UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

RENAN LIMA DE SOUSA

SALDO DE RADIAÇÃO NO CULTIVO DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Botucatu
2021

RENAN LIMA DE SOUSA

SALDO DE RADIAÇÃO NO CULTIVO DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu
2021

S725s Sousa, Renan Lima de
Saldo de radiação no cultivo do lúpulo em ambiente protegido / Renan Lima de Sousa. -- Botucatu, 2021
54 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Humulus lupulus L.. 2. radiação solar global. 3. energia líquida disponível. 4. evapotranspiração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SALDO DE RADIAÇÃO NO CULTIVO DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO

AUTOR: RENAN LIMA DE SOUSA
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participaçao Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participaçao Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participaçao Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof.ª Dr.ª POLIANA ROCHA D'ALMEIDA MOTA (Participaçao Virtual)
Engenharia Agrícola e Solos / Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. EMERSON GALVANI (Participaçao Virtual)
Departamento de Geografia / Universidade de São Paulo / Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas

Botucatu, 31 de maio de 2021

Aos meus pais Maria do Amparo e

Francisco Máximo que sempre

acreditaram em meu potencial e forram o

meu farol, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela vida, saúde e bênçãos.

Aos meus pais e irmão que me deram todo o amor, carinho, compreensão, ensinamentos e apoio para que essa jornada se tonasse possível.

Às pessoas que se dispuseram caminhar ao meu lado dando apoio, atenção e afeto.

A todos os familiares e amigos que se fizeram presentes nessa jornada com muita dedicação e amor.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai pelo seu incentivo, orientação, bom humor, paciência e amizade consolidada.

Aos colegas do laboratório de radiometria da FCA/UNESP Botucatu-SP pela reciprocidade e empenho.

Ao Sr. Max Rafaelle da Hops Brasil pela parceria.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford

RESUMO

A evolução do mercado cervejeiro nacional e internacional nos últimos anos juntamente com o segmento das cervejas artesanais colocaram em evidência a cultura do lúpulo e a demanda por ingredientes com características organolépticas especiais e de maior qualidade; aumentando a procura de lúpulo cultivado localmente. No entanto, o plantio de lúpulo no território Brasileiro é um desafio. Por ser uma cultura nova no país, há poucos estudos na área, principalmente com a demanda energética da cultura para seu processo evapotranspirativo, o qual o saldo de radiação é responsável por pelo menos 82% da ETo em temperatura de 30°C. Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o saldo de radiação e suas componentes no cultivo do lúpulo em ambiente protegido na cidade de Botucatu-SP. Inicialmente foi apresentada a evolução temporal das medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação para a cultura do lúpulo em ambiente protegido e comparadas com as medidas obtidas no ambiente externo. O saldo de radiação acumulado durante o ciclo foi 1266,8MJ/m^2 e é 23% menor que o saldo de radiação externo. Embora com saldo de radiação menor dentro da estufa, o ambiente protegido preservou mais o balanço de onda longa, que é essencial para os processos fisiológicos e metabólicos da planta, viabilizando a produção média de 45g.$planta^{-1}$ de cones frescos mesmo sendo o primeiro ano de produção. Também foram propostos modelos de estimação do saldo de radiação e suas componentes no interior de um ambiente protegido com a cultura do lúpulo em função da radiação solar global medida externamente. Foi possível determinar que o saldo de radiação é aproximadamente 44% da radiação solar global externa e que esta pode ser um parâmetro confiável para estimativa da radiação solar global, refletida, balanço de ondas curtas, balanço de ondas longas e do saldo de radiação dentro da estufa com o cultivo do lúpulo.

Palavras chave: *Humulus lupulus* L.; radiação solar global; energia líquida disponível; evapotranspiração.

ABSTRACT

The evolution of the national and international beer market in recent years, together with the craft beers segment, highlighted the hop culture and the demand for ingredients with special organoleptic characteristics and higher quality; increasing demand for locally grown hops. However, hop planting in Brazilian territory is a challenge. As it is a new crop in the country, there are few studies in the area, mainly with the energy demand of the crop for its evapotranspiration process, in which the radiation balance is responsible for at least 82% of the ETo at a temperature of 30°C. Therefore, the objective of this work was to evaluate the balance of radiation and its components in the cultivation of hops in a protected environment in the city of Botucatu-SP. Initially, the temporal evolution of measurements of global, reflected, atmospheric, terrestrial radiation and radiation balance for hop culture in protected cultivation was presented and compared with measurements obtained in the external environment. The accumulated radiation balance during the cycle was 1266.8MJ/m2 and is 23% smaller than the external radiation balance. Although with a lower radiation balance inside the greenhouse, the protected environment preserved more the long wave balance, which is essential for the physiological and metabolic processes of the plant, enabling the average production of 45g.plant-1 of fresh cones, even though it is the first year of manufacture. Models to estimate the balance of radiation and its components inside a protected environment with hop culture as a function of global solar radiation measured externally were also proposed. It was possible to determine that the radiation balance is approximately 44% of the external global solar radiation and that this can be a reliable parameter for estimating the global, reflected solar radiation, short wave balance, long wave balance and the radiation balance within the greenhouse with the cultivation of hops.

Keywords: *Humulus lupulus* L.; global solar radiation; radiation balance; evapotranspiration.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL 17
CAPÍTULO 1 - SALDO DE RADIAÇÃO DISPONÍVEL PARA A CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO 18
1.1 **INTRODUÇÃO** 18
1.2 **MATERIAIS E MÉTODOS** 20
1.2.1 Localização do experimento 20
1.2.2 Caracterização do experimento 20
1.2.3 Sistema de irrigação 22
1.2.4 Análise dos dados 23
1.3 **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 23
1.3.1 Efeito da cobertura plástica na radiação solar 23
1.3.2 Saldo radiômetro dentro e fora da estufa 24
1.3.3 Interceptação de energia pela cultura do lúpulo 31
1.4 **CONCLUSÕES** 33
REFERÊNCIAS 35
CAPÍTULO 2 - MODELOS PARA ESTIMAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E SEUS COMPONENTES NA CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO 37
2.1 **INTRODUÇÃO** 37
2.2 **MATERIAIS E MÉTODOS** 39
2.2.1 Localização do experimento 39
2.2.2 Caracterização do experimento 39
2.2.3 Análise dos dados 41
2.3 **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 41
2.4 **CONCLUSÕES** 48
REFERÊNCIAS 49
CONSIDERAÇÕES FINAIS 51
REFERÊNCIAS 53

INTRODUÇÃO GERAL

Embora ainda pouco estudado no Brasil e bastante empregado no processo de fabricação da cerveja, o lúpulo: *Humulus lupulus* L.: é uma planta herbácea perene usada em diferentes tipos indústrias onde a cervejeira representa 98% do uso mundial. O principal motivo do seu cultivo e uso são seus metabolitos secundários, principalmente ácidos amargos: ácidos alfa e beta, os quais podem conferir ação conservante (bactericida) ou aroma e amargor respectivamente (FADIÑO et al., 2015).

Nas últimas décadas, o uso de estufas de polietileno em diversas culturas vem aumentando consideravelmente em vários países como meio de proteção às plantas e culturas agronômicas contra adversidades e variações climáticas (LENZ, 2016).

Além dos principais fatores já conhecidos que o ambiente protegido favorece, também está o aumento do componente mais eficiente na fotossíntese: a radiação difusa. Através do plástico de cobertura, parte da radiação global é transformada em radiação difusa e esta, por sua vez, melhor distribuída, atingindo a área foliar mais homogeneamente (DAL PAI, 2010).

Medidas da energia líquida disponível em ambiente protegido são onerosas e de difícil operação, deixando essa potencial informação de lado. Frete à escassez de informação agrometeorológica para o cultivo do lúpulo, este trabalho visa construir um referencial de pesquisa para estudos sobre saldo de radiação para a cultura do lúpulo.

Nesse contexto, esse trabalho é apresentado em dois capítulos. No capítulo 1 é abordado o tema: SALDO DE RADIAÇÃO DISPONÍVEL PARA A CULTURA DO LÚPULO EM AMBIE PROTEGIDO. Onde, além de disponibilizar informações científicas e auxiliar produtores no manejo da irrigação e produção do lúpulo, este capítulo teve como objetivos: Apresentar a evolução temporal das medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação para a cultura do lúpulo em ambiente protegido e comparar os resultados obtidos com as medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação obtidas externamente ao ambiente protegido.

No capítulo 2 é abordado o tema: MODELOS PARA ESTIMAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E SEUS COMPONENTES NA CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO. Foram propostos modelos para estimação do saldo de radiação e suas componentes no interior de um ambiente protegido com a cultura do lúpulo em função da radiação solar global medida externamente.

CAPÍTULO 1
SALDO DE RADIAÇÃO DISPONÍVEL PARA A CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO

1.1 INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus L.*) é uma planta dióica, trepadeira, predominante na maioria das regiões temperadas do mundo, e seu principal produto são os cones. Estes, possuem glândulas de lupulina repletas de ácidos amargos (α e β ácidos) e compostos fenólicos, como chalconas preniladas, proantocianidinas(SARRAF, 2015). Atualmente, é cultivado em 4 continentes e, por conta do amargor e aroma, seus cones florais produzidos por plantas femininas são matéria prima no processo de produção de cerveja (GETTY, 2019).

A maioria do lúpulo mundial é cultivada nos Estados Unidos e na Alemanha, com produções menores encontradas em vários lugares do mundo. Em 2018, os EUA produziram um total de 49.446 toneladas de lúpulo e a Alemanha em torno de 45.000 toneladas e o valor total da colheita em 2018 foi estimado em 583 milhões de dólares (IHGC, 2019)

Devido suas limitações climáticas de latitude, temperatura, nutrição, solo, disponibilidade de água e dormência obrigatória no período frio, é um desafio conhecer a cultura mais profundamente e possibilitar a ampliação dos horizontes de cultivo, visto a crescente demanda do mercado.

No Brasil, o uso de estufas de polietileno apresenta diversas funções, considerando a extensão e localização geográfica. Nas regiões Sul e Sudeste, por exemplo, a estufa de polietileno atua como regulador térmico. Já em regiões onde as temperaturas são elevadas, como na região do Nordeste e Centro-Oeste as estufas de polietileno proporcionam alterações microclimáticas por meio de variações das radiações solares global, difusa, fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura, umidade e balanço de energia; além de converter parte da radiação direta em difusa em melhorar sua distribuição (DAL PAI, 2010; KHOSHNEVISAN et al, 2013).

A radiação atmosférica, também conhecida como radiação de ondas longas, é a energia irradiada pela atmosfera e seus constituintes e tem sentido descendente. Tem esse nome, pois sua irradiância está em uma faixa do espectro distante da faixa do espectro da luz solar (ondas curtas). Esta radiação é originada do aquecimento da atmosfera. A determinação de sua magnitude, sua variabilidade temporal e sua

modelagem são importantes para estudos em diversas áreas: Meteorologia, Ciências Agrárias, Engenharia Civil e Arquitetura entre outras.

Existem provas que as alterações das frações espectrais da radiação global dentro do ambiente protegido e é um fator que favorece no aumento de produção (DAL PAI, 2010). Galvani (2001) verificou aumento de 1,2 vezes na produção de pepino sob cultivo protegido em ciclo de primavera-verão. 3 a 4x maior no outro ciclo.

Na agricultura a importância da radiação de onda longa está na sua relação com o consumo hídrico de culturas. Por ser de natureza térmica, sua magnitude está relacionada com a quantidade de água que passa da fase líquida em lagos, no solo e nas plantas para a fase gasosa na atmosfera (DAL PAI, 2014). Como no ambiente protegido não há reposição natural de água pelas chuvas, a irrigação assume papel fundamental nesse sistema de cultivo, sendo a estimativa da evapotranspiração (ETo) indispensável para o manejo de água da cultura (FARIAS, 1992).

Existem vários métodos de estimação da ETo que vão desde os mais simples aos mais complexos e o fator limitante para escolha é a disponibilidade de dados meteorológicos. Um dos métodos mais completos e utilizado como padrão da FAO é o de Penman-Monteith, o qual carece de variáveis como: saldo de radiação à superfície da cultura, densidade do fluxo de calor do solo, temperatura média do ar, velocidade do vento, pressão de vapor de saturação, pressão parcial de vapor, declividade da curva de pressão de vapor de saturação e coeficiente psicrométrico.

No entanto, dentre esses elementos meteorológicos, o saldo de radiação é a entrada mais importante na equação Penman-Monteith; pois representa a energia disponível, na forma de calor latente, para que ocorra a mudança de fase da água no processo evapotranspirativo. Para a temperatura de 10°C, sua contribuição para a estimativa da ETo é de, no mínimo, 56%. Já para uma temperatura de 30°C, a contribuição mínima é de 82% da ETo (PEREIRA et al., 2013). Porém, quantificar o saldo de radiação não é tarefa simples devido aos entraves operacionais e elevado custo dos equipamentos de medida envolvidos.

Portanto, além de disponibilizar informações científicas e auxiliar produtores no manejo da irrigação e produção do lúpulo, este trabalho teve como objetivos: Apresentar a evolução temporal das medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação para a cultura do lúpulo em ambiente protegido e comparar os resultados obtidos com as medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação obtidas externamente ao ambiente protegido.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

1.2.1 Localização do experimento

O cultivo foi realizado nas instalações do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), pertencente a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), localizada no município de Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22º 51' S, longitude 48º 26' W e altitude de 786m. De acordo com a classificação de Köppen (SETZER, 1967), a região apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido).

O estudo foi desenvolvido em casa de vegetação, composta por estrutura metálica do tipo teto em arco, coberta com polietileno de baixa densidade transparente difusor (PEBD 100µm de espessura), pé direito de 2,5m e dimensões de 24m de comprimento por 7m de largura, com laterais fechadas por tela antiafídica.

1.2.2 Caracterização do experimento

As mudas de lúpulo da variedade cascade foram adquiridas da Hops Brasil, transplantadas em vasos e podadas com 20cm de altura, 40 dias após transplantio, para uniformização do tamanho e início do experimento.

Os vasos foram distribuídos em quatro fileiras de dez plantas ao espaçamento de 1m entre plantas e 1,5m entre linhas, sendo cada vaso com capacidade de 25 litros, totalizando 40 plantas. O sistema de condução das plantas foi feito através de bambú e fios de cizal com uma altura de 2,5m. Por necessidades climáticas favoráveis ao desenvolvimento da cultura (época mais quente em Botucatu-SP), o experimento iniciou dia 13 setembro de 2018 e se estendeu até dia 11 de fevereiro de 2019.

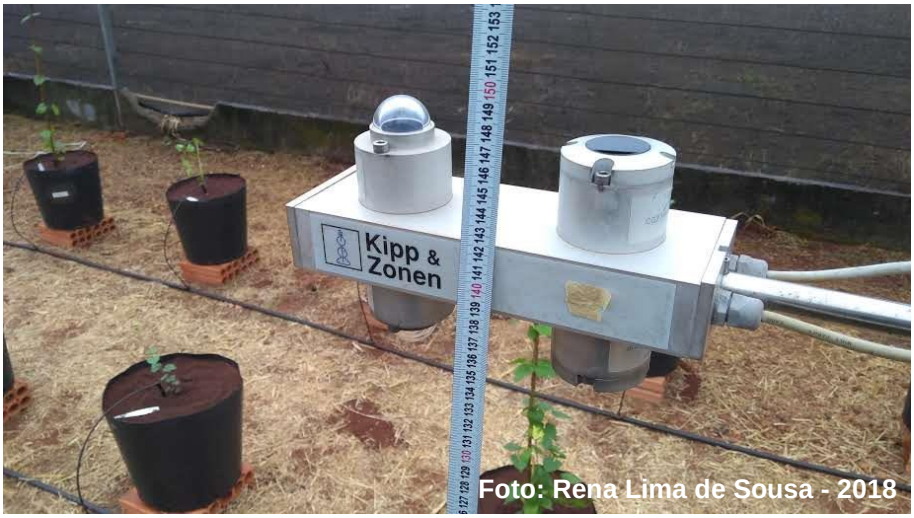
Ao longo do experimento realizaram-se as medidas de saldo de radiação, radiação global, radiação refletida, radiação atmosférica, radiação terrestre, temperatura do ar e umidade relativa do ar, dentro da casa de vegetação.

A cada cinco segundos o sistema de leitura (logger) realizava uma varredura automática dos sensores e a média registrada no dispositivo de armazenamento de dados a cada cinco minutos. Foram utilizados: 01 saldo radiômetro (Figura 1) modelo CNR1 *Net Radiometer* da marca *Kipp Zonen*® (medindo as radiações: global, refletida, atmosférica e terrestre) *e* 01 Termohigrômetro tipo HMP45C da marca *Vaisala* referenciadamente utilizados em estações meteorológicas e acoplados ao

datalogger. Acima do dossel da cultura, dentro da estufa, foi instalado um piranômetro adicional para registrar radiação global e tornar possível também a medida da quantidade de radiação interceptada pelo plástico da estufa.

O saldo radiômetro ficou localizado ao centro do local onde as mudas foram dispostas na estufa à uma altura de 1m da superfície dos vasos e o termohigrômetro na altura de 2m (Figura 1).

Figura 1 - Saldo radiômetro instalado no centro do experimento



A medida da radiação solar global externa foi fornecida pelo laboratório de radiometria da FCA/UNESP Botucatu-SP na mesma frequência de aquisição dos aparelhos montados no interior do ambiente protegido. Para realização do estudo, os dados da partição média-5-minutos de cada radiação foram integrados na partição diária e convertidos para mega joule através da equação 1:

$$X_{MJ} = \frac{\sum X_i \times 300}{1.000.000} \qquad \text{Eq. (1)}$$

$X_{MJ} =$ Valor de cada radiação diária integrada em MJ;

$\sum X_i =$ Somatório das médias de cinco minutos durante o dia;

A calibração dos sensores já é realizada anualmente pelo grupo de radiometria do laboratório pelo método de comparação, tendo como referência um piranômetro modelo PSP Eppley®. Este é destinado apenas para calibração e é guardado ao abrigo da luz. Porém, ao final do experimento, foi realizada uma nova comparação de medidas para confirmar a calibração.

1.2.3 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação para conduzir a água até a planta foi por gotejamento, sendo um emissor por planta do tipo autocompensante modelo CNL da Naadan Jain com vazão de 2L h^{-1}, os mesmos conectados aos vasos por microtubos.

Após a montagem dos sistemas de irrigação, foi realizado o teste de uniformidade de distribuição proposto por Criddle et al. (1956), pela equação 2, o qual obteve uniformidade de 98%:

$$CUD = \frac{q_{25}}{q} \qquad \text{Eq. (2)}$$

em que:

q_{25} = média de 25% das menores vazões coletadas (L h^{-1});

q= média das vazões coletadas (L h^{-1});

Em seguida, a eficiência do sistema (Ef), (Equação 3):

$$Ef = \frac{q_{min}}{q} \qquad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

Ef = eficiência de aplicação do sistema;

Q_{min} = vazão mínima (L h^{-1});

A evapotranspiração de referencia (ETo) foi estimada através da equação Penman – Monteith (Equação 4), proposta no manual FAO56 (ALLEN et al., 1998).

$$ETo = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn-G)+\gamma\frac{900}{T+27}U_2(es-ea)}{\Delta+\gamma(1+0{,}34\,U_2)} \qquad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

ETo = Evapotranspiração de referência, em mm d^{-1};

Rn = saldo de radiação à superfície, em MJ $m^{-2}d^{-1}$;

G = fluxo de calor no solo, em MJ $m^{-2}d^{-1}$;

T = temperatura do ar a 2 m de altura, em °C;

U_2 = velocidade do vento à altura de 2 m, em m s^{-1};

es = pressão de saturação de vapor, em KPa;

ea = pressão de vapor atual do ar, em KPa;

(es – ea) = déficit de pressão de vapor, em KPa;

Δ= declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em KPa °C^{-1};

γ = constante psicométrica, em KPa °C^{-1};

Estimada a evapotranspiração, a lâmina aplicada foi de reposição de 100% da evapotranspiração multiplicada pelo coeficiente de cultivo de cada fase fenológica exigida pela cultura.

1.2.4 Análise dos dados

Para eliminar possíveis erros de leitura dos sensores, foram aplicados filtros ao banco de dados para exclusão de valores discrepantes como: global interna maior que global externa, global e refletida menores que zero, refletida maior que global, atmosférica e terrestre total menor que zero, e balanço de ondas curtas menor que zero. Para dias com ausência de leituras devido instabilidade no sistema, os valores perdidos foram preenchidos com a média mensal do referido mês.

Foram calculados parâmetros estatísticos de dispersão e posição em médias diárias ao longo do ciclo.

Forma feitos gráficos temporais e relação entre as medidas por meio da razão entre a medição dentro e fora.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

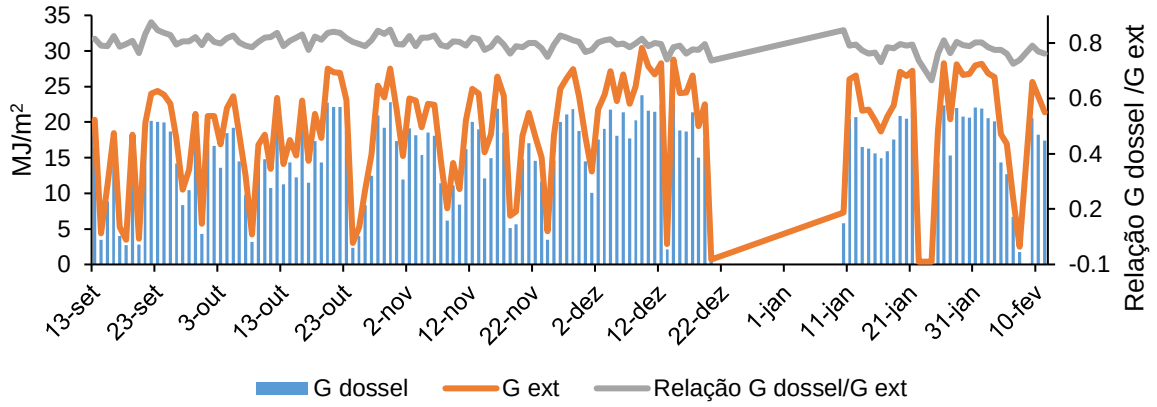
O estudo teve início dia 13 de setembro de 2018 e se encerrou quando as plantas entraram em senescência dia 11 de fevereiro de 2019. Entre os dias 20/12/2018 e 10/01/2019 houve uma falha de leitura em decorrência a problemas de armazenamento no datalogger.

1.3.1 Efeito da cobertura plástica na radiação solar

Para medir o efeito da interferência do plástico na radiação global dentro da estufa, foi instalado um piranômetro acima do dossel das plantas.

Na Figura 2 é mostrada a evolução diária da radiação solar global acima do dossel das plantas dentro da estufa (G_{dossel}), a radiação solar global fora da estufa (G_{ext}) e a relação entre elas (interferência do plástico).

Figura 2- Distribuição e relação da radiação solar global acima do dossel das plantas e fora da estufa



Durante o estudo, a (G $_{ext}$) acumulada foi 2928,4MJ/m^2 e a (G $_{dossel}$) acumulada foi 2326,5MJ/m^2; apresentando atenuação média promovida pelo plástico da estufa (100µm de espessura) de 21% onde parte da radiação direta foi refletida e parte convertida em radiação difusa, tornando a distribuição mais uniforme desta dentro da estufa. Tal fenômeno deve-se, além da interferência do plástico, às partículas de poeira naturalmente depositadas em sua superfície pelo vento. Boueri (2003), caracterizando o saldo de radiação em cultivo protegido de *Tagetes* sp. (cravo de defunto), observou atenuação de 33% (plástico da estufa com 150µm de espessura).

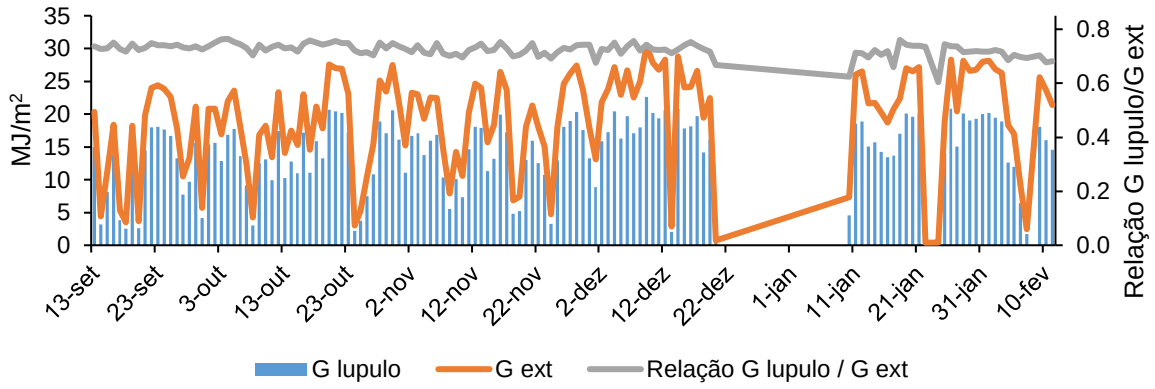
Durante todo o ciclo, o valor máximo de (G $_{dossel}$) foi 23,77MJ/m^2 em 09/12/2018 e o valor mínimo 0,28 MJ/m^2 em 24/01/2019; valores estes que seguiram a mesma tendência de máximo de mínimo de (G $_{ext}$) com 30,4 MJ/m^2 e 0,43 MJ/m^2 respectivamente.

Os valores máximos seguiram as variações astronômicas, já os valores mínimos ocorreram em janeiro e foram condicionados ao período chuvoso, onde há a grande incidência de nuvens.

1.3.2 Saldo radiômetro dentro e fora da estufa

Na Figura 3 é mostrada a evolução diária da radiação solar global sob influência do lúpulo (G lúpulo), radiação solar global fora da estufa (G $_{ext}$) e a relação entre elas.

Figura 3 - Distribuição e relação da radiação solar global dentro do dossel das plantas e fora da estufa

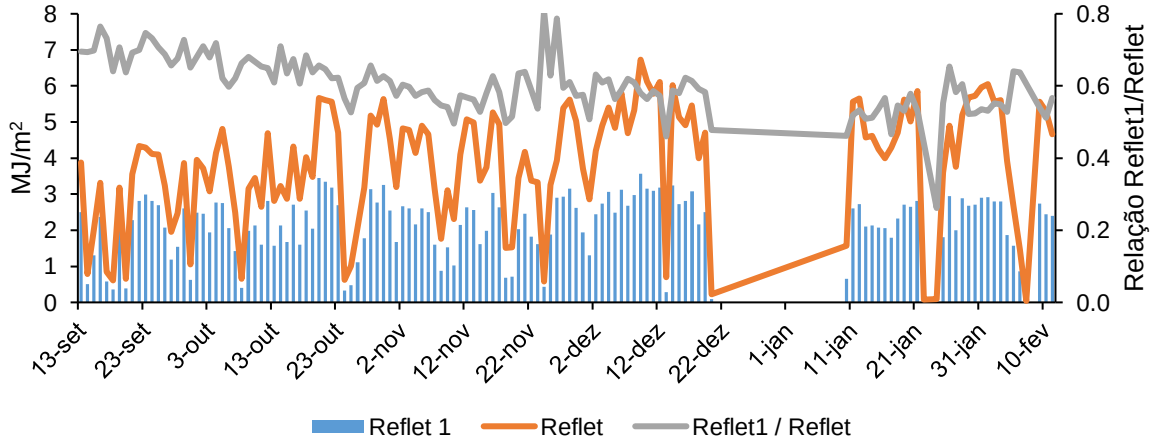


Embora 8% menor que a energia global que chega ao dossel, a radiação global dentro do dossel não apresentou declínio significativo ao longo do ciclo.

O valor máximo de (G lúpulo) foi 22,58 MJ/m2 em 09/12/2018 e valor mínimo 0,26 MJ/m2 em 24/01/2019; valores estes que seguiram a mesma tendência da Figura 2.

Na Figura 4 é mostrada a evolução diária da radiação solar refletida dentro da estufa, fora da estufa e a relação entre elas.

Figura 4 - Distribuição e relação da radiação solar refletida dentro e fora da estufa



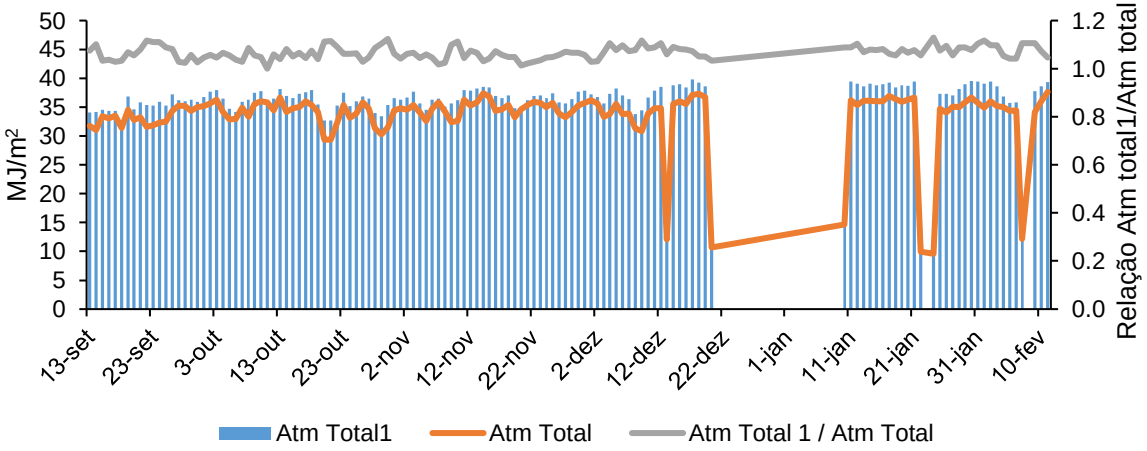
No interior da estufa o valor máximo de reflexão de ondas curtas foi 3,45 MJ/m^2 em 20/09/2018 e mínimo 0,02 MJ/m^2 em 24/01/2019. Fora da estufa, o valor máximo foi 6,73 MJ/m^2 em 09/12/2018 e mínimo 0,02 MJ/m^2 em 22/01/2019.

A partir do gráfico, a relação observada entre dentro e fora mostrou um declínio ao longo do período de cultivo. No início do cultivo observou-se um valor de 65%, já no final da cultura observou-se um valor de 51%. Este fato ocorreu devido à diminuição da refletida dentro, decorrente do crescimento da cultura e uma maior interceptação dos raios solares pelas folhas; como podemos observar o aumento da diferença e a queda da relação entre as medidas em função do avanço do ciclo de desenvolvimento.

Em média, a radiação solar refletida dentro da estufa e sob influência da cultura (Reflet 1) representou 55% da radiação solar refletida fora da estufa (Reflet). A influência climática, do ambiente protegido e a cor da superfície (solo) contribuíram para a menor reflectância dentro da estufa no cultivo.

Na Figura 5 é mostrada a evolução diária da radiação atmosférica total dentro da estufa, fora da estufa e a relação entre elas.

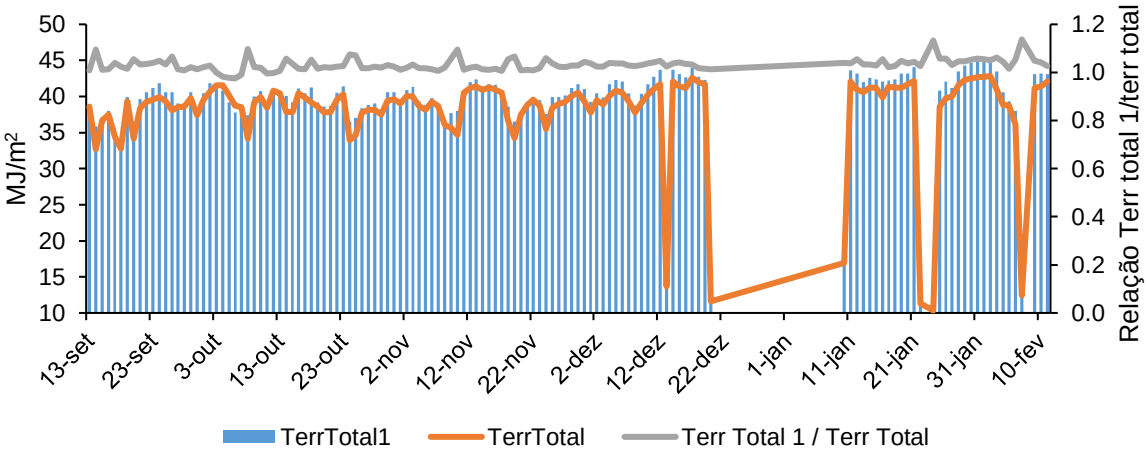
Figura 5 - evolução diária da radiação atmosférica total dentro e fora da estufa



Em média, a radiação atmosférica total dentro da estufa (35,7 MJ/m^2) é 7% maior que a radiação atmosférica total fora da estufa (33,5 MJ/m^2) e seguiram a mesma tendência durante todo o ciclo de cultivo. Por ser uma radiação termal (onda longa), essa elevação em relação ao ambiente externo está diretamente relacionada à emissão e retenção de calor pelo plástico e menor circulação de vendo dentro da estufa em função das estruturas de proteção lateral, o que mantém uma temperatura interna maior que a externa.

Na Figura 6, é mostrada a evolução diária da radiação terrestre total dentro da estufa, fora da estufa e a relação entre elas.

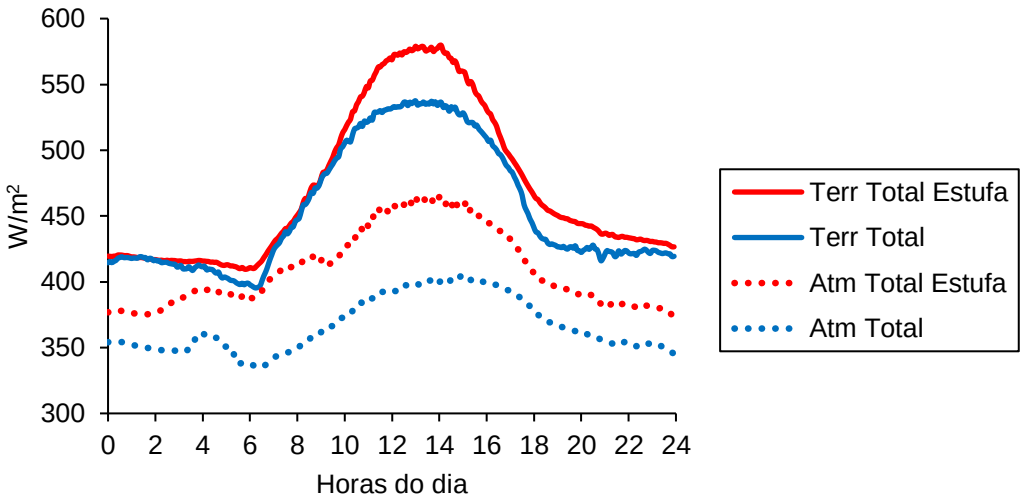
Figura 6 - Evolução diária da radiação terrestre total dentro e fora da estufa



Da mesma forma que a radiação atmosférica, a radiação terrestre no interior da estufa é maior (3%) que a radiação terrestre fora da estufa, visto que ela é uma radiação termal e também depende da temperatura.

Na Figura 7, foi escolhido o dia 22/09/2018 por representar um dia do início do ciclo, tendo assim pouca influência da cultura; possibilitando observar claramente o comportamento das radiações termais ao longo de um dia típico dentro e fora da estufa.

Figura 7 - Comportamento das radiações termais ao longo de um dia típico dentro e fora da estufa



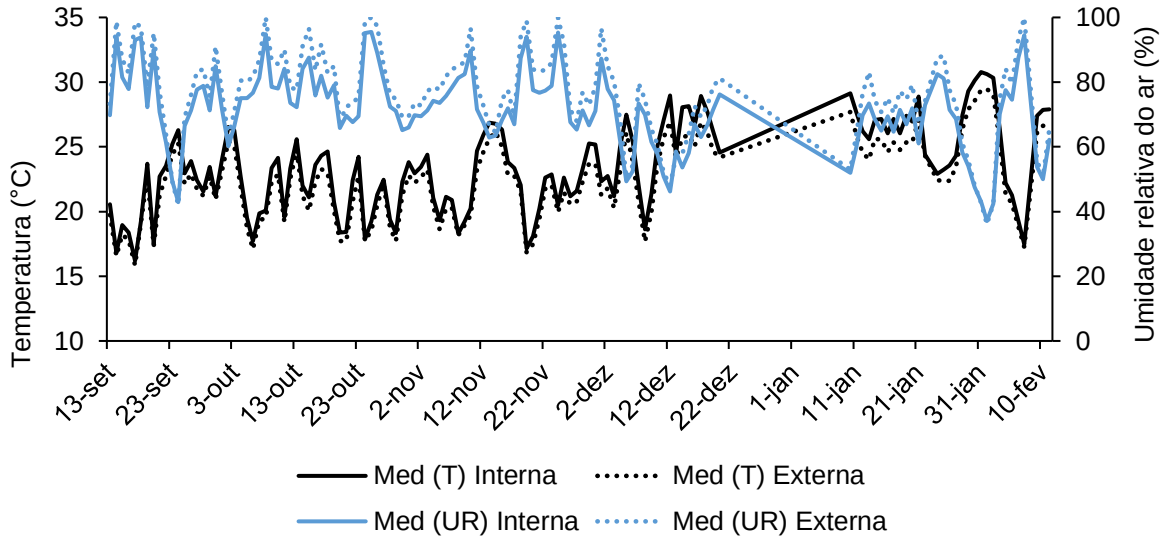
Nesta Figura pode-se comprovar os valores discutidos na Figura 5 e 6, onde a radiação de onda longa dentro da estufa é maior que fora e que a radiação terrestre

total dentro da estufa aumenta mais rápido e decresce mais lentamente por serem termais e estarem em ambiente com menor dissipação térmica.

De acordo com gráfico, pode-se observar uma inércia térmica menor no solo o qual se aquece e resfria mais rapidamente que a atmosférica.

Na Figura 8 é apresentada a evolução diária da temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR) dentro e fora da estufa e suas relações.

Figura 8 - Evolução diária da temperatura e umidade relativa do ar dentro e fora da estufa



O mês mais quente foi janeiro com 26,5°C e 21,4°C e o mês mais frio setembro, com 25,18°C e 20,7°C, dentro e fora da estufa respectivamente.

Já para UR, o mês mais úmido foi setembro com 76,74% e 82,21% e o mês mais seco janeiro, com 63,92% e 68,45%, dentro e fora da estufa respectivamente.

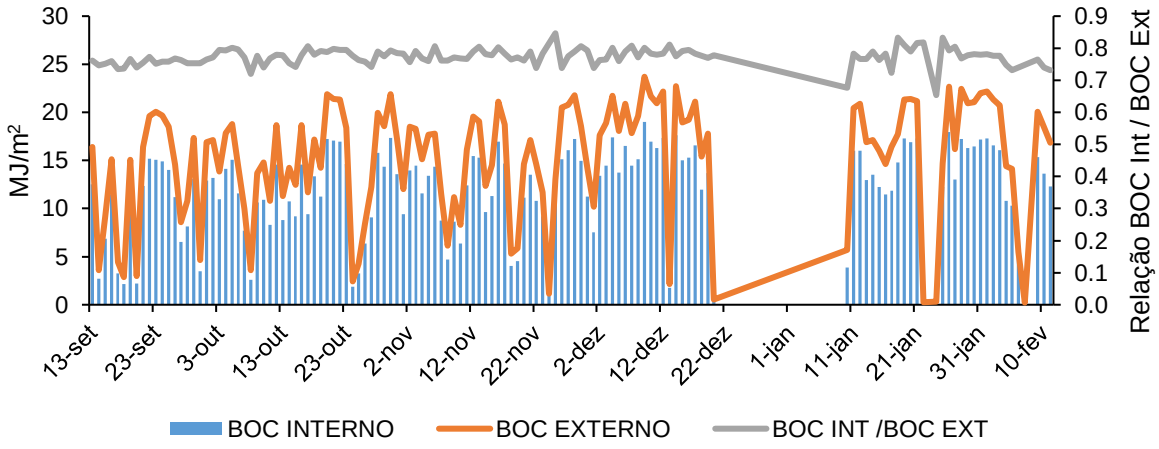
Para a temperatura, maiores valores foram registrados dentro da estufa em função da maior concentração de radiações termais.

Costa et at. (2004) comentam que a UR apresenta comportamento inverso à temperatura (T), visto que a atmosfera aquecida tem maior poder de retenção de água na forma de vapor e maior capacidade de refrigeração. Este efeito pode ser visualizado na Maior UR fora da estufa.

Os valores dentro da estufa seguiram a tendência de variação dos valores externos onde, na média, a relação da temperatura no interior foi 4% maior e UR 6% menor.

Na Figura 9 é mostrada a evolução diária do balanço de ondas curtas dentro da estufa (BOC Interno), fora da estufa (BOC Externo) e a relação entre eles.

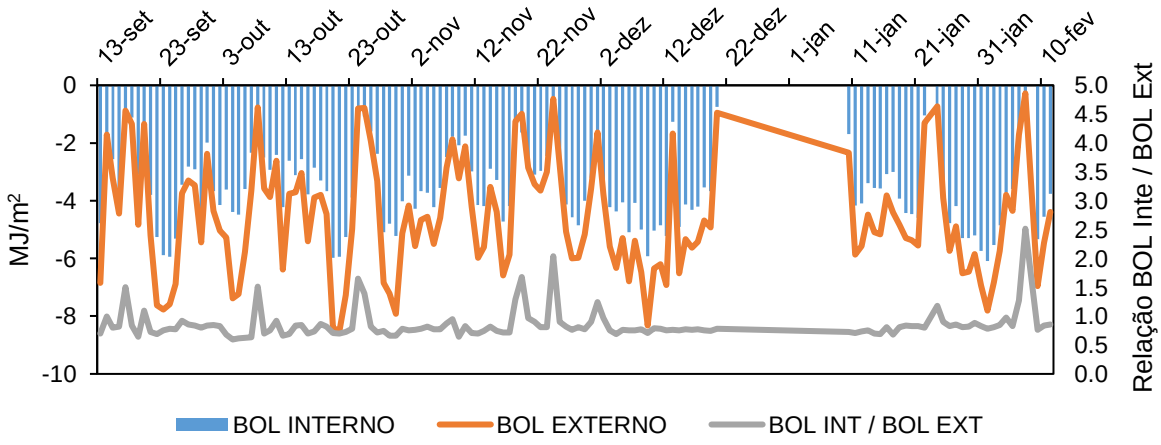
Figura 9 - Evolução diária do balanço de ondas curtas dentro e fora da estufa



Em média, o BOC Interno (11,8MJ.dia^{-1}) é 23% menor que o BOC Externo (15,2 MJ.dia^{-1}) e seguiram a mesma tendência durante todo o ciclo de cultivo. Por ser radiação de onda curta, a atenuação e difusão do plástico contribuíram para o menor BOC Interno.

Na Figura 10 é mostrada a evolução diária do balanço de ondas longas dentro da estufa (BOL interno), fora da estufa (BOL Externo) e a relação entre eles.

Figura 10 - Evolução diária do balanço de ondas longas dentro e fora da estufa

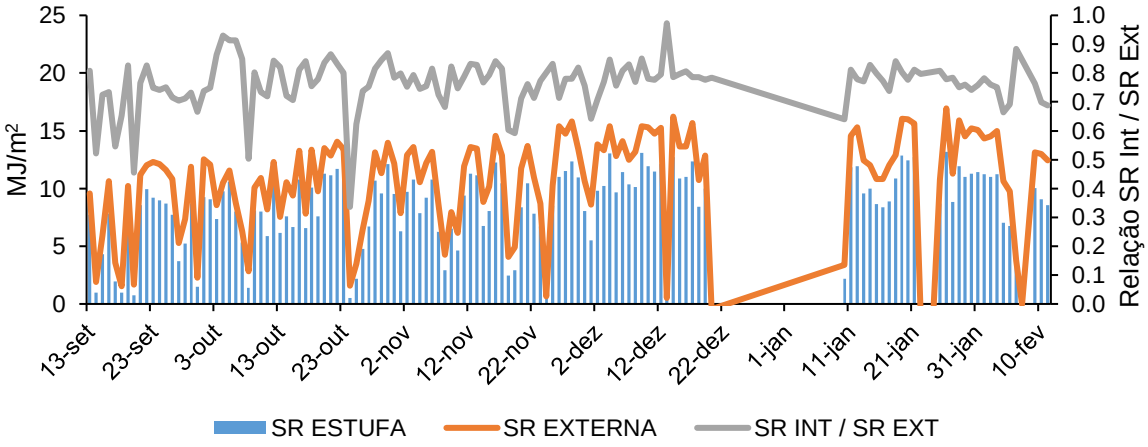


Na média, é 15% menor dentro da estufa; ou seja, o ambiente protegido preserva mais o balanço de onda longa (para BOL, quanto menor melhor por ser negativo - perdas).

O valor máximo de BOL Interno foi 6,08 MJ/m^2 em 01/02/2019 e mínimo 0,70 MJ/m^2 em 07/02/2019. Fora da estufa, o valor máximo foi 8,53 MJ/m^2 em 21/10/2018 e mínimo 0,28 MJ/m^2 em 07/02/2019. Os valores de mínimos foram condicionados por um dia chuvoso (8,9mm entre as 15h e 18h), nebuloso (Kt=0,06), frio (T média 17,5°C) e com velocidade do vento 2,5m/s; fatores estes que interferem nas irradiâncias termais.

Na Figura 11 é mostrada a evolução diária do saldo de radiação dentro da estufa (SR estufa), fora da estufa (SR Externo) e a relação entre eles.

Figura 11 - Evolução diária do saldo de radiação dentro e fora da estufa



O principal elemento responsável pela produtividade de uma cultura é a oferta de energia solar, à qual é condicionada por outros elementos como temperatura do ar e quantidade de água disponível no solo (HEALTH et al., 1985).

O SR interno acumulado durante o ciclo foi 1266,8MJ/m^2 e o SR externo foi 1624,65MJ/m^2. Em média, o SR dentro da estufa (8,2 MJ/m^2.dia^{-1}) foi 23% menor que o SR Externo (10,6 MJ/m^2.dia^{-1}). Galvani (2001), ao avaliar o saldo de radiação na cultura do pepino dentro e fora de estufa, no ciclo primavera-verão, obteve valores de (SR) 20% menor e produtividade 1,2 vezes maior no ambiente protegido. Demostrando assim a melhor qualidade de energia espectral e maior preservação de energia termal no cultivo protegido.

O valor máximo de SR dentro da estufa foi 13,07MJ/m^2 (09/12/2018) e mínimo -0,65MJ/m^2 (24/01/2019). O SR interno negativo significa que o BOL foi maior que o

BOC e que o ambiente perdeu energia para o meio (sem acúmulo de energia líquida disponível).

Para o SR Externo, o valor máximo foi 16,22 MJ/m^2 (14/12/2018) e mínimo -0,40MJ/m^2 (24/01/2019); ou seja, BOL>BOC.

Comparando os valores mínimos de SR dentro e fora da estufa podemos observar que, no mesmo dia, o ambiente externo perdeu menos energia que o ambiente protegido; tal fato ocorre pelo ambiente protegido receber menos energia de onda curta (atenuação do plástico) e aquecer menos, gerando assim uma maior perda de temperatura do solo/plantas para o meio quando BOC<BOL.

1.3.3 Interceptação de energia pela cultura do lúpulo

Para verificar a influência dos níveis energéticos na produtividade da cultura do lúpulo foi calculado o albedo, que é a razão da radiação refletida em função da global.

Foi perceptível a influência da superfície reflexiva dentro da estufa (cor do solo), fora da estufa (cor da grama) e o declínio do albedo interno com o desenvolvimento da cultura como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Albedo médio mensal dentro e fora da estufa durante o cultivo

Meses de cultivo	Albedo Estufa	Albedo Externo
Setembro	0,16	0,18
Outubro	0,16	0,20
Novembro	0,15	0,21
Dezembro	0,15	0,21
Janeiro	0,14	0,20
Fevereiro	0,14	0,20
Média geral	**0,15**	**0,20**

Podemos observar um albedo médio 25% maior fora da estufa por conta do maior poder reflexivo do gramado e valor este relativamente constante à geometria solar. Já dentro da estufa, o albedo foi menor em função do diferente poder reflexivo do solo nú e seu decréscimo com desenvolvimento da cultura em função da maior interceptação pelas folhas da radiação refletida.

No Quadro 2 é apresentado um resumo do acúmulo de energias de todas as radiações durante o ciclo produtivo dentro da estufa.

Quadro 2 - Acúmulo de energias de todas as radiações durante o ciclo produtivo dentro da estufa

Meses de cultivo	Kt	Global	Refletida	Atmosférica total	Terrestre total	Saldo de radiação
		----------MJ/m^2----------				
Setembro	0,43	197,9	31,7	634,7	696,1	105,3
Outubro	0,49	423,9	67,2	1119,5	1227,3	249,6
Novembro	0,46	403,6	61,0	1099,1	1194,9	247,1
Dezembro	0,54	503,9	78,6	1081,1	1205,5	301,0
Janeiro	0,51	464,6	64,7	1076,0	1190,9	284,8
Fevereiro	0,50	139,7	20,6	354,7	395,0	79,0
TOTAL	**0,50**	**2133,6**	**323,8**	**5365,0**	**5909,8**	**1266,8**

Setembro e fevereiro não foram considerados na análise do Kt, por não serem meses completos em função da data de início e término do experimento. Dezembro foi o mês de maior acúmulo energético por apresentar dias menos nebulosos (maior Kt). Maiores valores de Kt estão ligados a maiores valores de saldo de radiação enquanto menores valores de Kt estão ligados à menores valores de saldo.

Durante todo o ciclo, foi contabilizada uma energia líquida disponível de 1266,8MJ/m^2 dentro da estufa à qual foi interceptada pela cultura e viabilizou a produção média de 45g.planta^{-1} de cones frescos; demonstrando uma relação de 28,15MJ/g; ou seja, para produzir 1kg de cones frescos (inflorescência) seriam necessários 28150MJ/m^2 de energia líquida disponível no primeiro ciclo de produção do lúpulo. Galvani (2001), ao avaliar esse mesmo parâmetro no pepino em cultivo protegido (ciclo primavera-verão), obteve relação de 34,7MJ/kg (fruto). Guimarães (2020), ao avaliar níveis de pH da água de irrigação em lúpulo sob cultivo protegido, obteve em seu melhor resultado a produtividade de18g.planta^{-1}, resultado também em primeiro ciclo produtivo.

A produção plena começa a partir das reservas de carboidrato presentes no sistema radicular após o período de dormência, proporcionando ramos iniciais vigorosos e sadios até atingirem a maturidade de sintetizar a própria demanda energética sem o total esgotamento das reservas. Portanto, no primeiro ano de plantio é normal que ocorra pouca ou nenhuma produtividade de cones, pois o estabelecimento da planta e a robustez do sistema radicular ainda estão em formação.

O pico de produção ocorre no segundo ou terceiro ano após implantação do pomar (SPÓSITO et al., 2019).

O uso dos fotoassimilados podem ser utilizados tanto para incremento da capacidade fotossintética, por meio do aumento da área foliar, como armazenamento em biomassa (ZELITCH, 1982).

Taiz et al. (2017) menciona que a produtividade de uma cultura está relacionada à quantidade total de luz recebida durante o ciclo de desenvolvimento. Desde que suprida com água e nutrientes, quanto mais luz receber mais alta é produção de biomassa.

Em média, cada planta apresentou 2617,7cm^2 de área foliar total, 216 folhas e cada folha com 12,2cm^2. Já Guimarães (2020), obteve área foliar total de apenas 1786,2cm^2.planta^{-1}. Tal diferença está diretamente relacionada ao número de folhas por planta, incidência de agentes desfolhadores (pragas e doenças), duração do ciclo, densidade de plantas, adubação e efeitos de tratamento.

Para o estudo do acúmulo de biomassa, avaliou-se a massa seca e fresca das folhas e dos caules. Os caules foram mais fibrosos apresentando 22% contra 14% de matéria seca das folhas. Alves (2018), avaliando a influência da rega na produção de lúpulo (variedade Nugget), obteve em média 22,7% de matéria seca.

1.4 CONCLUSÕES

A partir desse estudo, conclui-se:

- ✓ A atenuação média promovida pelo plástico da estufa (100μm de espessura) foi de 21%.
- ✓ O balanço de ondas curtas dentro da estufa foi menor quando comparado ao externo.
- ✓ O balanço de ondas longas dentro da estufa foi maior quando comparado ao externo.
- ✓ A radiação terrestre total dentro da estufa aumenta mais rápido e decresce mais lentamente.
- ✓ Foi perceptível a influência da superfície reflexiva dentro da estufa (cor do solo), fora da estufa (cor da grama) e o desenvolvimento da cultura através do albedo.
- ✓ O saldo de radiação acumulado durante o ciclo foi 1266,8MJ/m^2 e é 23% menor que o saldo de radiação externo.

- ✓ Embora com saldo de radiação menor dentro da estufa, o ambiente protegido preserva mais o balanço de onda longa, que é essencial para os processos fisiológicos e metabólicos da planta.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. **Crop evapotranspiration guideliness for computing crop water requirementes.** Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, F. C. **Influência da rega na produtividade e na qualidade da produção do lúpulo (Humulus lupulus L.), variedade Nugget, na região da Galiza**. Dissertação de Mestrado. ISA/Universidade de Lisboa, Portugal, 2018.

BOUERI, M. A.; **Caracterização do saldo de radiação em ambiente protegido e a campo e seus efeitos sobre as necessidades hídricas do cravo-de-defunto (Tagetes sp.).** Dissertação de mestrado. FCA/UNESP-Botucatu, Botucatu, 2003.

COSTA, E.; LEAL, P. A. M.; CARMO JUNIOR, R. R. Modelo de simulação da temperatura e umidade relativa do ar no interior de estufa plástica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 24, n. 1, p. 57-67, 2004.

DAL PAI, E. **Radiações e frações solares UV, PAR, IV, em estufa de polietileno: evolução anual, média mensal diária e equações de estimativa.** Dissertação de mestrado. FCA/UNESP-Botucatu, Botucatu, 2010.

DAL PAI, E. **Modelos de estimativa da radiação atmosférica em função da temperatura, umidade e dos índices radiométricos Kt e Kd para Botucatu-SP.** Tese (Doutorado em agronomia). FCA/UNESP-Botucatu, Botucatu, 2014.

FARIAS, J.R.B. Manejo da irrigação associado ao uso de coberturas plásticas. In: Bergamaschi, H.; Berlato, M.A.; Fontana, D.C.; et al. Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: Ed. Universitária/UFRGS, 125p, 1992, p.109-115.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (Cucumis sativus L.) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. Tese de Doutorado. FCA/UNESP-Botucatu, 2001.

GETTY, Brooke A. **Induced Mutation for Improving Cascade and Centennial Hop**. Master of Science. Oregon State University, 2019.

GUIMARÃES, J. J. **Comportamento agronômico do lúpulo (Humulus lupulus L.) em cultivo protegido submetido a irrigações com diferentes faixas de pH da água na região de Botucatu-SP**. Dissertação de Mestrado. FCA/UNESP-Botucatu-SP, 2020.

HEALTH, T., BARNES, R., MELTCALFE, D. Forages. Ames: 4a ed., Iowa University Press, 1985. 643p.

IHGC. 2019. International Hop Growers Convention. : 45.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; MOUSAZADEH, H., Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. **European Journal of Agronomy**, v. 50, p. 29-37, 2013.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração.** Campinas: FUNDAG, 323 p., 2013.

SARRAF, C.; **Étude du potentiel nutraceutique de la culture du houblon au Québec.** Thèse. Université Laval. Québec - Canada. 2015.

SETZER, J. Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo. Comissão interestadual da Bacia Paraná- Uruguai, São Paulo, 1967.

SPÓSITO, M. B; ISMAEL, R. V.; BARBOSA, C. M. A.; TAGLIAFERRO, A. L. **A cultura do lúpulo.** Piracicaba, SP: Esalq - Divisão de Biblioteca, 2019. 81 p. (Série Produtor Rural, 68).

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. **Methods for Evaluating Irrigation Systems.** Washington, DC: Soil Conservation Service - USDA, Agricultural Handbook, n. 82, 1956.

TAIZ, L.et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, Editado como livro impresso em 2017. ISBN 978-85-8271-367-9.

ZELITCH, I. 1982. The close relationship between net photosynthesis and crop yield. **BioScience32**: 796-802; 1982.

CAPÍTULO 2
MODELOS PARA ESTIMAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E SEUS COMPONENTES NA CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO

2.1 INTRODUÇÃO

A evolução do mercado cervejeiro nacional e internacional nos últimos anos, juntamente com o segmento das cervejas artesanais, colocaram em evidência a cultura do lúpulo. Com este novo segmento de consumidores, veio a demanda por ingredientes com características organolépticas especiais e de maior qualidade; aumentando a procura de lúpulo cultivado localmente (TURNER et al., 2011; ALVES, 2018).

No entanto, o plantio de lúpulo no território Brasileiro é um desafio. Por ser uma cultura nova no país, há poucos estudos na área, principalmente com foco em adaptação climática, temperatura, nutrição, solo, disponibilidade hídrica, entre outros.

A produção bem sucedida do lúpulo depende, dentre vários fatores, da irrigação, principalmente para os dois maiores produtores de lúpulo do mundo, Vale do Yakima nos Estados Unidos e Halertau na alemanha. Nessas localidades, a irrigação é indispensável por conta da baixa ocorrência de chuvas e períodos prolongados de seca durante o período de cultivo (GRAF et al., 2019). Assim, o dimensionamento e manejo inadequado de sistemas de irrigação tem impacto direto na produtividade e nos custos operacionais de implantação da cultura.

Dessa forma, as opções de manejo da irrigação vão desde o uso de sensores de umidade do solo e tensiômetros até o uso de dados meteorológicos para quantificar a evaporação de água de uma superfície gramada. Juntamente com o coeficiente de cultivo da cultura, é possível chegar à lâmina líquida necessária para seu desenvolvimento e produção (ALLEN et al., 1998).

Para que ocorra a evaporação da água é necessária uma diferença da pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar que a envolve e uma fonte de energia para a mudança de fase. Um dos métodos mais utilizado na estimativa da evaporação da água em superfícies livres é o de Penman (1948) e este combina a transferência de massa e o saldo de energia (PEREIRA et al., 2013). Posteriormente esse método foi reformulado para cálculo da evapotranspiração de referência levando em consideração a resistência do dossel à difusão do vapor d'água através do calor sensível e latente, se tornando a equação de Penman-Monteith recomendada pela

FAO-56 (equação 1). Valores precisos da evapotranspiração são importantes para o correto cálculo da lâmina de irrigação, principalmente em ambiente protegido onde não há incidência de precipitação.

$$ETo = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn-G)+\gamma\frac{900}{T+27}U_2(es-ea)}{\Delta+\gamma(1+0{,}34\,U_2)} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

ETo = Evapotranspiração de referência, em mm d^{-1};

Rn = saldo de radiação à superfície, em MJ $m^{-2}d^{-1}$;

G = fluxo de calor no solo, em MJ $m^{-2}d^{-1}$;

T = temperatura do ar a 2 m de altura, em °C;

U_2 = velocidade do vento à altura de 2 m, em m s^{-1};

es = pressão de saturação de vapor, em KPa;

ea = pressão de vapor atual do ar, em KPa;

(es – ea) = déficit de pressão de vapor, em KPa;

Δ= declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em KPa $°C^{-1}$;

γ = constante psicométrica, em KPa $°C^{-1}$;

Como o processo evapotranspirativo da cultura demanda um consumo energético para mudança de fase da água, o saldo de radiação é o parâmetro mais importante do modelo de Penman-Monteith. Para a temperatura de 10°C, sua contribuição para a estimativa da ETo é de, no mínimo, 56%. Já para uma temperatura de 30°C, a contribuição mínima é de 82% da ETo (PEREIRA et al., 2013). Isso permite entender o bom desempenho de métodos empíricos baseados apenas em temperatura e/ou radiação solar.

No entanto, quantificar o saldo de radiação não é tarefa simples devido aos entraves operacionais e elevado custo dos equipamentos de medida envolvidos. Uma alternativa é propor modelos para estimação do saldo de radiação e suas componentes em função de um parâmetro mais facilmente medido, como é o caso da radiação solar global. Atualmente, o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) possui 589 estações meteorológicas automáticas espalhadas pelo Brasil que medem a radiação solar global e que podem ser consultadas de forma online e gratuita através do site: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos.

Portanto, o objetivo deste trabalho é propor modelos para estimação do saldo de radiação e suas componentes no interior de um ambiente protegido com a cultura do lúpulo em função da radiação solar global medida externamente.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Localização do experimento

O cultivo foi realizado nas instalações do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), pertencente a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), localizada no município de Botucatu, Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22º 51' S, longitude 48º 26' W e altitude de 786m. De acordo com a classificação de Köppen (SETZER, 1967), a região apresenta clima do tipo Cwa (clima subtropical úmido).

O estudo foi desenvolvido em casa de vegetação, composta por estrutura metálica do tipo teto em arco, coberta com polietileno de baixa densidade transparente difusor (PEBD 100μm de espessura), pé direito de 2,5m e dimensões de 24m de comprimento por 7m de largura, com laterais fechadas por tela antiafídica.

2.2.2 Caracterização do experimento

As mudas de lúpulo da variedade cascade foram adquiridas da Hops Brasil, transplantadas em vasos e podadas com 20cm de altura 40 dias após transplantio para uniformização do tamanho e início do experimento.

Os vasos foram distribuídos em quatro fileiras de dez ao espaçamento de 1m entre plantas e 1,5m entre linhas, sendo cada vaso com capacidade de 25 litros, totalizando 40 plantas. O sistema de condução das plantas foi feito através de bambú e fios de cizal com uma altura de 2,5m.

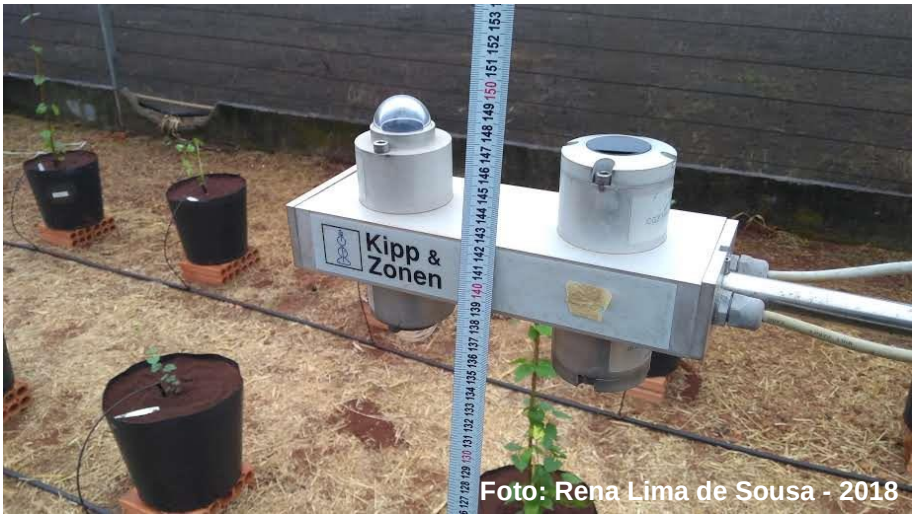
A irrigação foi por gotejamento, sendo um emissor por planta do tipo autocompensante modelo CNL da Naadan Jain com vazão de 2L h^{-1}, os mesmos conectados aos vasos por microtubos. A evapotranspiração de referencia (ETo) foi estimada através da equação Penman – Monteith, proposta no manual FAO56 (ALLEN et al., 1998) e a lâmina aplicada foi reposição de 100% da evapotranspiração exigida pela cultura.

Por necessidades climáticas favoráveis ao desenvolvimento da cultura (época mais quente em Botucatu-SP), o experimento iniciou dia 13 setembro de 2018 e se estendeu até dia 11 de fevereiro de 2019.

Ao longo do experimento realizaram-se as medidas de saldo de radiação, radiação global, radiação refletida, radiação atmosférica, radiação terrestre, temperatura do ar e umidade relativa do ar, dentro da casa de vegetação.

A cada cinco segundos o sistema de leitura (logger) realizava uma varredura automática dos sensores e a média registrada no dispositivo de armazenamento de dados a cada cinco minutos. Foram utilizados: 01 saldo radiômetro (Figura 1) modelo CNR1 *Net Radiometer* da marca *Kipp Zonen*® (medindo as radiações: global, refletida, atmosférica e terrestre) *e* 01 Termohigrômetro tipo HMP45C da marca *Vaisala* referenciadamente utilizados em estações meteorológicas e acoplados ao datalogger.

Figura 1 - Saldo radiômetro instalado no centro do experimento



O saldo radiômetro ficou localizado ao centro do experimento à uma altura de 1m da superfície do vaso e o termohigrômetro na altura de 2m. A medida radiação solar global externa foi fornecida pelo laboratório de radiometria da FCA/UNESP Botucatu-SP na mesma frequência de aquisição dos aparelhos montados no interior do ambiente protegido. Para realização do estudo, os dados da partição média-5-minutos de cada radiação foram integrados na partição diária e convertidos para mega joule através da equação 2:

$$X_{MJ} = \frac{\sum \bar{X} \times 300}{1.000.000} \quad \text{Eq. (2)}$$

X_{MJ} = Valor de cada radiação diária integrada em MJ;

$\sum \bar{X}$ = Somatório das médias de cinco minutos durante o dia;

A calibração dos sensores já é realizada anualmente pelo grupo de radiometria do laboratório pelo método de comparação, tendo como referência um piranômetro modelo PSP Eppley®. Este é destinado apenas para calibração e é guardado ao abrigo da luz. Porém, ao final do experimento, foi realizada uma nova comparação de medidas para confirmar a calibração.

2.2.3 Análise dos dados

Para eliminar possíveis erros de leitura dos sensores, foram aplicados filtros ao banco de dados para exclusão de valores discrepantes como: global interna maior que global externa, global e refletida menores que zero, refletida maior que global, atmosférica e terrestre total menor que zero, e balanço de ondas curtas menor que zero. Para dias com ausência de leituras devido instabilidade no sistema, os valores perdidos foram preenchidos com a média mensal do referido mês.

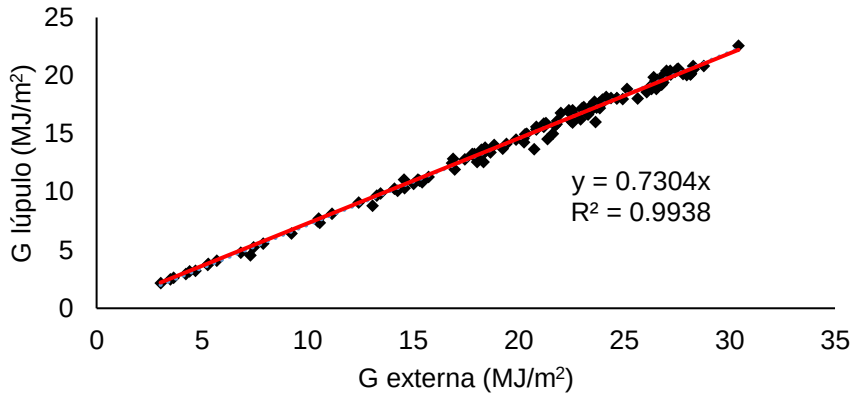
Foram calculados parâmetros estatísticos de dispersão e posição em médias diárias ao longo do ciclo. Foi realizada a correlação e regressão dos dados utilizando o método dos mínimos quadrados para obtenção dos modelos para estimação. Foi analisada a relação de correspondência entre radiação global e as frações de radiação dentro da estufa, afim de identificar equações de regressão para estimativas das mesmas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresentará equações simples de estimativa do saldo de radiação e seus componentes no cultivo de lúpulo em ambiente protegido em função da radiação solar global medida externamente. Serão apresentadas equações para estimativa da radiação global interna, da radiação refletida, da radiação terrestre, da radiação atmosférica, do balanço de ondas curtas, do balanço de ondas longas e, finalmente, do saldo de radiação. Todas os modelos para estimação propostos no estudo relacionam os valores integrados em MJ/m^2 em escala diária.

A Figura 2 mostra a correlação entre as radiações solares global interna e externa na cultura do lúpulo em ambiente protegido.

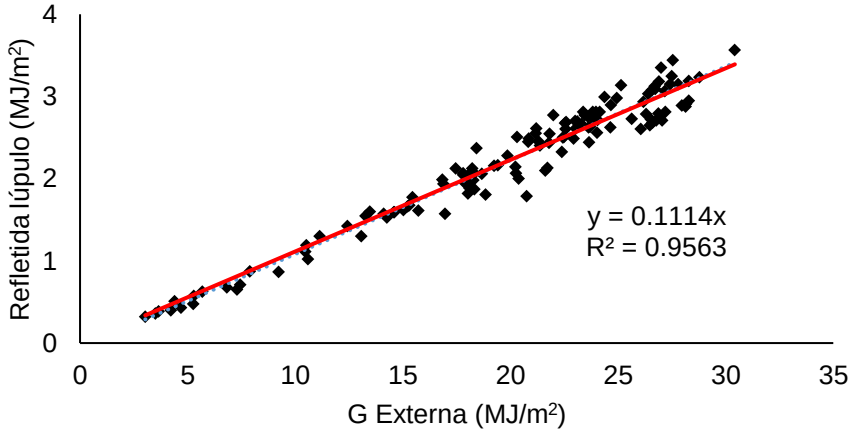
Figura 2 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e na cultura do lúpulo em ambiente protegido



A radiação solar global dentro do dossel representou 73% da radiação global medida externamente, com coeficiente de determinação de 99%; essa redução de 27% na radiação global interna deve-se à atenuação por absorção e reflexão pelo polietileno da cobertura e interceptação pelas folhas da cultura do lúpulo. Dal Pai (2010), em estudo o qual mediu as radiações dentro de estufa de polietileno, avaliando apenas a atenuação provocada pelo plástico, obteve relação de 75,80% entre as radiações globais dentro e fora da estufa. Normalmente, essa redução varia entre 20% a 30% dependendo da espessura do polietileno, tempo de uso e até mesmo deposição natural de partículas na superfície.

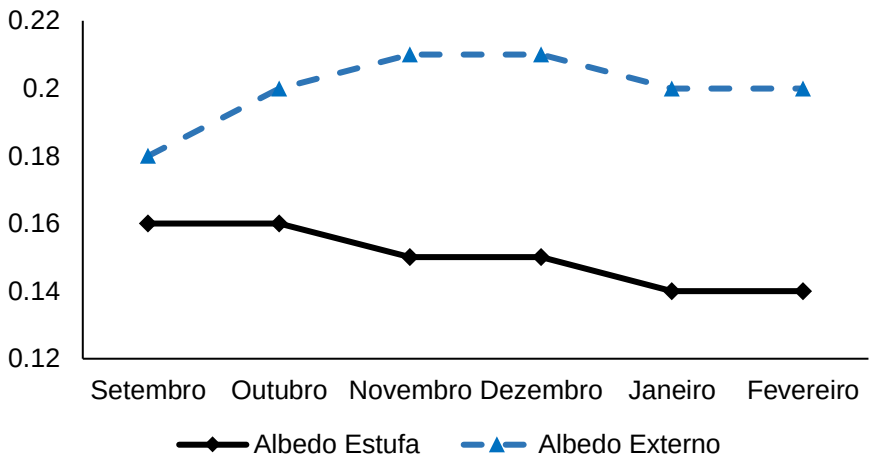
No estudo, também foi relacionada a radiação solar global fora da estufa com a radiação refletida na cultura do lúpulo em ambiente protegido e é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e a radiação solar refletida na cultura do lúpulo em ambiente protegido



Verificou-se regressão linear positiva entre a radiação solar global externa e a radiação solar refletida dentro da estufa com cultivo do lúpulo com coeficiente angular de 0,1114. Ou seja, a radiação solar refletida dentro da estufa (plástico 100µm de espessura) é 11,14% da radiação solar global externa. O coeficiente de determinação superior a 95% indica que as irradiações estão bem correlacionadas e mostra que a radiação solar global fora da estufa pode ser um parâmetro confiável para estimativa da radiação solar refletida na cultura do lúpulo em ambiente protegido por meio do modelo proposto. A grande atenuação sofrida no coeficiente está relacionada à fatores como a transmissividade do plástico, cor e poder reflexivo do solo, interceptação da radiação pelas folhas bem como seu tamanho, formato e ângulo de inserção. A ação das folhas de lúpulo na interceptação da radiação solar refletida ao longo do ciclo pode ser observada na Figura 4, que mostra o albedo de dentro e fora da estufa.

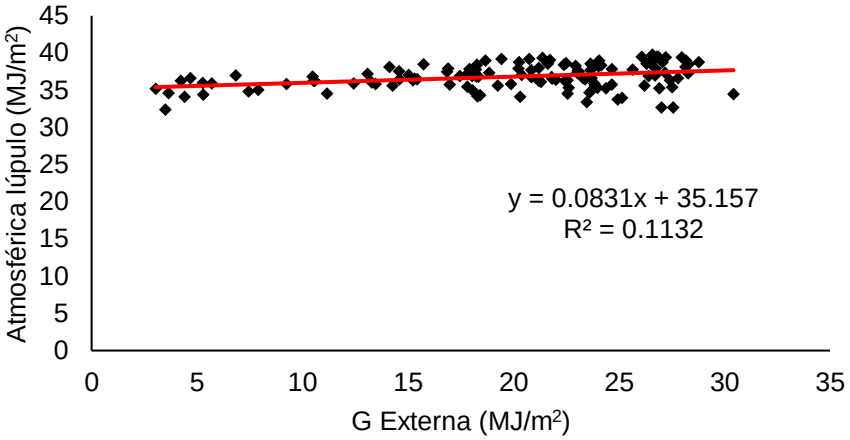
Figura 4 - Albedo fora da estufa e no cultivo do lúpulo em ambiente protegido



O Albedo externo é maior que o albedo interno em função das diferentes coberturas de solo. Enquanto no ambiente externo a estação meteorológica está em uma área gramada, no interior da estufa temos o solo nú, o qual apresenta um coeficiente de absorção maior, justificando seus menores valores de albedo. A evolução no tempo mostra que enquanto fora da estufa há um aumento do albedo durante os primeiros meses de cultivo, dentro da estufa há um decréscimo, acentuado principalmente de setembro a novembro. Essa redução, identificada entre o início e o fim do ciclo, é de 14% e deve-se à maior absorção de energia pelo desenvolvimento do caule, área foliar e sombreamento da cultura com a formação dos dosséis. Assim como nas radiações de onda curta, também foram avaliadas equações para estimativa

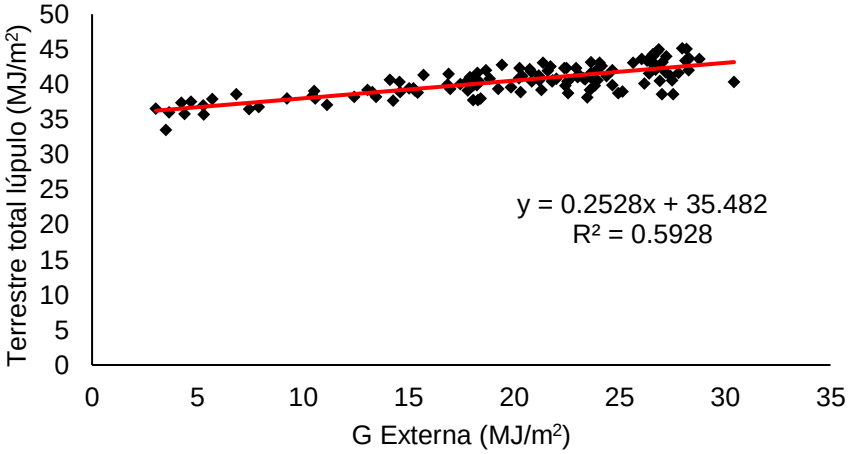
das radiações de onda longa no cultivo de lúpulo em ambiente protegido a partir da radiação solar global externa, apresentadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e a radiação atmosférica total na cultura do lúpulo em ambiente protegido



O coeficiente de determinação baixo, de 11%, mostra que a radiação solar global externa não é adequada para estimar e explicar as variações na radiação atmosférica total. Observa-se que a radiação atmosférica apresenta praticamente um valor constante (pequena variação de 34 a 38 MJ/m^2) para todo o intervalo de variação da radiação solar global externa (2 a 34 MJ/m^2). Isso ocorre em função da natureza diferente das radiações. Enquanto a radiação global externa é uma radiação de ondas curtas, a radiação atmosférica é de ondas longas e, portanto, uma radiação termal, o que explica a dificuldade de correlação entre elas. Assim, a radiação global externa tem baixo poder de explicar radiação atmosférica total na cultura do lúpulo em ambiente protegido.

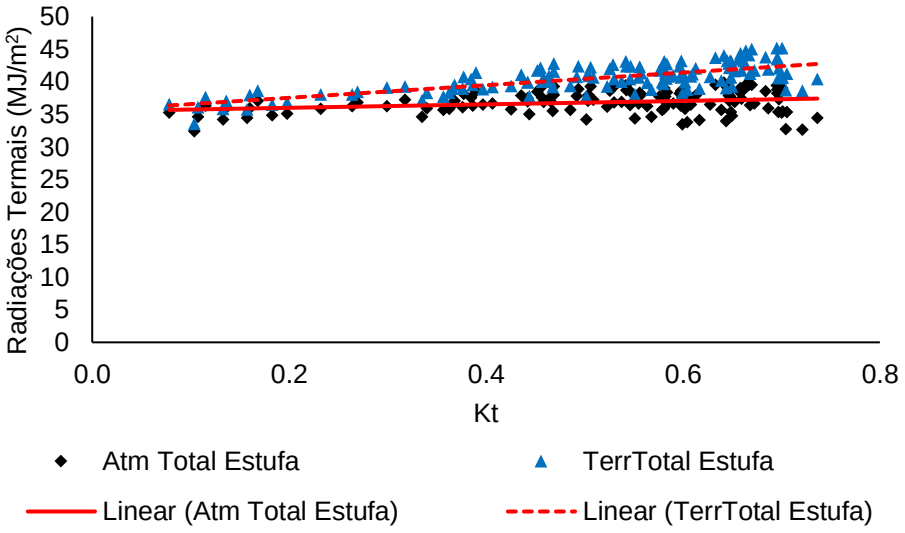
Figura 6 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e a radiação terrestre total na cultura do lúpulo em ambiente protegido



A radiação terrestre total apresenta o mesmo comportamento da radiação atmosférica total quando correlacionada com a radiação global externa, ou seja, uma correlação baixa conforme verificado pelo coeficiente de determinação igual a 59%. A radiação terrestre também é uma radiação de onda longa (radiação termal) e, portanto, não pode ser explicada adequadamente pela radiação global externa, que é uma radiação de onda curta.

A radiação de onda curta proveniente do sol, ao penetrar na atmosfera, interage com os constituintes atmosféricos, ocorrendo os processos de reflexão, espalhamento, transmissão e absorção. Tanto o solo como a atmosfera absorvem essa energia e passam, então, a emitir radiação de onda longa. Portanto, apesar das radiações atmosférica e terrestre não apresentarem boas correlações com a radiação solar global externa, foram plotados os valores de radiação terrestre e atmosférica em função da transmissividade atmosférica Kt (Figura 7), visto que trabalhos da literatura (DAL PAI, 2014 e ESCOBEDO et al., 2009) mostram correlações entre a transmissividade atmosférica e radiação de onda curta.

Figura 7 - Relação entre o Kt e as radiações de onda longa



A transmissividade atmosférica Kt é a razão entre as radiações solares global e extra terrestre (Kt=Hg/Ho) e representa a intensidade de radiação transmitida pela atmosfera. Valores próximos de zero indicam baixa transmissão, característico de céu nublado. Valores próximos de 1 indicam elevada transmissão, característicos de dias de céu aberto (ESCOBEDO et al., 2009). Pela Figura 7 observa-se então que as radiações de onda longa, tanto atmosférica como terrestre, não apresentam

dependência da cobertura de céu, apresentando um valor praticamente constante de 35MJ/m^2 independente da nebulosidade. Dessa forma, conclui-se que as radiações termais não apresentam dependência da radiação global e da nebulosidade.

Os balanços de onda curta e longa também foram correlacionados com a radiação global externa. As Figuras 8 e 9 mostram as correlações dos balanços de onda curta e longa em função da radiação solar global externa, respectivamente:

Figura 8 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e o balanço de ondas curtas na cultura do lúpulo em ambiente protegido

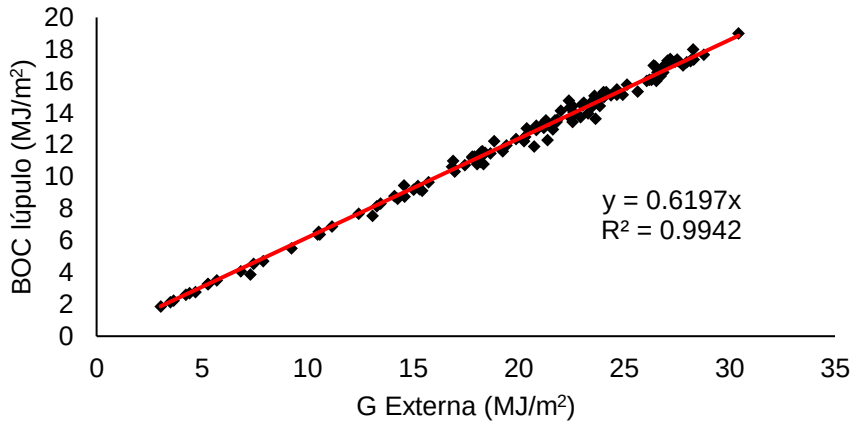
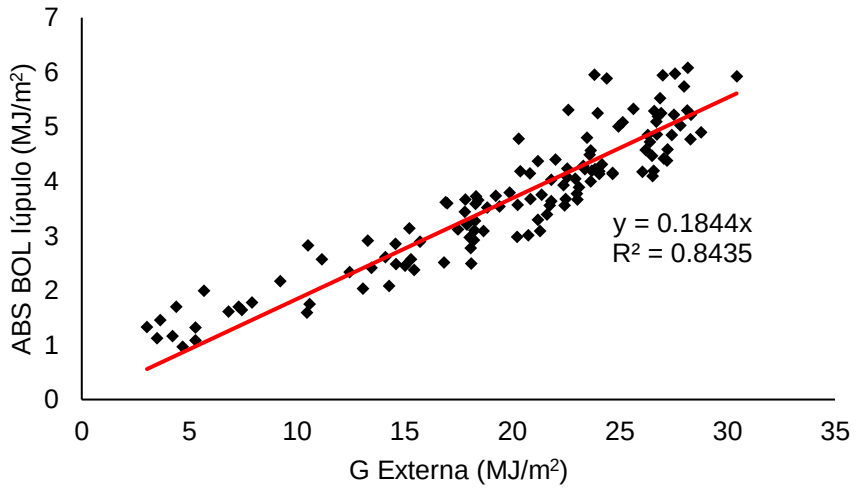


Figura 9 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e o valor absoluto do balanço de ondas longas na cultura do lúpulo em ambiente protegido

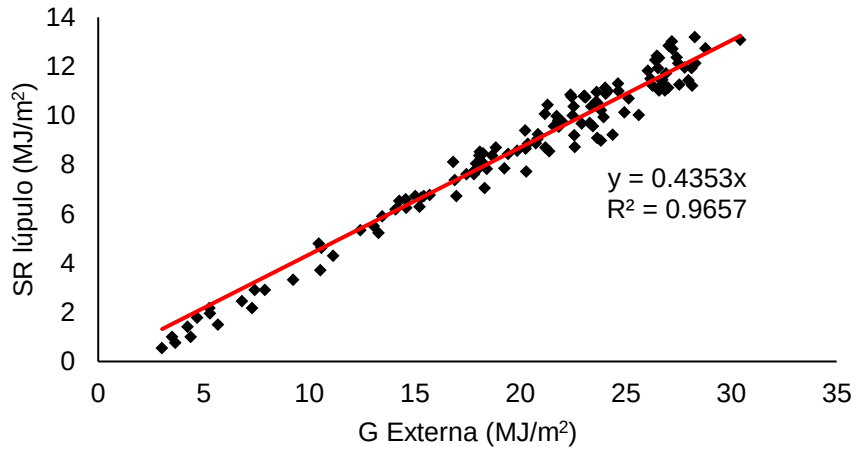


O coeficiente de determinação R^2 = 0,9942 mostrou elevada correlação entre o balanço de ondas curtas e a radiação global externa. Já o coeficiente angular

mostrou que o balanço de onda curta no interior do ambiente protegido é de aproximadamente 62% da radiação solar global externa. Já para o balanço de onda longa, o coeficiente de determinação R^2 = 0,8435 mostrou boa correlação em função da radiação global externa. Neste caso, pelo coeficiente angular, o balanço de onda longa é estimado como sendo 18,45% da radiação global externa.

Por fim, na Figura 10 é apresentada a equação de estimativa para o saldo de radiação absoluto na cultura do lúpulo em ambiente protegido a partir da radiação solar global externa:

Figura 10 - Relação entre a radiação solar global fora da estufa e o valor do saldo de radiação na cultura do lúpulo em ambiente protegido.



O modelo apresentou correlação elevada de aproximadamente 97%, mostrando que a radiação solar global externa é um bom parâmetro para estimar o saldo de radiação no cultivo do lúpulo em ambiente protegido. Já em relação ao coeficiente angular, o saldo de radiação é aproximadamente 44% da radiação solar global externa. Galvani (2001), com o cultivo de pepino em ambiente protegido, obteve relação de 50,20% considerando o sensor em campo e 61,20% para o sensor em ambiente protegido. Dal Pai (2010), analisando as radiações em ambiente protegido sem cultura, obteve relação de 51%.

Na literatura especializada há diversos modelos para estimativa do saldo de radiação, como por exemplo os trabalhos de Brunt (1932), Swinbank (1963), Idso & Jackson (1969) e Brutsaert (1975). Esses modelos são mais complexos do ponto de vista operacional, pois necessitam de mais parâmetros de entrada como: temperatura, pressão de vapor, radiação solar global e radiação solar extraterrestre. Já no presente

estudo, a aplicação do modelo proposto é mais vantajoso, pois requer apenas uma informação: a radiação solar global.

De fato, esse resultado mostra que, de posse de valores da radiação global, que é a componente solar mais frequentemente medida, é possível estimar o saldo de radiação que servirá de entrada no modelo de Pemnan-Moteith. Assim, com os valores de evapotranspiração calculados, é possível realizar o correto manejo da demanda hídrica da cultura.

A quantidade de água requerida por uma cultura, em determinado período de tempo, de modo que não limite seu crescimento e produção é denominada água necessária; constituindo a evapotranspiração a maior e mais importante parte. O processo de evapotranspiração precisa de energia para a evaporação de água e vê-se que a energia é essencial. Sendo assim, a energia radiante emitida pelo sol é a principal fonte de calor e não haveria transpiração sem energia solar (SALASSIER BERNARDO et al., 2019).

Como já mencionado no estudo, o saldo de radiação é o componente mais importante da equação de Penman-Monteith e contribui com no mínimo 82% da ETo em temperatura de 30°C (PEREIRA et al., 2013). Considerando que o Brasil está localizado em região de clima tropical e que a variação da evapotranspiração potencial é pequena (BERNARDO, 1977), pesquisas com irrigação, fotoperiodismo, radiação solar e modelos para estimação tornaria possível o cultivo durante quase todo o ano com o uso eficiente da água e economizando custos em culturas potencialmente econômicas.

2.4 CONCLUSÕES

A partir desse estudo, conclui-se:

- ✓ A radiação solar global fora da estufa pode ser um parâmetro confiável para estimativa da radiação solar global, refletida, balanço de ondas curtas, balanço de ondas longas e saldo de radiação dentro da estufa com o cultivo do lúpulo.
- ✓ A radiação solar global fora da estufa não é um parâmetro confiável para estimativa da radiação terrestre e atmosférica dentro da estufa com o cultivo do lúpulo.
- ✓ As radiações termais não dependem da nebulosidade.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. **Crop evapotranspiration guideliness for computing crop water requirementes.** Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, F. C. **Influência da rega na produtividade e na qualidade da produção do lúpulo (Humulus lupulus L.), variedade Nugget, na região da Galiza**. Dissertação de Mestrado. ISA/Universidade de Lisboa, Portugal, 2018.

BERNARDO, S.; **Relação soli-água-clima e planta.** Viçosa: Imprensa universitária da UFV, 1977. 30p. (Boletim de Extensão, 6).

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D. da.; SOARES, A. A.; **Manual de Irrigação.** 9ª ed. atual. ampl. – Viçosa, MG: Editora UFV, 2019.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. Q. J. R**. Meteorol. Soc.**, v. 58, p. 389-420, 1932.

DAL PAI, E. **Radiações e frações solares UV, PAR, IV, em estufa de polietileno: evolução anual, média mensal diária e equações de estimativa.** Dissertação de mestrado. FCA/UNESP-Botucatu, Botucatu, 2010.

DAL PAI, E. **Modelos de estimativa da radiação atmosférica em função da temperatura, umidade e dos índices radiométricos Kt e Kd para Botucatu-SP.** Tese (Doutorado em agronomia). FCA/UNESP-Botucatu, Botucatu, 2014.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.R. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (Cucumis sativus L.) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. Tese de Doutorado. FCA/UNESP-Botucatu, 2001.

IDSO, S.B., JACKSON, R.D. Thermal radiation from the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 74, p. 5397–5403, 1969.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração.** Campinas: FUNDAG, 323 p., 2013.

SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 110, p. 339-348, 1963.

T. GRAF; M. BECK; J. PORTNER; A. BAUMGARTNER; M. MAUERMEIER; D. ISMANN; M. MAIER; U. SCHMIDHALTER; A new approach for predicting the water balance of hops. **Acta Horticulture**. Abril de 2019.

SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo.** Comissão interestadual da Bacia Paraná- Uruguai, São Paulo, 1967.

TURNER, S.F., BENEDICT, C.A., DARBY, H., HOAGLAND, L.A., SIMONSON, P., ROBERT SIRRINE, J., MURPHY, K.M., 2011. Challenges and opportunities for organic hop production in the United States. **Agron. J.** 103, 1645–1654. 2011.

BRUTSAERT, W. A derivable formula for long-wave radiation from a clear skies. **Water Resour.**, v. 11, p. 742-744, 1975.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi dividido em dois capítulos. No primeiro capítulo, denominado “SALDO DE RADIAÇÃO DISPONÍVEL PARA A CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO”, foi apresentada a evolução temporal das medidas das radiações global, refletida, atmosférica, terrestre e saldo de radiação para a cultura do lúpulo em ambiente protegido e comparadas com as medidas obtidas externamente ao ambiente protegido. As principais conclusões do capítulo 1 foram:

- ✓ A atenuação média promovida pelo plástico da estufa (100μm de espessura) foi de 21%.
- ✓ Foi perceptível a influência da superfície reflexiva dentro da estufa (cor do solo), fora da estufa (cor da grama) e o desenvolvimento da cultura através do albedo.
- ✓ O saldo de radiação acumulado durante o ciclo foi 1266,8MJ/m^2 e é 23% menor que o saldo de radiação externo.
- ✓ Embora com saldo de radiação menor dentro da estufa, o ambiente protegido preserva mais o balanço de onda longa, que é essencial para os processos fisiológicos e metabólicos da planta.

No capítulo 2, denominado “MODELOS PARA ESTIMAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO E SEUS COPMPONENTES NA CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO”, foram propostos modelos para estimação do saldo de radiação e suas componentes no interior de um ambiente protegido com a cultura do lúpulo em função da radiação solar global medida externamente. As principais conclusões do capítulo 2 foram:

- ✓ A radiação solar global fora da estufa pode ser um parâmetro confiável para estimativa da radiação solar global, refletida, balanço de ondas curtas, balanço de ondas longas e saldo de radiação dentro da estufa com o cultivo do lúpulo.
- ✓ A radiação solar global fora da estufa não é um parâmetro confiável para estimativa da radiação terrestre e atmosférica dentro da estufa com o cultivo do lúpulo.
- ✓ As radiações termais não dependem da nebulosidade.

De fato, esse estudo mostra que, de posse de valores da radiação global, é possível estimar o saldo de radiação dentro da estufa com o cultivo do lúpulo e que esta servirá de entrada no modelo de Pemnan-Moteith; tornando possível realizar o correto manejo da demanda hídrica do lúpulo através da ETo.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. C. **Influência da rega na produtividade e na qualidade da produção do lúpulo (Humulus lupulus L.), variedade Nugget, na região da Galiza**. Dissertação de Mestrado. ISA/Universidade de Lisboa, Portugal, 2018.

BERGAMASCHI, H., BERGONCI, J. I., As plantas e o clima: príncípios e aplicações. Guaíba: Agrolivros, 2017. 352p.

BUDYCO, M. I., **Global Ecology.** Progress, Moscow, 1980.

CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.; DOURADO Neto, D.; LIER, Q. J. V.; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja-uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v.14, n.2, p. 102-120. 2007.

CHANG, J. H; **Climate and agriculture:** na ecological survey. 3ª ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 1974. 310p.

DODDS, K. **Hops a guide for new growers**. Department of primary industries, Australian Government, 2017. Disponível em: <http://www.dpi.nsw.gov.au. Acesso em: 13 de janeiro. 2018.

FADIÑO, M.; OLMEDO, J. L.; [et al.]; Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (Humulus Lupulus), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. **Journal Elsevier** - Industrial Crops and Products 77 (2015) 204–217p.

GASH, J. H. C.; SHUTTLEWORTH, W. J.Tropical deforestation: albedo and the surface-energy balance**. Climatic Change**, Amsterdam, v. 19, p.123-133,1991.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.

LORENTZ, L. H.; Variabilidade da produção de frutos de pimentão em estufa plástica, relacionada com técnicas experimentais. Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Ciências Rurais. Dissertação (Mestrado em agronomia). Santa Maria, 2004. 90p.

LENZ, L. C. **Estufa de polietileno: balanço de radiação e parametrização de modelos clássicos de estimativa da radiação atmosférica de ondas longas**. Dissertação de Mestrado, FCA/UNESP-Botucatu, 2016.

MAHAFFEE, W. F., SARAH J. P., DAVID H. G.; **Compendium of hop diseases and pests.** American Phytopathological Society (APS Press), 2009.

MILLER, A. **Meteorology.** Charles E. Merrill. Columbs, Ohio, 1971.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1981. 425p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola.** Piracicaba: ESALQ, 2007. 202 p.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração.** Campinas: FUNDAG, 323 p., 2013.

LENZ, L. C. **Estufa de polietileno: balanço de radiação e parametrização de modelos clássicos de estimativa da radiação atmosférica de ondas longas.** 2016. 55f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – FCA/UNESP – Botucatu, Botucatu, 2016.

RUCKLE, L.; SENN, T. **Hop acids as natural antibacterials can efficiently replace antibiotics in ethanol production. Betatec Hop Products**, Nurenberg, v. 7, n. 9, 2006. Disponível em: <http://www.betatechopproducts.com/literature/files/Hop_acids_natural_antibacterials.pdf >. Acesso em: 22 de janeiro. 2018

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluationof solar radiation estimation models. Solar energy, v.51, p.289-291, 1993.

TURNER, S.F., BENEDICT, C.A., DARBY, H., HOAGLAND, L.A., SIMONSON, P., ROBERT SIRRINE, J., MURPHY, K.M., 2011. Challenges and opportunities for organic hop production in the United States. **Agron. J.** 103, 1645–1654. 2011.

VAREJÃO, S. M. A. **Meteorologia e Climatologia.** 2006. Versão digital, 2. ed. Recife, 449 p.

VIANELLO, R. L; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. - 2ª ed. rev. Ampl. – Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 460 p.