L. (2004) Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos. Tese – Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos-SP.
- FORTES, C. (2003) Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat7. Dissertação -Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba-SP, 131p.
- HAYASHI, M. M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J.S.; VOURLITIS, G. L. (2002) Balanço de Energia da *Crotalaria juncea* L. no Período Seco e no Período Úmido do ano, em Condições de Cerrado. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 197-205.
- HENRIQUE, F. A. N. e DANTAS R.T. (2007) Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental, v.11, n.6, p.594–599.

- HUETE, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p. 295-309.
- JI, L.; PETERS, A.J. (2007) Performance Evaluation of Spectral Vegetation Índices Using a Statistical Sensitivity Function. *Remote Sensing of Environment*, 106:59-65.
- KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. (1999) Modelling Sugarcane Production Systems I: Development and Performance of the Sugarcane Module. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 48, p. 27-36.
- JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. (1991) Interpreting Vegetation Índices. *Preventive Veterinary Medicine*, v.11, n. 3-4, p.185-200.
- LEITÃO, M.M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M.O. (2000) Influência da irrigação sobre o albedo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.2, p.214-218.
- LEITÃO, M.M.V.B.R.; SANTOS, J.M.; OLIVEIRA, G.M.O. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta Amazônica. (2002) *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.256-261.
- LEME, E.J.A.; MANIEIRO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. (1984) Estimativa da Área Foliar da Cana-de-açúcar e sua Relação com a Produtividade. *Cadernos PLANALSUCAR*, n.2, p.3-9.
- LIBARDI, P.L. (1995) Dinâmica da água no solo. Piracicaba – ESALQ. 497 p.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. (2001) Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.33-41.
- LIMA, J.R. DE S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W. DE A.; BORGES, E.; SILVA, I. F.; LIRA, C.A.B. DE O. (2005) Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p. 527-534.
- LIMA, P.C.S.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; AZEVEDO, P.V.; OLIVEIRA, G.M.; SOBRINHO, J.E.; MOURA, M.S.B.; MENEZES, H.E.A.; PINTO, M.G.C.L. (2009) Albedo de pastagem e caatinga. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Belo Horizonte, MG, Anais...2009.
- LUCAS, A. A. ; SCHULER, C. A. B. (2007) Análise do NDVI/NOAA em Cana-de-açúcar e Mata Atlântica no Litoral Norte de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.6, p.607–614.

- MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. I.; ARRUDA, H. V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, set. 1982.
- MAGALHÃES, A. C. N. (1987) Ecofisiologia da Cana-de-açúcar: Aspectos do Metabolismo do Carbono na Planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Coordenador) Ecofisiologia da Produção. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo, p. 113-118.
- MAGALHÃES, A.C.N. (1979) Análise Quantitativa do Crescimento. In: FERRI, M.G. Fisiologia Vegetal. EPU/EDUSP, São Paulo. v. 1, p. 331-350.
- MELLO, M.P.; VIEIRA, C.A.O.; AGUIAR, A.D.; RUDORFF, B.F.T. (2009) Classificação da Colheita da Cana-de-açúcar por Meio de Imagens de Satélite Utilizando Superfícies de Resposta Espectro-temporais. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 279-286.
- MONTEITH, J.L. (1981) Evaporation and surface temperature. Q.J. Royal Meteorological Society, London. v.107, p. 1-27.
- MONTEITH, J.L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, v. 9, p. 747-766.
- MOURA, M.S.B. (2005) Consumo hídrico, Produtividade e Qualidade de Fruto da Goiabeira Irrigada na Região do Submédio São Francisco. (Tese de Doutorado) – Campina Grande-PB. Universidade Federal da Paraíba, 122 p.
- OLIVEIRA; A.R. (2005) Levantamento Fitossociológico e Controle de Capim Camalote (*Rottboellia exaltata* L.) na Cultura da Cana-de-Açúcar. (Tese de Doutorado) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 97p.
- OLIVEIRA, I.A.; LIMA, J.R.S.; SILVA, I.F.; ANTONINO, A.C.D.; NETO, G.C.G.; LIRA, C.A.B.O. (2009) Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. Revista Brasileira de Ciências Agrárias v.4, n.2, p.185-191.
- OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. (2007) Área Foliar em Três Cultivares de Cana-de-açúcar e sua Correlação com a Produção de Biomassa. Pesq Agropecuária Tropical 37(2): 71-76.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. (1996) Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. Agricultural and Forest Meteorology, v. 81, p. 131-143.

- ORTEGA-FARIAS, S. O.; OLIOSO, A.; FUENTES, S.; VALDES, H. (2006) Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman–Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Agricultural Water Management*. 82, 421–432.
- PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N. A. ALFARO, A.T. (2009) Necessidades hídricas de citros e macieiras a partir da área foliar e da energia solar. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal - SP, v. 31, n. 3, p. 671-679.
- PEREIRA A. R. ; ANGELOCCI L. R. ; SENTELHAS P. C. (2002) *Agrometeorologia : fundamentos e aplicações*. Editora Agropecuária; Guaíba. RS. 472 p.
- PEREIRA, G; CARDOZO, F. S.; MORAES, E. C. PRADO, B. R.; SILVA, G.B.S.; ARAI, E. (2009) Estudo Preliminar do Impacto do Cultivo da Cana-de-açúcar: Alterações no Albedo e Liberação de Energia Radiativa Através das Queimadas. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 325-332.
- PEREIRA, G; CARDOZO, F. S.; MORAES, E. C. PRADO, B. R.; SILVA, G.B.S.; ARAI, E. (2009) Estudo Preliminar do Impacto do Cultivo da Cana-de-açúcar: Alterações no Albedo e Liberação de Energia Radiativa Através das Queimadas. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 325-332.
- PEREIRA, T. T. C.; KER, J.C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; ALMEIDA, C.C. (2010) Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:1283-1295.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. (1999) Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.97, n.3, p.141-150.
- PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. (2005) Análise Temporal de Índices de Vegetação como Subsídio à Previsão de Safra de Cana-de-açúcar. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiana. INPE. p.217-224.
- RODRIGUES, H.J.B. (2006) Balanço de radiação, energia e fluxo de CO₂ em ecossistema de manguezal na Amazônia. (Tese de doutorado) – Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 202 p.
- REIS JÚNIOR, R. A. e MONNERAT, P. H. (2002) Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 26: 367-372.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., VERMA, S.B. (1983) *Microclimate: The Biological Environment*. Wiley, New York, 495 p.

- SAN JOSÉ, J.J.; BRACHO, R.; MONTES, R.; NIKONOVA, N. (2003) Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walp) cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.116, n.3-4, p.197-219.
- SAVAGE, M.J.; EVERSON, C.S.; METELERKAMP, B.R. (2009) Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. *Journal of Hydrology* 376, 249–260.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. (2005b) Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.1, p.833-842.
- SILVA, L.C.; BELTRÃO, N. E. M.; AMORIM NETO, M. (2000) Análise de crescimento de comunidades vegetais. Campina Grande: Embrapa CNPA, 46p. Circular Técnica, 34.
- SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A. (2005) Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.3, p.705-712.
- SILVA, L.L.; COSTA, R.F.; CAMPOS, J.H.B.C.; DANTAS, R.T. (2009) Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.454-461.
- SILVA, M. R.; RIBEIRO, M. G.; CENTENO, J. A. S. (2007) Monitoramento de estiagens com imagens MODIS. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, SC, Anais... 2007.
- SILVA, T.G.F., MOURA, M.S.B, ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. (2011) Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.2, p.139–147.
- SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C.R.; ALVES JÚNIOR, J.; BONFIM-SILVA, E. M. (2007) Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.392-403.
- SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R. (2008) Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.400-407.
- SOUZA, P.J.O.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; LOUREIRO, R.S.; BISPO, C.J.; SOUSA, A.M.L. (2010) Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.65–73.

- SOUZA, P. M. Apostila de Política e desenvolvimento agrícola. 2005.
- SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FARIA, V. G. C. (2009) Avaliação de Três Métodos de Estimativa de Índice de Área Foliar Aplicados à Cana-de-açúcar. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, p. 499-506.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. (2002) Plant physiology. 3.ed. Sunderland: Sinauer Associates, 798p.
- TEIXEIRA, A.H.C. (2001) Avaliação dos Componentes do Balanço de Energia Durante o Primeiro Ano de Cultura da Banana. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.1, p.28-32.
- TODD, R.W.; EVETT, S.R; HOWELL, T.A. (2000) The Bowen Ratio-energy Balance Method for Estimating Latent Heat Flux of Irrigated Alfafa Evaluated in a Semi-arid, Advective Environment. Agricultural and Forest Meteorology, v.103, p. 335-348.
- TOLEDO FILHO, M. R.; BERLATO, M. A.; LYRA, R. F. F. (2003) Parâmetros Aerodinâmicos Associados a Cultivo de Cana-de-açúcar no Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Meteorologia, v.18, n.2, p. 207-212.
- TOLEDO FILHO, M.R. Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas. (2001) Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 168p.
- TOLEDO FILHO, M.R. Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas. (1988) Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 72p.
- TOWNSEND, C. R. (2000) Recomendações Técnicas para o Cultivo da Cana-de-açúcar Forrageira em Rondônia. EMBRAPA-CPAF, Rondônia, n.21, p.5.
- UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO (UNICA). 2009.
- VILLA NOVA, N.A.; MIRANDA, J.H.; PEREIRA, A.B.; SILVA, K.O. Estimation of the potential evapotranspiration by a simplified Penman Method. (2006) Engenharia Agrícola, v.26, n.3, p.713-721.
- VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.R.; PEDRO JUNIOR, M.J. (1975) Balanço de Energia Numa Cultura de Arroz em Condições de Sequeiro. Bragantia, v. 34, n.9, p.171-176.
- WANG, S. (2005) Dynamics of land surface albedo for a boreal forest and its simulation. Ecology Modelling. 183, 477-494.

- WANG, S.; DAVIDSON, A. (2007) Impacto of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. 142, 133-142.
- WANG, S.; GRANT, R.F.; VERSEGHY, D.L.; BLACK, T.A. (2001) Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS – the Canadian Land surface Scheme. *Ecology Modelling*. 142, 135-154.
- XÁVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C.; FREITAS, C. C. (1998) Estimativa de IAF de Plantações de Eucaliptos a Partir de Dados TM / LANDSAT. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. (2008) Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1629-1640.