Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

BALANÇO DE RADIAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS, BRASIL

Radiation balance for sugarcane in the coastal plains of Alagoas state, Brazil

Balance de radiación de la caña de azúcar en la región de los tableros costeros de la costa de Alagoas, Brasil

José Marcelo Lopes Júnior
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
josemarcelolopesjunior@hotmail.com

Carlos Alexandre Santos Querino
Universidade Federal do Amazonas
carlosquerino@ufam.edu.br

Antônio Marcos Delfino de Andrade
Universidade Federal de Campina Grande
marcoslaba@hotmail.com

Rayonil Gomes Carneiro
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
rayonilcarneiro@gmail.com

Marcos Antônio Lima Moura
Universidade Federal de Alagoas
malm@ccen.ufal.br

Resumo: O Balanço de radiação é importante para determinar as trocas de energia que ocorrem no sistema Terra-Atmosfera. O presente estudo tem por objetivo estudar a dinâmica do comportamento dos componentes do balanço de radiação sobre um sistema vegetativo de cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Alagoas, no município de Rio Largo (09°28'03'' S, 35°49'49'' W), Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, em uma área de cultivo de cana-de-açúcar. A

radiação solar incidente (Rg), refletida pela superfície (Rr), radiação de onda longa incidente (Ra), onda longa emitida pela superfície (Rs) e balanço de radiação (Rn) foram medidos pelo saldo radiômetro modelo CNR1 da Kipp e Zonen (Delft, Holanda) no período de novembro/2017 a setembro/2018. A variação horária e decendial de cada elemento do balanço de radiação foi avaliada. Os fluxos radiativos dos balanços de ondas curtas e longas variaram substancialmente com a dinâmica das nuvens/precipitação, sazonalidade, índice de cobertura do solo (tamanho da cultura). A Rs foi decrescente do início ao termino do período experimental, enquanto a Rr se manteve constante com o crescimento da cultura. O saldo de radiação (Rn) foi dominado pelo balanço de ondas curtas, mas se mostrou sazonal: maior na estação seca e menor na chuvosa.

Palavras-chave: Saldo de radiação. Radiação Solar. Variabilidade da radiação. Nebulosidade.

Abstract: Radiation balance is important to determine the energy exchanges that occur in the Earth-Atmosphere system. The present paper aim to study the dynamic of the components of the radiation balance on a sugarcane vegetative system. The experiment was conducted in the Federal University of Alagoas, in the city of Rio Largo (09°28’03’’ S, 35°49’49’’ W), State of Alagoas, Northeast of Brazil, in a sugarcane area. The incident solar radiation (Rg), Reflected by the surface (Rr), incident longwave radiation (Ra), longwave emitted by the surface (Rs) and radiation balance (Rn) were measured by the Kipp and Zonen (Delft, Netherlands) model CNR1 net radiometer during the period of November/2017 to September/2018. The hourly and ten-day variation of each component of the radiation balance was evaluated. The net shortwave and longwave radiation fluxes varied substantially with the dynamics of clouds/precipitation, seasonality, land cover index (size of the crop). Rs was decreasing from beginning to the end of the experiment, meanwhile Rr was constant with the growth of the culture. The radiation balance (Rn) was dominated by net shortwave radiation, but was seasonal: larger in the dry season and smaller in the rainy season.

Keywords: Net radiation. Solar radiation. Radiation variability. Cloudiness.

Resumen: El balance de radiación es importante para determinar los intercambios de energía que ocurren en el sistema Tierra-Atmósfera. El presente estudio tiene como objetivo estudiar la dinámica del comportamiento de los componentes del balance de radiación en un sistema vegetativo de caña de azúcar. El experimento se llevó a cabo en la Universidad Federal de Alagoas, en el municipio de Rio Largo (09°28'03'' S, 35°49'49'' W), Estado de Alagoas, Noreste de Brasil, en una zona de cultivo de caña de azúcar. La radiación solar incidente (Rg), reflejada por la superficie (Rr), la radiación incidente de onda larga (Ra), la radiación de onda larga emitida por la superficie (Rs) y el balance de radiación (Rn) fueron medidos por el radiómetro neto modelo CNR1 de Kipp y Zonen (Delft, Países Bajos) de noviembre/2017 a septiembre/2018. Se evaluó la variación horaria y decenal de cada elemento del balance de radiación. Los flujos radiativos de los balances de onda corta y larga variaron sustancialmente con la dinámica de nubes/precipitación, la estacionalidad, el índice de cobertura del suelo (tamaño de cultivo). Rs fue decreciendo desde el inicio hasta el final del período experimental, mientras que Rr se mantuvo constante con el crecimiento del cultivo. El balance de radiación (Rn) estuvo dominado por el balance de onda corta, pero fue estacional: más alto en la estación seca y más bajo en la estación lluviosa.

Palabras clave: Radiación neta. Radiación solar. Variabilidad de la radiación. Nebosidad.

Submetido em: 05/04/2022
Aceito para publicação em: 16/12/2022
Publicado em: 10/01/2023

1. INTRODUÇÃO

De modo geral, o clima é o fator que mais influência no crescimento, na produtividade e na qualidade das culturas. Durante seu ciclo de cultivo, a cana-de-açúcar experimenta desiguais condições climáticas. Um dos principais fatores, que restringem a produtividade na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas é a anormalidade sazonal da precipitação pluvial, associado ao fato do período seco acontecer com o período de maior disponibilidade energética (SOUZA et al, 2003; SANTOS et al, 2009). Conforme Lyra et al. (2010), a cana plantada em setembro nessa região, em condição de sequeiro, sofre estresse hídrico na fase inicial, parte da fase de crescimento e no final da fase intermediária ao fim do ciclo. Segundo Souza et al. (2003), aproximadamente 70% das chuvas na região se concentram no período úmido (abril – agosto), enquanto, 30% distribuem-se entre os período seco (outubro – fevereiro) e de transição.

No Brasil, a enorme expansão do setor sucroalcooleiro apresenta grande importância no cenário agrícola brasileiro, uma vez que a cultura da cana-de-açúcar é uma variedade agrícola muito explorada no Brasil. A cana-de-açúcar é uma planta que se desenvolve em forma de touceira, com um ciclo de produção que possibilita uma colheita por ano, chegando a uma média de 6 (seis) cortes economicamente viáveis. O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar tornando a mesma uma das culturas de grande importância socioeconômica no país sendo seus principais derivados o açúcar (55%) e o álcool (45%).

O cultivo de cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro teve sua expansão no decorrer de 1970 a 1975, com recursos do programa do álcool (Proálcool). Nas regiões canavieiras do Brasil, como as regiões dos Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata do Nordeste, a disposição de área para ampliação da cana-de-açúcar vem-se tornando progressivamente mais restrita, sendo indispensável gerenciar a cultura apropriadamente, para obter maiores produções por unidade de área.

O monocultivo de cana-de-açúcar, em escala regional, pode influenciar o clima regional, principalmente por apresentar diferentes fases fenológicas que, por conseguinte, alteram o Balanço de Radiação (Rn) e o balanço de energia superficial. No entanto, apesar da importância do Rn e de sua instrumentação relativamente simples, esta variável não é medida frequentemente em estações meteorológicas e menos ainda sobre regiões de cultivos. A

magnitude dessa componente está diretamente relacionada à intensidade de radiação solar à superfície, variando em função de vários fatores: latitude, estação do ano, transparência atmosférica e alteração na cobertura superficial, que no caso da cana de açúcar, irá variar de acordo com as fases fenológicas.

Na fase inicial de crescimento da cultura, grande parte do solo está exposta diretamente aos raios solares. Conforme a planta se desenvolve, a cultura tende a cobrir completamente o solo e a mudar a arquitetura do arranjo foliar. Essa mudança no uso e ocupação do solo levam a alterações no balanço de radiação devido a interação dos componentes deste balanço com a superfície vegetada, onde cada cultura possui individualidade de desenvolvimento, experimentando diferentes estádios fenológicos ao decorrer do ano, proporcionando épocas com maior e menor recobrimento do solo. Para Ferreira Junior et al. (2015) os elementos meteorológicos têm comportamentos diferentes entre as fases de crescimento das culturas, principalmente porque a cana-de-açúcar é uma cultura com ciclo longo. Enquanto Bouhid André et al. (2010) afirmam que não houve mudanças no comportamento dos termos do balanço de radiação, quando se consideraram os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, embora os valores absolutos dos termos tenham sido diferentes.

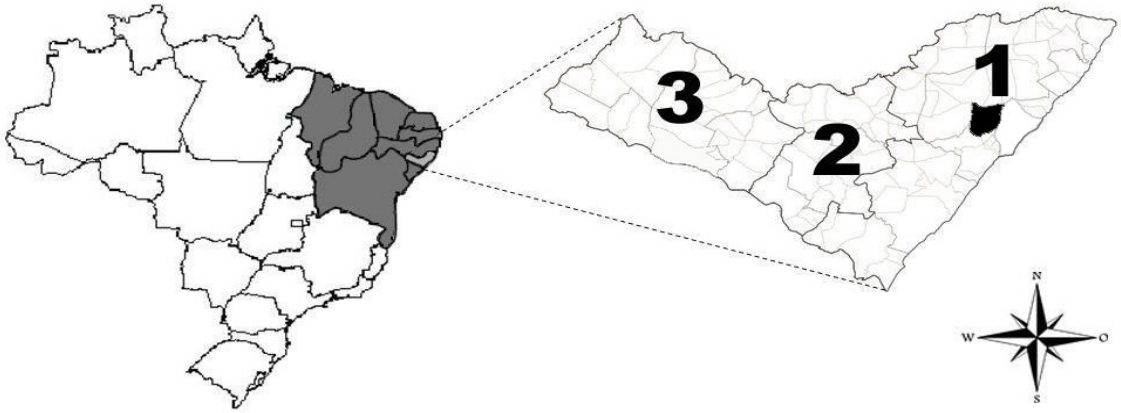
Diante do que foi exposto anteriormente, o presente trabalho teve como objetivo estudar a dinâmica do comportamento dos componentes do balanço de radiação sobre um sistema vegetativo da cana-de-açúcar em uma região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) em Rio Largo (AL) (Figura 1). O canavial tinha espaçamento alternado de 1,5x0,9 m onde as parcelas foram compostas de seis linhas com seis metros de comprimento, totalizando 40 parcelas. O primeiro plantio deste canavial foi em 22/07/2016 com primeiro corte em 06/09/2017 e o segundo em 25/09/2018.

Figura 1 - Localização geográfica do Nordeste Brasileiro (em cinza escuro), do estado de Alagoas com suas mesorregiões, Litoral (1), Agreste (2) e Sertão (3) e do município de Rio Largo (em destaque).



Fonte: Adaptado de Lopes Júnior et al. (2021).

O município de Rio Largo, que faz parte da região metropolitana de Maceió-AL, está localizado na Zona da Mata que, na classificação climática de Köppen, o clima é tropical com precipitação de outono-inverno (As'), com uma estação seca bem definida (BARROS et al., 2012). O regime pluviométrico em Alagoas está associado com os mecanismos produtores: Perturbações Ondulatórias dos Ventos Alísios (POAS), Brisas, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), Ondas de Leste, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM). Enquanto o período de seca, com algumas secas severas, está relacionado com variações que ocorrem na circulação de grande escala e, possivelmente, por mecanismos externos ao sistema terra-atmosfera-oceano (MOLION; BERNARDO, 2002). O local de estudo apresenta uma quadra chuvosa bem definida entre abril e julho, enquanto a estação seca ocorre entre novembro e fevereiro e período de transição em março, agosto, setembro e outubro.

Segundo Ferreira Junior et al. (2015) as médias climatológicas anuais (1972-2010) de precipitação pluvial, temperatura média do ar, umidade relativa e da fração de nebulosidade, são 1789,5 mm, 25,4 °C, 81,8% e 42,9%, respectivamente. O solo foi classificado como latossolo amarelo istrocoeso argissólico, de textura média/argilosa na qual as propriedades físicas apresentam, para um perfil com profundidade de 0,60 m, em média 56,8% de areia, 12,8% de silte e 30,4% de argila e densidade do solo de 1,32 Mg m^{-3}.

2.2. Dados

Os dados utilizados no presente estudo foram provenientes de um tripé micrometeorológico (09º28'03'' S, 35º49'49'' W) montado na área de cultivo, o qual realizou-se aquisição dos dados no período novembro/2017 a setembro/2018, cujos registros foram realizados a cada 20 segundos e médias armazenadas a cada 10 minutos em dataloggers (CR10X, Campbell Scientific). Os dados de precipitação, para o mesmo período de estudo, foram coletados pela estação agrometeorológica (9°28'29,1'' S, 35°49'43,6'' W, 127 m alt.) do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), distante 200 m do tripé micrometeorológico.

As medições da radiação de onda longa atmosférica (Ra) e terrestre (Rs) e radiação solar global incidente (Rg) e refletida (Rr) foram realizadas por um saldo radiômetro modelo CNR1 da Kipp e Zonen (Delft, Holanda) e, posteriormente essas variáveis foram utilizadas para cálculos do Saldo de Radiação (Rn) (Equação 1), o Balanço de Ondas Curtas (BOC) (Equação 2) e o Balanço de Ondas Longas (BOL) (Equação 3), todas em W m^{-2}.

$$Rn = BOC + BOL \quad (1)$$

$$BOC = Rg - Rr \quad (2)$$

$$BOL = Ra - Rs \quad (3)$$

O Índice de Transmitância Atmosférica (Kt) (Equação 4) foi calculado para caracterizar a nebulosidade. Este índice é uma componente essencial para a determinação das condições de nebulosidade de um determinado local, pois está diretamente ligada com o processo de transmissão da radiação solar através da atmosfera. O Kt foi determinado, segundo metodologia descrita por Lopes Júnior et al. (2021), pela razão entre a radiação solar incidente à superfície (Rg; W m^{-2}) e a radiação solar esperada numa superfície horizontal no topo da atmosfera (Ro; W m^{-2}) (Equação 5). Assim, quando os valores de Kt < 0,4, as condições são de céu nublado ou com alta nebulosidade (NB), 0,4 ≤ Kt < 0,6, céu parcialmente nublado ou com média nebulosidade (PN) e Kt ≥ 0,6, as condições são de céu claro ou com pouca nebulosidade (CL) (SOUZA; NICÁRIO; MOURA, 2005).

$$Kt = Rg / Ro \quad (4)$$

$$Ro = So\ Eo \cos \theta Z \quad (5)$$

em que, So é a constante solar (1367 W m^{-2}), Eo é o raio vetor da órbita terrestre em Unidades Astronômica (UA) (Equação 6) e θz é o ângulo zenital em graus (Equação 7).

$$Eo = 1 + 0{,}033\ cos\ (2\pi\ dn\ ) \quad (6)$$

$$cos\ \theta z = sen\varphi\ sen\delta + cos\varphi\ cos\delta\ cosh \quad (7)$$

no qual, dn é o dia sequencial do ano ou dia Juliano (1 a 366), δ é a declinação solar em graus (Equação 8), h é o ângulo horário em graus (Equação 9) e ϕ a latitude local expressa em graus.

$$\delta = 23{,}45\ sen\ [360/365 * (284 + dn)] \quad (8)$$

$$h = 15\ (t - M) + (ll - lp) \quad (9)$$

t é a hora local padrão, M é o meio-dia, ll expressa a longitude local e lp a longitude padrão no meridiano de 45°.

Após a aquisição dos dados, os mesmos foram analisados, tratados e calculado às médias horárias e diárias e confeccionados os gráficos com softwares adequados. Médias de fluxos de dez dias (decêndios) foram calculados a partir de médias horárias. Os decêndios médios foram calculados para remover picos desnecessários nas médias instantâneas e horárias e ter transição temporal suave (VERMA 1990; LEUNING et al., 2012).

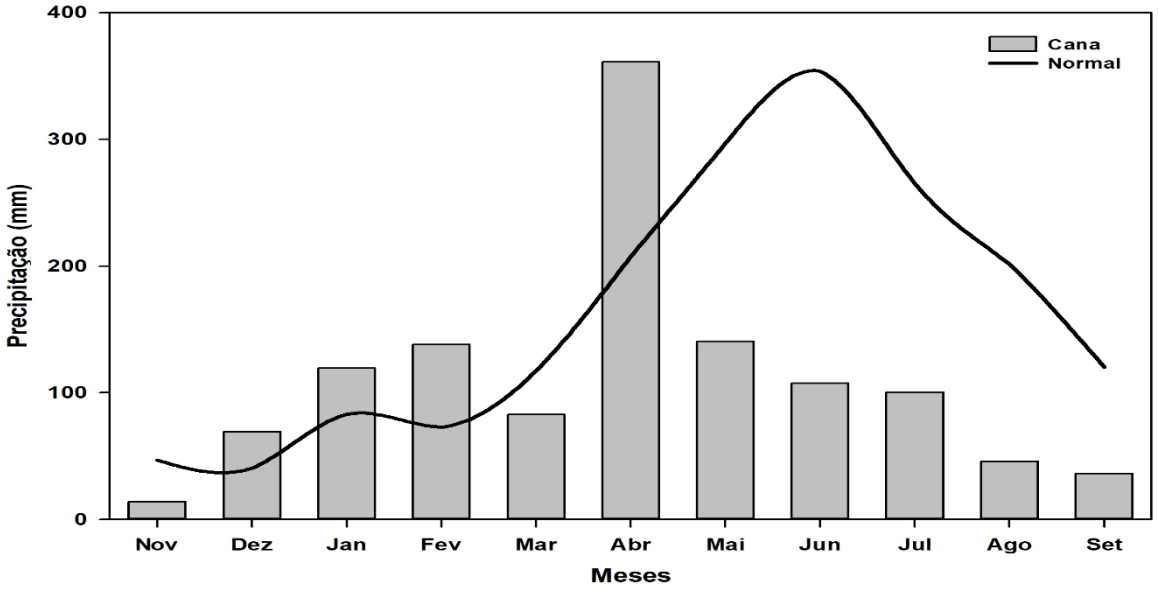
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Precipitação

As condições de cobertura do céu estão diretamente relacionadas com a precipitação devido à formação de nuvens que influenciam na refletância e transmitância da atmosfera. A Figura 2 dispõe dos totais mensais acumulados na área experimental e a normal climatológica (INMET), onde foi marcada pela ocorrência de volume pluviométrico baixo, apresentando um total acumulado de 1.253,3 mm, o qual correspondeu a 69,40% da normal climatológica (1.805,8mm). A precipitação abaixo da normal climatológica foi devido, especialmente, a intensificação do sistema de alta pressão semipermanente do Atlântico Sul, que adentrou na costa leste do Brasil e inibiu a passagem de sistemas frontais (CPTEC, 2018) durante o período chuvoso, ocasionando uma diminuição no acumulado de precipitação de 64,7% no período.

Nota-se ainda que os meses de verão apresentaram um leve superávit pluviométrico de 23,3%.

Figura 2 – Acumulado mensal de precipitação na região do experimento (Cana) e Normal Climatológica da Precipitação do INMET (Normal), ambos em mm.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.2. Radiação solar global (Rg) e radiação solar refletida (Rr)

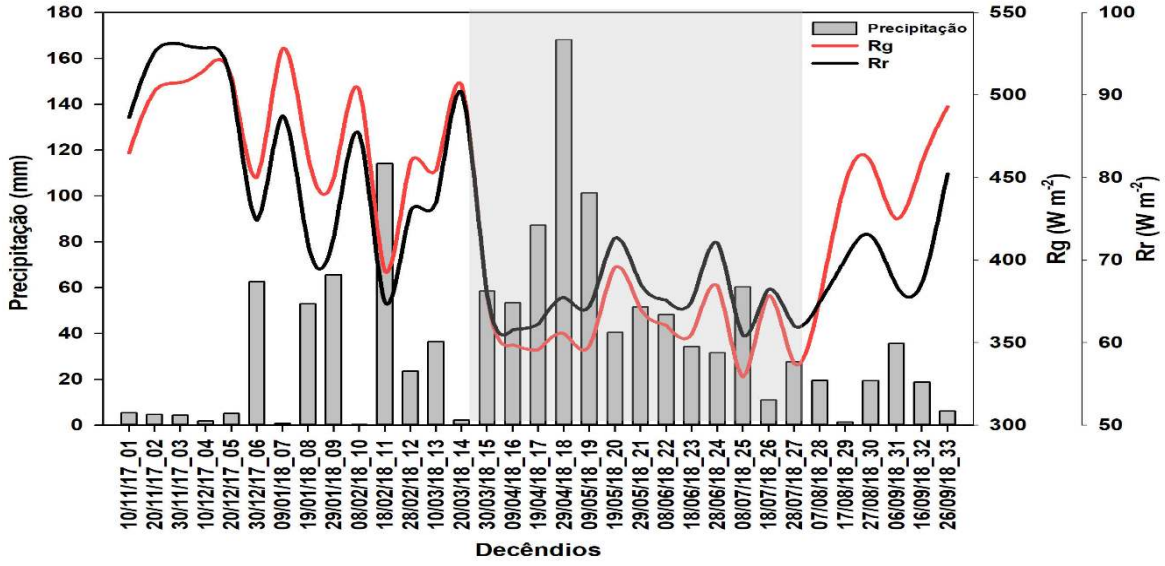
Ficou evidente uma alta incidência de Radiação Solar Global (Rg) no decorrer do início do ciclo da cultura e meses posteriores correspondentes a estação seca regional (possivelmente devido a maior fração de dias de céu claro e menor ângulo de incidência dos raios solares para a região), com média de novembro - fevereiro de 479,05 W m^{-2} com tendência de redução a partir do mês de março e durante os decêndios em que houve eventos de chuvas (Figura 3). Lopes Júnior et al. (2021) relataram que a probabilidade de ocorrência de dias nublados na estação seca na região de estudo é de somente 0,83%, enquanto a ocorrência de dias de céu claro na chuvosa é 0%. Subsequentemente o Rg decresce nos meses chuvosos (abril- julho) devido a maior nebulosidade/precipitação com média de 359,06 Wm^{-2}. Posteriormente, observa-se um aumento gradativo da Rg a partir do mês de agosto em decorrência da mudança das estações do ano (transição chuvoso-seco). Lopes Júnior et al. (2021), Ferreira Junior et al. (2015), Porfírio et al. (2012), Querino et al. (2011) e Souza et al. (2005) encontraram valores semelhantes de Rg para a região de estudo.

É comum e esperado nesta região que a radiação solar seja sazonal, uma vez que esta variável meteorológica depende da latitude e fatores como transmissividade e ângulo de incidência, etc. Nota-se que a variabilidade desses fatores influencia a forçante radiativa atmosférica alterando o nível de Rg e assim todo o balanço de Ondas Curtas (BOC) superficial.

Ao observar os valores médios anuais e estacionais de transmitância atmosférica global (Kt), verificou-se que este apresentou média diária anual de 0,52. A estação seca teve média de 0,55, a estação chuvosa de 0,51 e o período de transição entre as estações teve uma média de 0,54. Dessa forma, percebe-se que durante o período de estudo o céu foi classificado como parcialmente nublado, ainda de acordo com a classificação de Lopes Júnior et al. (2021).

Em relação a componente radiação solar refletida (Rr) percebe-se que a mesma é dependente da Rg, precipitação e altura da cultura. Verifica-se que a Rr apresentou no início médias em torno de 78,24 Wm^{-2} (estação seca), fase que compreende período de reduzida cobertura do solo e a radiação solar incide mais perpendicularmente no solo. Nos meses seguintes constatou-se uma redução da Rr no período chuvoso, alcançando médias de 58,71 Wm^{-2}, condição esta que se mantém praticamente constante até o fim do ciclo da cultura. Ressalta-se ainda que nesta época (parte final do experimento) a radiação solar era mais aprisionada pela cultura devido ao tamanho da mesma.

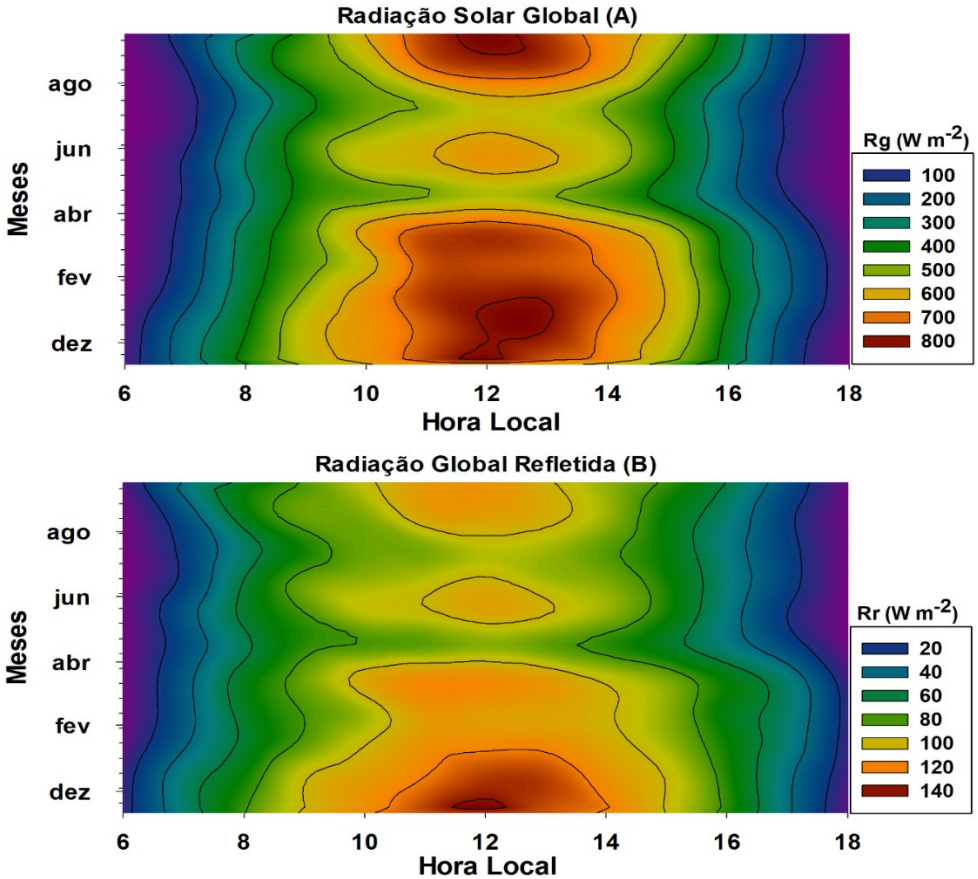
Figura 3 - Variabilidade decendial média horária da Radiação Solar Global (Rg) e Refletida (Rr), ambos em W m^{-2}, com o acumulado médio mensal decendial de precipitação (Precipitação), em mm, no período experimental. Área sombreada corresponde à estação chuvosa local.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Quando se analisa o perfil horário anual (Figura 4), nota-se que a distribuição de Rg foi bem coerente com as condições vigentes, com máximos ao meio dia e mínimo no nascer e pôr do Sol, apresentando uma certa simetria diurna. É possível observar que no período em que foram registrados os maiores acumulados de precipitação (abril a julho), a Rg foi menor (estação chuvosa). Além da cobertura de nuvens nesta época, a declinação solar é um fator influente na radiação solar que chega até a superfície. A média horária de Rg durante o ciclo da cultura foi 395,69 Wm^{-2}. Os meses de Abril/Julho tiveram as menores médias horárias (323,30 Wm^{-2}), principalmente devido à alta nebulosidade observada nessa época do ano, conforme foi corroborado por estudo de Lopes Júnior et al. (2021), no qual os autores afirmaram que a probabilidade de ocorrência céu claro nesta época do ano na região de estudo é de 0% (Nublado= 20,49%; Parcialmente Nublado=79,51%; Céu Claro = 0%). Na estação seca (novembro a março) a Rg foi maior do que em outros meses do ciclo da cultura, com média horária de 452,44 Wm^{-2}.

Figura 4 - Variação média horária mensal da (A) Radiação Solar Global (Rg) e (B) Refletida (Rr), ambas em W m^{-2}, durante o período experimental.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

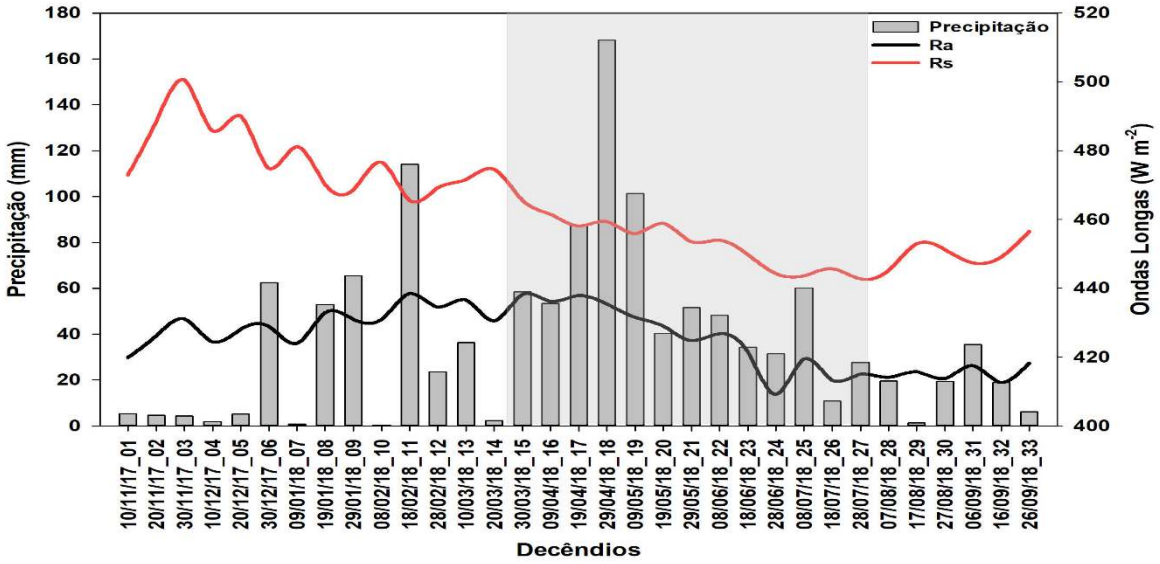
No perfil horário da Rr quando comparada com o Rg evidenciou um comportamento semelhante, embora com amplitude diferente. Percebe-se que houve uma tendência sazonal característica, similar ao ocorrido com a Rg, com maiores registros na estação seca e menores na chuvosa. Nas primeiras e últimas horas do período diurno, ao longo do ciclo da cultura, constataram-se baixos registros de Rr. Em contrapartida, nos horários próximos ao meio-dia os registros foram maiores independentemente da época do ano. Em especial novembro e dezembro compreendem o período de reduzida cobertura do solo, pois foi logo após o segundo corte da cana-de-açúcar, o que sugere uma maior absorção de radiação solar incidente pelo sistema. Em termos gerais a Rr correspondeu a 17,35% da Rg, enquanto Carmo et al. (2017) encontraram valor similar (18%) em um experimento de cana-de-açúcar no semiárido pernambucano e Carvalho et al. (2018) obtiveram 17,1% em experimento de cana em Juazeiro, Bahia.

3.3. Radiação de onda longa da superfície (Rs) e da atmosfera (Ra)

No início do experimento o solo estava exposto em razão do tamanho da cana-de-açúcar, então a radiação de onda longa superficial (Rs) média decendial foi de 487,59 W m^{-2}, a qual decresceu ao longo do experimento com o aumento da altura da cana-de-açúcar e da nebulosidade/precipitação (Figura 5) até atingir uma média no final de 450,97 W m^{-2}. Isso ocasiona, como relatado por Carvalho et al. (2018), numa menor Rs em razão da maior cobertura vegetal porque áreas não florestais são mais suscetíveis a variações microclimáticas sazonais, os quais encontraram Rs de 557,52 W m^{-2} em cana-de-açúcar em Juazeiro, BA. É importante destacar que Santos (2011) frisa a relevância de que a radiação de onda longa emitida pela superfície e a temperatura do solo sejam proporcionais.

A radiação de onda longa atmosférica (Ra) média decendial é maior (426,21 W m^{-2}) nos meses nos quais a precipitação e nebulosidade são maiores no ano, ou seja, estação chuvosa. Como afirmado por Arya (1988), normalmente obtém-se valores mais elevados de Ra em dias nublados, uma vez que as nuvens irradiam como corpo negro, pois contribuem enormemente com Ra para a superfície, o que corrobora com nosso estudo. Nota-se também que nessa mesma estação a diferença entre Rs e Ra é menor.

Figura 5 - Variabilidade decendial média horária da Radiação de Onda Longas da Superfície (Rs) e da Atmosfera (Ra), ambos em Wm^{-2}, com o acumulado médio mensal decendial de precipitação (Precipitação), em mm, no período experimental. A área sombreada corresponde à estação chuvosa local.

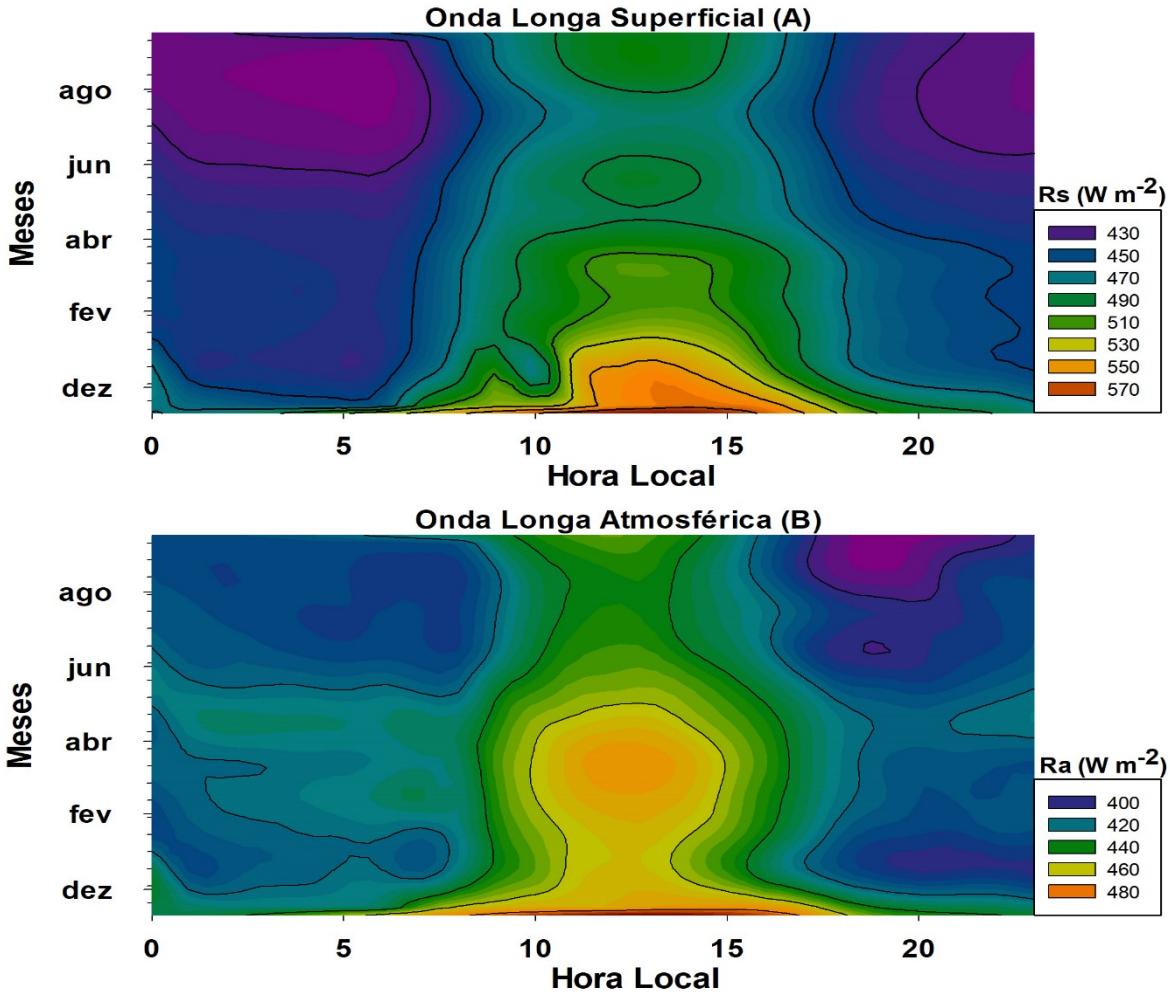


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Similarmente a evolução da Rs decendial, a Rs horária é periódica no tempo, com valores mínimos (420,0 W m^{-2}) no período noturno ao longo da estação chuvosa, onde a nebulosidade/precipitação é mais elevada, enquanto os máximos (567,04 W m^{-2}) ocorrem na estação seca, por volta do meio dia, cuja condição climática é contrária à da chuvosa (Figura 6A). Carvalho et al. (2018) obtiveram valores totais diários de Rs similares aos encontrados aqui para a cana-de-açúcar na região do Submédio do Vale São Francisco.

Observa-se que o máximo horário da Ra (484,28 Wm^{-2}) ocorreu durante o dia e no período de transição seco-chuvoso (Figura 6B). Este padrão não refletiu as condições climáticas de precipitação e nebulosidade, uma vez que sabe-se que as nuvens possuem um grande impacto na evolução noturna, aumentando a Ra. Além disso, as concentrações da nebulosidade na estação chuvosa são maiores que em qualquer outra época e, consequentemente, é maior a fonte da Ra emitindo para a superfície terrestre. A Ra apresenta um mínimo entre julho-setembro da ordem de 390,38 Wm^{-2} no período da madrugada.

Figura 6 - Variação média horária mensal da (A) Radiação de Onda Longa Superfície (Rs) e (B) Atmosférica (Ra), ambas em Wm^{-2}, durante o período experimental.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.4. Balanço de ondas curtas (BOC), balanço de ondas longas (BOL) e saldo de radiação (Rn)

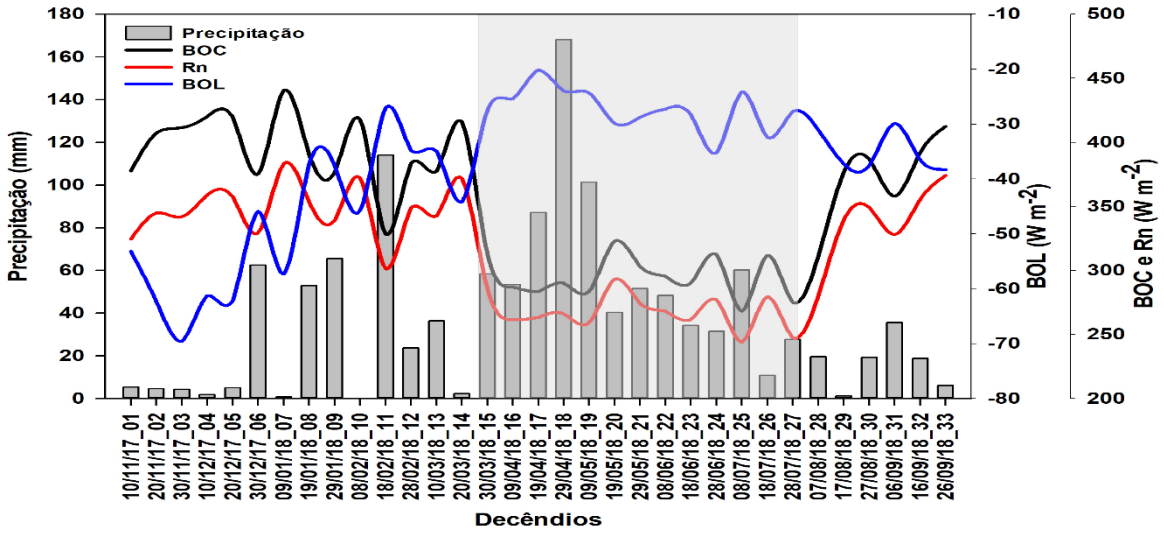
O Balanço de Ondas Curtas (doravante BOC) foi fortemente influenciado pela variação sazonal e horária das componentes de radiação solar incidente e refletida. O BOC manteve uma leve semelhança com Rg. No decorrer do experimento a média geral foi de 352,02 W m^{-2}. Seu comportamento durante a estação chuvosa (293,64 Wm^{-2}) era 25,81% menor que na estação seca (395,79 W m^{-2}) (Figura 7). Entretanto, conforme afirmado preliminarmente, houve um déficit pluviométrico (choveu menos do que a normal climatológica) durante a estação chuvosa e um superávit na estação seca, o que acarretou esta diferença entre as estações, uma vez que aumentou a quantidade de nuvens na seca e diminuição na chuvosa.

No entanto, as componentes do BOC (Rg e Rr) reduziram bastante durante a estação chuvosa. Mudanças estacionais na nebulosidade determinam a variação da radiação solar, até mesmo maior do que o ângulo solar ou a duração do dia (MALHI et al., 2002).

Observa-se que o Balanço de Ondas Longas (BOL) intensificou-se juntamente com a nebulosidade/precipitação e altura do dossel da cultura (Figura 7). Segundo Silva et al. (2011) o aumento do Índice de Área Foliar (IAF) faz com que a quantidade de radiação associada ao BOL apresente tendência decrescente (menos negativa), em função da maior retenção de energia pelo dossel da cultura e, consequentemente, menor incidência de radiação solar sobre a superfície do solo. Com isso deduz-se que a emissão de radiação de Ondas Longas (OL) pelo dossel foi reduzida ao longo do experimento, conforme afirmado anteriormente, já que o BOL é dominado pela emissão de OL da superfície. Sabe-se que o BOL é regulado, essencialmente, pela nebulosidade, temperaturas do ar e solo e concentrações de dióxido de carbono e vapor d'água. Valores negativos de BOL apontam que a superfície emite mais do que a atmosfera, pois sua temperatura é maior. Em média decendial, o BOL variou de -42,56 W m^{-2} na estação seca para -27,46 W m^{-2} na chuvosa, com média geral de -37,04 W m^{-2}. Santos et al. (2019) encontraram BOL médio de 58,25 W m^{-2} na estação seca para região de estudo.

O saldo de radiação (Rn) apresentou oscilações diárias acarretando mudanças consideráveis ao longo do período estudado. Nota-se, que essas variações foram decorrentes da época do ano, pois nos meses com maior presença de chuva (maio a julho), o Rn tende a ser menor (Figura 7). Essa amplitude de variação do saldo de radiação esteve relacionada com a precipitação pluvial ocorrida no mesmo período. É possível observar valores médios horários em torno de 140,66 W m^{-2}. A variação estacional do Rn é relevante. Constata-se no experimento que houve uma redução de 15,02% da época seca para chuvosa. Isto concorda com a afirmação de Moore (1976), que as diferenças no Rn estão relacionadas com as desigualdades no albedo (reflexão) e temperatura do solo (emissão de ondas longas).

Figura 7 - Variabilidade decendial média horária do Balanço de Ondas Curtas (BOC), Balanço de Ondas Longas (BOL) e Saldo de Radiação (Rn), todos em Wm^{-2}, com o acumulado médio mensal decendial de precipitação, em mm, no período experimental. Área sombreada corresponde à estação chuvosa local.



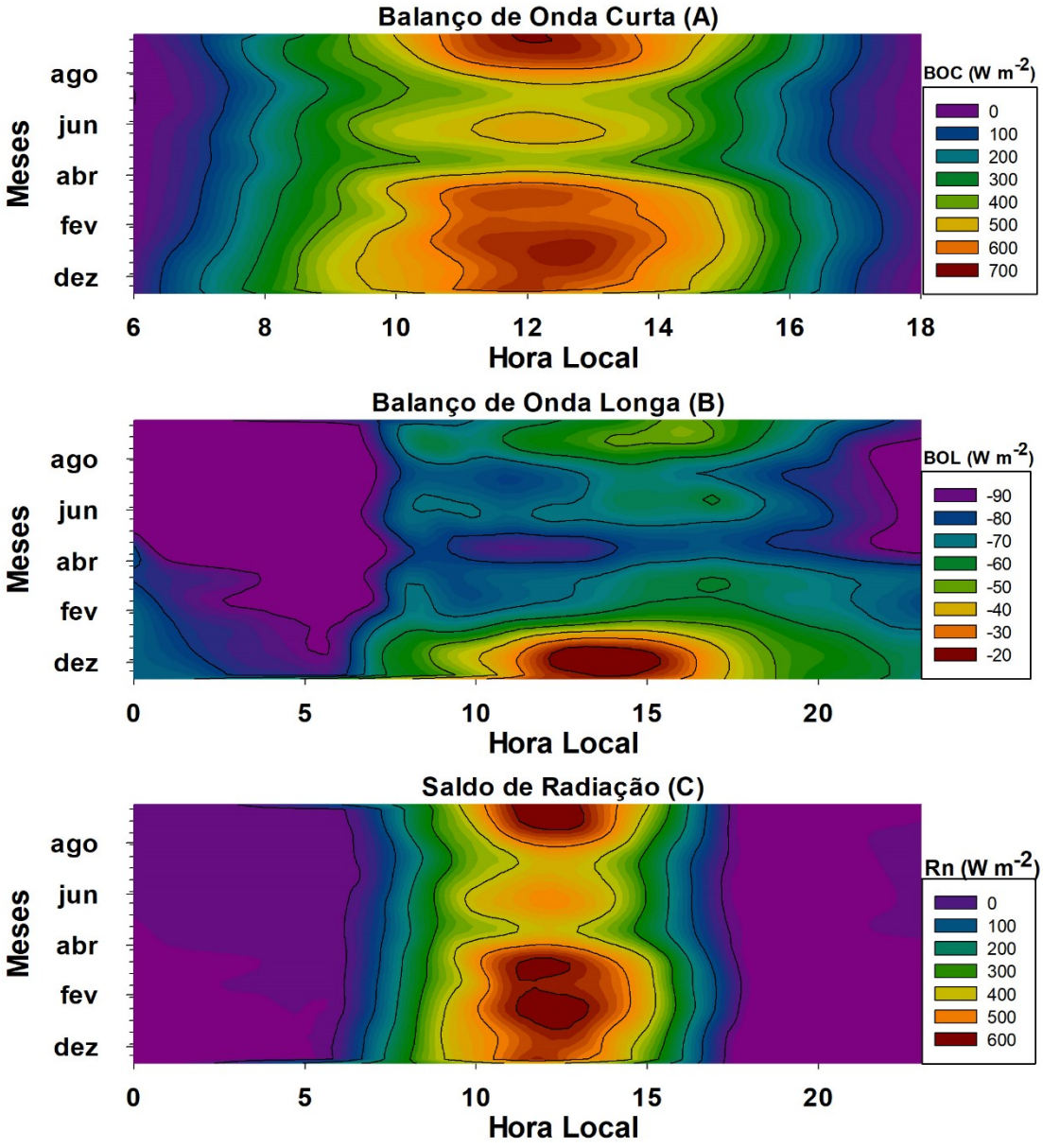
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Nota-se claramente que o BOC horário seguiu o mesmo padrão do Rg, uma vez que é a principal componente do balanço de radiação (Figura 8A). O BOC apresentou valores médios superiores a 700 W m^{-2}, próximos ao meio-dia, mas na chuvosa não ultrapassou 550 Wm^{-2} em razão do aumento da nebulosidade e precipitação. Vê-se que o BOC horário é simétrico em relação ao período matutino e vespertino ao longo do desenvolvimento da cultura.

Verificou-se que o BOL horário foi muito variável durante todo o experimento, não seguindo um padrão simétrico (Figura 8B), pois é dependente da temperatura e nebulosidade. Depois do início das chuvas (abril) o BOL foi maior principalmente no período noturno, corroborando com Singh et al. (2014) de que essa componente aumenta com a precipitação.

A variação diária do Rn mostra um crescimento da radiação ao amanhecer, até atingir os valores máximos por volta do meio dia. No período vespertino ocorre um declínio dos níveis de radiação até alcançar valores negativos no período noturno (Figura 8C). Isso concorda com Souza Filho (2006) que afirmaram que os menores valores de Rn normalmente são observados no período da tarde devido ao aumento da temperatura da folhagem e a consequente maior emissão de radiação de ondas longas pela vegetação. À noite, como era de se esperar, o Rn foi negativo, resultado do balanço negativo entre a radiação emitida pela superfície (radiação terrestre) e a contra-radiação (radiação atmosférica).

Figura 8 - Variação média horária mensal da (A) Balanço de Ondas Curtas (BOC), (B) de Ondas Longas (BOL) e (C) Saldo de Radiação (Rn), todos em Wm^{-2}, durante o período experimental.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Com isso observou-se no Rn horário um padrão típico daquele verificado em superfícies vegetadas, o que coincidiu com o comportamento da Rg horária, correspondendo com Azevedo et al. (2014) em um experimento com cana-de-açúcar em tabuleiros costeiros na Paraíba, reforçando a existência de algum fator externo que maximiza os efeitos da radiação na estação seca, mais significativo do que o efeito das nuvens na estação chuvosa. Então, na estação chuvosa os valores médios máximo e mínimo do Rn foram de 495,37 W m^{-2} e -42,10 W m^{-2} respectivamente, com média de 131,96 W m^{-2}. Para a estação seca foram

encontrados os valores médios mais elevados de Rn, 615,43 W m^{-2} e -58,65 W m^{-2} respectivamente, com média de 155,29 W m^{-2}.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, de acordo com os resultados obtidos, pode-se inferir que os padrões das principais variações nos componentes do balanço de radiação da cana-de-açúcar estão relacionadas a radiação solar global e a emissão de radiação de ondas longas, mas também foram influenciadas pelas características de época do ano, índice de cobertura do solo e nebulosidade/precipitação.

As mudanças observadas na vegetação ao longo do experimento alteraram a característica de resposta da vegetação em termos de radiação solar refletida e onda longa emitida pelo dossel. A Rs é decrescente do início ao término do período experimental, enquanto a Rr se manteve constante com o crescimento da cultura.

A Ra se manteve constante depois da estação chuvosa, mas com valores (414,99 W m^{-2}) abaixo da média (425,85 W m^{-2}) possivelmente relacionada a baixos valores da umidade relativa e temperatura do ar.

Balanço de ondas longas (BOL) oscilou bastante ao longo do experimento em função do tamanho da cultura (cobertura vegetal), temperatura do dossel e dinâmica das nuvens/precipitação, pois o BOL oscilou, em média, no início (estação seca) -61,68 W m^{-2} para -27,46 W m^{-2} na estação chuvosa (metade do experimento) para -34,89 W m^{-2} no final.

O saldo de radiação (Rn) foi influenciado pelo BOC, mas se mostrou sazonal: maior na estação seca e menor na chuvosa.

REFERENCIAS

ARYA, S.P.S. **Introduction to micrometeorology**. 1. ed. London: Academic Press Inc., 1988. 307 p.

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

BARROS, A. H. C.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do estado de Alagoas. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. 2. ed. Recife: Embrapa Solos, 2012, 32 p.

BOUHID ANDRÉ, R.G.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.

CARMO, J. F. A.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L.S.B.; LEITÃO, M.M.V.B.R. Balanço de radiação da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no submédio do Vale São Francisco. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.25, n.1, p.91-100, 2017.

CARVALHO, H. D. S.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F. Fluxos de radiação e energia em Caatinga preservada e cana-de-açúcar no Semiárido. **Revista Brasileira de Meteorologia,** São Paulo, v. 33, n. 3, p. 452-458, 2018.

CPTEC. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Infoclima**, 2018. Disponível em: http://infoclima1.cptec.inpe.br. Acesso em: 21 de out. 2019.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; ESCOBEDO, J.F.; SANTOS, M.V.C. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.8, p.741–747, 2015.

LEUNING, R.; GORSELA, E. V.; MASSMAN, W. J.; ISAACC, P. R. Reflections on the surface energy imbalance problem. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v.156, p. 65–74, 2012.

LOPES JÚNIOR, J. M.; MOURA, M. A. L.; COSTA, N. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A. Frequência e probabilidade de ocorrência de transmitância atmosférica global para a região de Maceió-Alagoas. **Brazilian Journal of Development**, [s.I.], v.7, n.2, p. 14685-14700, 2021.

LYRA, G.B.; LYRA, G.B.; SOUZA, J.L.; SANTOS, M.A. Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. **STAB** – **Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 28, n.4, p.22 – 25, 2010.

MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A.D.; PEREIRA, M.G.P.; GRACE, J.; CULF, A.; CLEMENT, R.; Energy and water dynamics of a central Amazonian rainforest. **Journal Geophysical Research Atmospheres**, v.107, n. D20, p. 1-17, 2002.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira Meteorologia**, São Paulo, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

MOORE, C. J. A comparative study of radiation balance above forest and grassland. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, Reading, v.102, n. 434, p.889-899, 1976.

PORFÍRIO, A. C. S.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; LEMES, M. A. M. An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. **Energy**, Amsterdam, v. 44, n. 1. p. 584-592, 2012.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C.; MARQUES FILHO, A. D. O. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (kt), externo e interno,

em uma floresta de mangue em Alagoas–Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 204-294, 2011.

SANTOS, M.A; LYRA, G. B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; SEDIYAMA, G. C. Coeficiente da cultura no estádio inicial de desenvolvimento para cana-de-açúcar em diferentes datas de plantio na região de tabuleiros costeiros de alagoas. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 27, p. 30 – 33, 2009.

SANTOS, M.F.; MOURA, M.A.L.; FERREIRA JUNIOR, R.A.; QUERINO, C.A.S.; LOPES JÚNIOR, J.M. Impacto no balanço de onda longa em substituição de mata atlântica por canavial na estação seca em Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 21., 2019, Catalão. **Anais[...].** Catalão: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2019.

SANTOS, S.A. **Análise do controle ambiental nas trocas de energia, vapor d'água e CO2 em área de caatinga**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.2, p.139–147, 2011.

SINGH, N.; BHATTACHARYA, B. K.; NANDA, M. K.; SONI, P.; PARIHAR, J. S. Radiation and energy balance dynamics over young Chir Pine (Pinus Roxburghii) system in Doon of western Himalayas. **Journal of Earth System Science**, New York, v. 123, n. 7, p. 1451–1465, 2014.

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C.P.; ROCHA, E.J.P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.21, p.318-330, 2006.

SOUZA, J. L. de; MOURA FILHO, G.; LYRA, R. F. F.; TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; SILVA, J. L.; SILVA, P. R. T.; CARDIM, A. H.; AMORIM, E. C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na Região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 11, n. 1, p. 131 – 141, 2003.

SOUZA, J.L. de; NICÁCIO, R.M; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 30, n. 8, p. 1203-1220, 2005.

VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, London, v.5, n.1, p.99–115, 2009.