

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**IMAGEAMENTO DA COBERTURA DE NUVENS
POR *SMARTPHONE*: CONTRIBUIÇÕES PARA A
MODELAGEM DO ÍNDICE UV POR MODELO DE
TRANSFERÊNCIA RADIATIVA**

ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO

ITAJUBÁ, MG, BRASIL

2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO

**IMAGEAMENTO DA COBERTURA DE NUVENS
POR *SMARTPHONE*: CONTRIBUIÇÕES PARA A
MODELAGEM DO ÍNDICE UV POR MODELO DE
TRANSFERÊNCIA RADIATIVA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração:
Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa

ITAJUBÁ, MG, BRASIL

2020

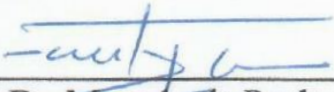
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO

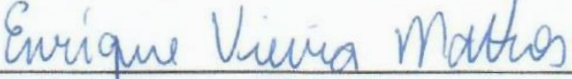
IMAGEAMENTO DA COBERTURA DE NUVENS POR
SMARTPHONE: CONTRIBUIÇÕES PARA A MODELAGEM
DO ÍNDICE UV POR MODELO DE TRANSFERÊNCIA
RADIATIVA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19
de fevereiro de 2020 conferindo à autora o título de
Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.


Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa (Orientador)
Universidade Federal de Itajubá - Unifei



Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos
Universidade Federal de Itajubá - Unifei



Prof. Dra. Marcia Akemi Yamasoe
Universidade de São Paulo - USP

Itajubá, MG, Brasil

2020

Dedico aos meus avós, Benedita e Levino (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, por me capacitar e permitir a concretização de mais essa etapa.

Aos meus pais Sergio e Maria Claudete e familiares, pelo incentivo, apoio e confiança que sempre depositam em mim, me encorajando sempre a ir mais longe.

Ao meu orientador professor Dr. Marcelo de Paula Corrêa pela orientação, dedicação, apoio e atenção na caminhada desde a graduação, e também por todo ensinamento transmitido.

A todos os professores do programa de pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (MEMARH) pelo aprendizado e aprimoramento profissional.

À amiga Ana Flávia, pelo companheirismo, cumplicidade e por me inspirar a ser uma pessoa melhor. Minha eterna gratidão à nossa amizade e por tudo que compartilhamos.

Ao técnico em meteorologia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) Alexandre Germano Marciano, pelo auxílio na coleta dos dados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.

(Paulo Beleki)

RESUMO

YAMAMOTO, Ana Letícia Campos. **Imageamento da cobertura de nuvens por *smartphone*: contribuições para a modelagem do índice UV por modelo de transferência radiativa**. 2020. 60 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

A radiação ultravioleta (RUV) exerce influência sobre a vida na Terra. Por esta razão, é de suma importância a mensuração dessa radiação e a avaliação do impacto dos constituintes atmosféricos nos níveis de RUV em superfície. Uma alternativa viável é a utilização de modelos de transferência radiativa (MTR), que simulam a RUV em diferentes condições atmosféricas. Contudo, os efeitos da cobertura de nuvem (CN) são fontes significativas de erros nos MTR. Uma técnica acessível e de baixo custo, para determinação da CN é o imageamento, que consiste em converter imagens do céu em dados de CN. Para tanto, foram coletadas 230 fotografias do céu por câmeras de *smartphone* (Samsung Galaxy A5) e fotográfica (Sony Cyber-shot - DSH-H7), simultaneamente, abrangendo diferentes tipos e coberturas de nuvens, além de condições de céu claro. As imagens foram processadas por um conjunto de algoritmos, que classificou e contabilizou os pixels de nuvem. Foram testados 13 limiares, dentre os encontrados na literatura (0,12, 0,65 e 0,90), para classificação de pixels de nuvens. Para fins de validação, as fotografias foram avaliadas visualmente por observador, e estatisticamente, pelo método de análise de regressão linear e coeficiente de determinação (R^2). Para a modelagem foi utilizado o MTR TUV (*Tropospheric Ultraviolet and Visible*), alimentado com: a) perfil vertical de atmosfera tropical; b) conteúdo total de ozônio (CTO) e c) propriedades ópticas de aerossóis, para a localidade de Itajubá (22,4°S, 45,5°W, 850 m). Foram realizados testes de parametrização e sensibilidade do MTR envolvendo diferentes profundidades ópticas, espessuras verticais e alturas da base e topo das nuvens, para os solstícios de inverno e verão. Em seguida, os dados de RUV coletados por um radiômetro UV SUV-E da Kipp & Zonen e simulados pelo MTR foram avaliados em termos de Índice Ultravioleta (IUV) e por métodos estatísticos: a) a raiz do quadrado médio do erro (RQME); b) coeficiente de correlação (r); c) tendência (BIAS) e; d) índice de concordância (d). Para avaliação do efeito das nuvens sobre os fluxos de RUV, foi utilizado o índice *Cloud Modification Factor* (CMF). Resultados do processamento das fotografias indicaram bom desempenho da técnica ($p < 0,0001$) com a utilização dos limiares de 0,18 (*smartphone*) e 0,26 (câmera fotográfica), sendo superiores aos obtidos com a utilização do limiar de 0,12. Quanto aos demais limiares encontrados na literatura, os resultados apontaram, equivocadamente, valores de CN correspondentes a 100% para todos os casos. Em relação à modelagem de RUV pelo MTR, os testes de sensibilidade evidenciaram que a variável mais relevante para simulações sob condições de nebulosidade é a profundidade óptica. De modo geral, o desempenho do MTR TUV, em eventos de nebulosidade, foi bom segundo os resultados estatísticos ($p < 0,0001$), para os casos de Sol aparente e encoberto, resultando em correlações positivas e muito fortes ($r > 0,91$), com elevadas concordâncias ($d > 0,92$) e tendência de superestimativa do modelo. Um valor máximo de IUV, equivalente a 13,7, foi encontrado na presença de nuvens *Alto cumululus* (Ac). Para nuvens *Nimbostratus* (Ns), o valor de CMF médio de 0,2 ($\pm 0,1$) indicou a ocorrência de atenuação da RUV. Por outro lado, eventos de intensificação da RUV ocorreram na presença de nuvens *Cumululus* (Cu), com CMF de 1,1. Dessa forma, ressalta-se que a presença de nuvens não representa menor risco à saúde.

Palavras-chave: Radiação ultravioleta; Nebulosidade, Fotografia, Algoritmo.

ABSTRACT

YAMAMOTO, Ana Letícia Campos. **Cloud cover imaging by cell phone: contributions for UV index modelling by radiative transfer model.** 2020. 60 f. Master of Science Dissertation (Master in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2018.

The ultraviolet radiation (UVR) influences life on Earth and its monitoring is relevant and necessary for studies on different areas of knowledge. UVR modelling by radiative transfer models (RTM) is always an alternative for lack of surface and/or remote measurements. However, RTM estimates may present significant errors related to the UVR attenuation processes in the atmosphere. Cloud cover (CC) effects represent one of the most important source of RTM errors. In general, sky images are taken by all-sky cameras as a tool for automating cloud quantification, but these instruments are still an expensive option for poorer countries. Thus, we develop a low-cost and affordable technique for determining CC using photography. 230 sky images were collected using a smartphone (Samsung Galaxy A5) and photographic camera (Sony Cyber-Shot – DSH-H7) simultaneously. This high-quality set of sky photos covers different types and amounts. A set of algorithms processed the images, classifying and counting the pixels of the clouds. 13 thresholds were tested, among the ones found in the literature (0,12, 0,65, and 0,90.), to classify the pixels of the clouds. For validation, the photographs were visually assessed by an observer, and statistically, by the methods of analysis of linear regression and coefficient of determination (R^2). UVR estimates were performed using the Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV) RTM model. The following conditions were observed for atmospheric vertical profile: a) tropical atmosphere profile; b) total ozone content (TOC); and c) aerosol optical properties at Itajubá's site (22.4°S, 45.5°W, 850m.). Previously, RTM parametrization and sensitivity tests were performed involving different optical depths (OD), vertical thicknesses, cloud base height and cloud top height for winter and summer solstices. Then, UVR data provided by a Kipp & Zonen SUV-E radiometer were used to compare UV Index (UVI) estimates from RTM by statistical methods: a) the root-mean-square error (RMSE); b) correlation coefficient (r); c) BIAS and; index of agreement (d). To evaluate the effect of the clouds, the Cloud Modification Factor (CMF) Index was used. Results showed satisfactory performance of the technique ($p < 0.0001$) with the utilization of the thresholds of 0.18 (smartphone) and 0.26 (photographic camera), being higher the ones obtained with the utilization of the threshold of 0.12. About the other thresholds found in the literature, the results reveal equivocally, values of CC corresponding to 100% for every case. Sensitivity tests showed that the vertical position and the thickness of the clouds represent only a source of minor errors lower than 3.2% for UVI calculations. Thus, the cloud OD is the most important input value to be considered for the TUV RTM. In general, the performance of the TUV MTR in cloudiness events was satisfactory ($p < 0.0001$), with strong positive correlations ($r > 0.91$), high agreements ($d > 0.92$) and tendency of overestimation of the model. The maximum UVI observed was 13.7 in the presence of Altopcumulus (Ac) clouds. In case of strong UVI attenuation caused by overcast skies with Nimbostratus (Ns) clouds, the mean CMF value was 0,2 ($\pm 0,1$). On the other hand, UVI increase occurred in Cumulus (Cu) clouds conditions, with mean CMF of 1,1 ($\pm 0,1$). It is worth pointing out that the occurrence of clouds does not indicate safe sun exposure.

Keywords: Ultraviolet radiation; Cloudiness; Photography; Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação do IUV e medidas de proteção recomendadas.....	20
Figura 2. Classificação de nuvens.	22
Figura 3. Categorias de profundidades ópticas e pressão no topo da nuvem.	24
Figura 4. Amostras de fotografias para as condições de (a) CC, (b) CPN e (c) CTE.	31
Figura 5. Distribuição de frequência dos casos de ausência de nebulosidade e tipos de nuvens presentes na amostragem.	32
Figura 6. Correlação entre o conjunto de dados observacionais de CN provenientes das câmeras de <i>smartphone</i> e fotográfica.	33
Figura 7. Correlação entre CN determinada pela inspeção visual das imagens a. de <i>smartphone</i> e b. câmera fotográfica, e processadas por algoritmos considerando o limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010).	35
Figura 8. Correlação entre CN determinada pela inspeção visual das imagens a. de <i>smartphone</i> e b. câmera fotográfica, e processadas por algoritmos considerando o limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010) com exceção de <i>outliers</i>	36
Figura 9. Relação de IUV e profundidade óptica para distintas alturas da base e topo das nuvens (h_1 , h_2 e h_3) nos solstícios de inverno e verão.	38
Figura 10. Relação de IUV e profundidade óptica para distintas extensões verticais das nuvens (e_1 , e_2 e e_3) nos solstícios de inverno e verão.	39
Figura 11. Correlação entre IUV medido pelo radiômetro UV e simulado pelo MTR TUV em eventos de nebulosidade em a. casos de Sol aparente e b. casos de Sol encoberto.....	42
Figura 12. <i>Boxplot</i> do IUV para o período de realização do experimento (março-maio de 2019).....	43
Figura 13. Valores médios de CMF e desvios padrão para cada tipo de nuvem.....	44
Figura 14. IUV e CN para a localidade de Itajubá (02 de maio de 2019, entre 10 e 12 horas).	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de pele e reação à RUV.	21
Tabela 2. Coeficientes angulares (a), lineares (b) e de determinação (R^2) das equações de regressão linear para o <i>smartphone</i> e câmera fotográfica, considerando distintos limiares.	37
Tabela 3. Análise estatística comparativa entre os dados de IUV simulados pelo MTR TUV e coletados pelo radiômetro UV, em casos de ausência total de nuvens.....	40
Tabela 4. Métodos estatísticos para os dados de IUV simulados pelo MTR TUV e coletados pelo radiômetro UV em casos de nebulosidade com Sol aparente e encoberto.	41

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SMBOLOS

I_λ	Irradincia espectral
ϵ_λ	Resposta fotobiológica para o eritema
r_{eff}	Raio efetivo das gotas
τ_{nuvem}	Profundidade ptica da nuvem
ρ	Densidade da gua líquida
n_g	Distribuio numérica de gotas
Z_b	Altura da base da nuvem
Z_t	Altura do topo da nuvem
Ac	<i>Alto cumulus</i>
AOD	<i>Aerosol optical depth</i>
AERONET	<i>Aerosol RObotic NETwork</i>
AZS	ngulo zenital solar
CIE	<i>Commission Internationale de l'clairage</i>
CEQUAM	Centro de Estudos em Qualidade Ambiental
CMF	<i>Cloud Modification Factor</i>
CN	Cobertura de nuvem
NCN	Núcleo de condensaco de nuvem
CPN	Céu parcialmente nublado
CTE	Céu totalmente encoberto
CTO	Conteúdo total de ozônio
Cb	<i>Cumulonimbus</i>
Cc	<i>Cirrocumulus</i>
Ci	<i>Cirrus</i>
Cu	<i>Cumulus</i>
DU	<i>Dobson unit</i>
ω_o	Albedo simples
ISCCP	<i>International Satellite Cloud Climatology Project</i>

IUV	Índice ultravioleta
JPEG	<i>Joint photographic experts group</i>
LWC	<i>Liquid water content</i>
MED	<i>Minimum erythema dose</i>
MTR	Modelo de transferência radiativa
Ns	<i>Nimbostratus</i>
OMI	<i>Ozone Monitoring Instrument</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
RGB	<i>Red, green, blue</i>
RQME	Raiz do quadrado médio do erro
RUV	Radiação ultravioleta
RUV-A	Radiação ultravioleta banda “A”
RUV-B	Radiação ultravioleta banda “B”
RUV-C	Radiação ultravioleta banda “C”
SED	<i>Standard erythema dose</i>
Sc	<i>Stratocumulus</i>
St	<i>Stratus</i>
TSI	<i>Total sky imager</i>
TUV	<i>Tropospheric ultraviolet and visible</i>
w	Conteúdo de água líquida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. RUV e suas interações.....	17
2.2. O Índice Ultravioleta	19
2.3. Dose Eritematosa.....	21
2.4. Caracterização das nuvens.....	22
3. DADOS E METODOLOGIA.....	26
3.1. Coleta e processamento de imagens digitais do céu.....	26
3.2. Instrumentação e modelagem da RUV	27
3.3. Análise estatística	28
3.4. Avaliação das nuvens e RUV	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Análise das fotografias do céu.....	31
4.2. Avaliação estatística dos limiares de classificação dos pixels de nuvens	34
4.3. Testes de sensibilidade no MTR TUV	37
4.4. Avaliação do MTR TUV	39
4.5. Avaliação do IUV e <i>Cloud Modification Factor</i> (CMF).....	42
4.6. Estudo de caso: IUV x CN	44
5. CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
APÊNDICE A	57
APÊNDICE B.....	59

1. INTRODUÇÃO

O Sol emite radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro e é a principal fonte de energia para o desenvolvimento e manutenção da vida na Terra. De toda a radiação solar que atinge o topo da atmosfera, somente cerca de 8 a 9% corresponde a radiação ultravioleta (RUV). Devido à atenuação pelos constituintes atmosféricos, esse tipo de radiação representa entre 0,5 e 5% do total de radiação solar que atinge a superfície (FOYO-MORENO; VIDA; ALADOS-ARBOLEDAS, 1999).

A RUV compreende a faixa do espectro entre 100 e 400 nm e, apesar de constituir uma pequena porção da radiação emitida pelo Sol, atua no balanço de energia (WILD et al., 2005), exerce influência nas plantas (FLINT; CALDWELL, 2003; ALBERT et al., 2010; HASSAN et al., 2013; FENG et al., 2014; CHEN et al., 2016), nos ecossistemas aquáticos (JACQUET; BRATBAK, 2003), na saúde humana (NEZVAL; CHUBAROVA, 2017; LAMY et al., 2018) e animal, acarretando no desenvolvimento de patologias cutâneas em cães e gatos (SAUCEDO et al., 2019; WILLCOX, et al., 2019), e promove a fotodegradação (microfissuras) em materiais inorgânicos (WOO et al., 2007).

Devido à relevância da RUV sobre a vida na Terra, é de suma importância a mensuração dessa radiação e a avaliação do impacto dos constituintes atmosféricos nos níveis de RUV em superfície. Porém, medir RUV não é uma tarefa simples, pois a quantidade de energia que atinge a superfície é tênue. Isso exige equipamentos mais sensíveis e custosos e a manutenção de grandes redes de medição é dispendiosa. Além disso, medidas de RUV por sensoriamento remoto também possuem várias limitações e são adequadas desde que a observação de nuvens e a parametrização do impacto da nebulosidade na RUV sejam refinadas (JÉGOU et al., 2012). Uma alternativa viável é a utilização de modelos de transferência radiativa (MTR), que simulam a RUV em diferentes condições atmosféricas (MAYER; KYLLING, 2005). No entanto, essas estimativas podem apresentar erros significativos, uma vez que a RUV sofre processos complexos de atenuação na atmosfera. Em relação ao ozônio, o processo de absorção é bem representado em MTR e as medições realizadas por sensores a bordo de satélites são confiáveis. As simulações de MTR para condições de céu claro (sem nuvens) e com baixas concentrações de aerossóis fornecem resultados muito precisos. Em contrapartida, no caso de nuvens, a grande variabilidade temporal e espacial, profundidades ópticas distintas, além de geometria e composição variadas (SILVA, 2006), fazem com que as reproduções sejam complicadas e menos precisas. Além disso, tendo em vista que as nuvens alteram significativamente o balanço de energia por

desempenhar um importante papel na transferência radiativa na atmosfera (LUIZ et al., 2018), informações dessa natureza são requeridas nos MTR para que as simulações sejam mais fidedignas às condições reais da atmosfera e não somente para condições de céu claro.

A fração da cobertura de nuvens pode ser determinada tradicionalmente por observadores mediante inspeção visual do céu, com base na divisão da abóboda celeste em oito partes (octas) (WMO, 2008). No entanto, esse tipo de observação apresenta baixa resolução temporal, complexidade e subjetividade, pois a cobertura de nuvens é muito dinâmica no tempo e no espaço, além de apresentar variações no tipo, composição, geometria, volume e espessura (FOYO-MORENO et al., 2003; PARISI; TURNBULL; TURNER, 2007). Imageadores do céu, tais como o *Total Sky Imager* (TSI) - (<https://www.arm.gov/capabilities/instruments/tsi>), e satélites também fornecem dados de tipo (BOTTINO; CEBALLOS, 2015; JIN et al., 2019) e cobertura de nuvens (SILVA; SOUZA-ECHER, 2016; LUIZ et al., 2018). A grande vantagem da utilização dessas metodologias é o aumento da objetividade e resolução temporal, quando comparada à observação visual. Contudo, tais instrumentos possuem alto custo de aquisição e manutenção e as imagens de satélite apresentam baixa resolução espacial.

Uma técnica de baixo custo e acessível para determinação da fração de nebulosidade é a utilização de imageamento de nuvens por *smartphones*. O método consiste em converter fotografias digitais do céu em imagens digitais RGB (do inglês, *Red, Green, Blue*), por meio de algoritmos de processamento de imagens. As relações de razão e diferença entre os canais (RGB) fornecem uma classificação de regiões de ausência ou presença de nebulosidade, que são contabilizadas para determinar o percentual de cobertura de nuvens (LONG et al., 2006; SOUZA-ECHER et al., 2006; HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010; WACKER et al., 2015; PARISI et al., 2016).

A combinação de tecnologia de sensoriamento de imagem e comunicação, unida a acessibilidade e facilidade de uso fizeram com que os *smartphones* se tornassem uma ferramenta acessível e útil, permitindo um avanço científico e tecnológico nos últimos anos (IGOE; PARISI; CARTER, 2013a). Estudos recentes têm mostrado aplicações de sensores de imagens e câmeras em *smartphones* na determinação de irradiância solar direta e profundidade óptica de aerossol (IGOE; PARISI; CARTER, 2014), mapeamento de aerossóis atmosféricos (SNIK et al., 2014), detecção de radiação ultravioleta A e B (IGOE; PARISI; CARTER, 2013b; TURNER et al., 2017), avaliação da coluna total de ozônio (IGOE et al., 2018), teste de qualidade da água para salinidade (HUSSAIN et al., 2017), turbidez (HUSSAIN; AHAMAD; NATH, 2016), teor de flúor (HUSSAIN; AHAMAD; NATH, 2017)

e mercúrio (WEI et al., 2014), microscopia médica (BRESLAUER et al., 2009), dentre muitos outros.

Uma vez que os *smartphones* estão sendo utilizados em diversas aplicações científicas e que fotografias do céu podem ser usadas para estimar a cobertura de nuvens, este estudo tem como objetivos avaliar a detecção de nuvens com sensores simples e comuns, como os *smartphones*, e analisar o desempenho do modelo de transferência radiativa nas estimativas de fluxos de RUV em condições de nebulosidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. RUV e suas interações

A RUV (100-400 nm) é subdividida em três bandas, segundo a recomendação da Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Éclairage* - CIE): UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) e UVA (315-400 nm) (ICNIRP, 2004). A RUV-C é completamente absorvida pelo ozônio e oxigênio presentes na alta atmosfera e não atinge a superfície da Terra (TIBA; LEAL, 2017). Por ser a banda mais energética da RUV, é comumente utilizada para esterilização de água e equipamentos cirúrgicos (CORRÊA, 2015). A maior fração de RUV-B é absorvida pelo ozônio estratosférico e espalhada por moléculas e aerossóis, atingindo a superfície em quantidades muito tênues, cerca de 1,5% do espectro emitido pelo Sol (HOLLÓSY, 2002; WHO, 2002), mas suficientes para ocasionar efeitos significativos nos seres humanos (WANG et al., 2015). Já, a RUV-A constitui a maior fração de RUV que atinge a superfície terrestre, aproximadamente 6 a 7% da emissão solar total, uma vez que é pouco absorvida e atenuada pelos componentes presentes na atmosfera (CORRÊA; PIRES, 2013).

A exposição excessiva do ser humano às RUV-A e RUV-B é o principal fator desencadeador de efeitos fotoquímicos e fotobiológicos como queimaduras solares (eritemas), cânceres de pele não melanoma (ZHANG et al., 2012), envelhecimento precoce da pele (MONTAGNER; COSTA, 2009), doenças nos olhos (WALSH, 2009) e supressão do sistema imunológico. Em contrapartida, a exposição em níveis adequados estimula a produção de vitamina D, hormônio responsável pela manutenção e concentração de fósforo e cálcio no sangue, relevantes para a estrutura óssea e metabolismo celular (PETERS et al., 2009; HOLICK, 2016).

A incidência de RUV na superfície da Terra é influenciada por fatores atmosféricos, que diz respeito às interações que a RUV irá sofrer com os constituintes da atmosfera; parâmetros temporais como a hora do dia e o dia do ano; e parâmetros geográficos, tais como ângulo zenital solar (AZS), latitude, refletância da superfície e altitude, que fazem com que a distribuição da RUV não seja homogênea no globo (CORRÊA, 2015). Os fatores atmosféricos como conteúdo total de ozônio (CTO), aerossóis e nuvens, atuam nos processos radiativos de absorção e espalhamento da RUV na atmosfera e afetam significativamente os fluxos de radiação (WANG et al., 2015; LAMY et al., 2018).

O ozônio é um gás concentrado predominantemente na estratosfera, entre 20 e 40 km de altitude, e um importante absorvedor de radiação nos comprimentos de onda inferiores a 280 nm (HOLLÓSY, 2002), atuando na proteção da Terra contra esse tipo de radiação. Ao nível do solo, é considerado um gás poluente (FREDERICK, 1993) e nocivo ao ser humano, podendo provocar irritação nos olhos e vias respiratórias (FREITAS et al., 2004; DAPPER et al., 2016).

O CTO é a medida da concentração das moléculas de ozônio do topo da estratosfera até a superfície da Terra e mensurado em unidades Dobson (*Dobson Unit* - DU). Um valor de 100 DU equivale a uma camada vertical de 1 mm de espessura de ozônio, em uma área de 1 m², sob pressão e temperatura padrão (PETER, 1994). Uma redução de 1% no CTO poderia ser capaz de ocasionar um aumento de 1,2% na RUV biologicamente ativa (KRZÝSCIN, 1996). Sua quantidade depende da localização e estação do ano, em geral, menores concentrações são encontradas no outono e as maiores, na primavera, devido aos processos de formação, destruição e transporte na estratosfera (FAN et al., 2014).

Os aerossóis são partículas sólidas e/ou líquidas suspensas na atmosfera que também atuam em processos de atenuação da RUV, principalmente por espalhamento. Nesse processo de espalhamento a energia incidente em uma direção é desviada para outras direções, sem alteração do comprimento de onda. Corrêa e Plana-Fattori (2006) mostraram, de modo geral, que a presença de aerossóis na atmosfera é responsável por uma atenuação média em torno de uma unidade de Índice Ultravioleta (IUV) na região metropolitana de São Paulo, onde há atividade industrial e fluxo intenso de veículos. De forma indireta, os aerossóis atuam como núcleos de condensação, contribuindo na formação de nuvens (BARTÓK, 2017). O tipo e a quantidade de aerossóis presentes na atmosfera são afetados pelas emissões de poluentes atmosféricos, atividade vulcânica, velocidade do vento, frequência e extensão de incêndios florestais e tempestades de poeiras (BARNES et al., 2019).

As nuvens são agentes moduladores da RUV e, dependendo de suas características podem intensificar ou reduzir a RUV que atinge a superfície terrestre (SANTOS; VILLÁN; CASTRILLO, 2011; TIBA; LEAL, 2017) e alterar o balanço de energia em escala local e global (AEBI; GRÖBNER; KÄMPFER, 2018). A presença de uma cobertura de nuvens homogênea e estratificada, em comparação com um dia de céu claro, pode reduzir os fluxos de RUV em cerca de 50%. De outra forma, nuvens de tempestade do tipo *Cumulonimbus* (Cb), podem extinguir a RUV em superfície. Em alguns casos particulares, nuvens do tipo *Cumulus* (Cu) e *Cirrus* (Ci) podem provocar aumento dos níveis de radiação, por refletir a RUV pelas laterais e cristas de gelo, respectivamente (CORRÊA, 2015). Contudo,

informações a respeito do impacto das nuvens na RUV ainda são grandes fontes de incertezas, devido ao dinamismo, heterogeneidade, variabilidade e composições distintas (SERRANO et al., 2015).

Outros fatores também interferem nos níveis de RUV que atingem a superfície da Terra, tais como:

- Ângulo zenital solar (AZS): É a posição angular do Sol em relação ao zênite, linha imaginária vertical que parte do observador. Para ângulos zenitais pequenos, os raios solares incidem mais próximo à vertical, dessa forma tem-se maior intensidade sobre a superfície. Por outro lado, quanto mais próximo o Sol está do horizonte, maior é o valor de AZS, e o caminho óptico a ser atravessado é maior. Por essa razão, menor quantidade de radiação chega à superfície (KEER, 2003).

- Latitude: A disponibilidade anual de radiação é maior em locais próximos à Linha do Equador e diminui em direção aos polos. A variação ocorre devido ao ângulo de incidência entre os raios solares e a superfície, com maior intensidade para latitudes mais baixas (CORRÊA, 2015).

- Albedo: É a capacidade de refletância da superfície e depende da sua composição. Quanto maior o albedo, maior é a capacidade de refletir a radiação (KEER, 2003; ZARATTI et al., 2003).

- Altitude: No caso da altitude, a dependência da RUV ocorre devido a diminuição da densidade de dispersores na atmosfera (CABROL et al., 2014). Em locais de maior altitude, os níveis de RUV são, geralmente, maiores devido à menor espessura da atmosfera e, conseqüentemente, há ocorrência de menor atenuação por gases e partículas. Estudos mostram que acima de 1000 m de altitude, os níveis de RUV aumentam entre 5 e 10 % a cada quilômetro de altura (RIVAS et al., 2002; ZARATTI et al., 2003).

2.2. O Índice Ultravioleta

O Índice Ultravioleta (IUV) foi desenvolvido por cientistas canadenses em 1992 com o intuito de divulgar ao público leigo a quantidade de radiação, bem como a adoção de medidas de proteção. Em 1994 foi adotado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como o padrão internacional (WHO, 2002).

O IUV é uma escala numérica adimensional dividida em categorias referentes aos níveis de possíveis danos à saúde devido à exposição: Baixo ($IUV < 2$); Moderado ($3 < IUV < 5$); Alto ($6 < IUV < 7$); Muito Alto ($8 < IUV < 10$) e Extremo ($IUV > 11$) (Figura 1), que

relaciona os fluxos de RUV biologicamente ativos que induzem a formação de eritema na pele humana, denominada de irradiância eritêmica (WHO, 1994). O eritema é a denominação dada para o avermelhamento da pele, principal efeito agudo provocado pela exposição excessiva à RUV.

A representação matemática é dada pelo produto entre os fluxos espectrais de RUV e o espectro de resposta fotobiológica da pele humana, que é a resposta biológica referente ao processo de formação de eritema após exposição à determinada dose de RUV, integrado entre os comprimentos de onda de 280 e 400 nm, (Equação 1). Ou seja, é a soma ponderada dos efeitos fotobiológicos proporcionados pela RUV em cada comprimento de onda sobre a pele humana, sendo cada unidade de IUUV referente a $0,025 \text{ Wm}^{-2}$ de RUV biologicamente ativa (VANICEK, 2000).

$$\text{IUUV} = 40 \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

Na equação 1, I_{λ} representa a irradiância espectral UV, ε_{λ} representa a função resposta fotobiológica para o eritema e o valor 40 é a escala de conversão entre a irradiância eritêmica em Wm^{-2} para a escala adimensional do IUUV.

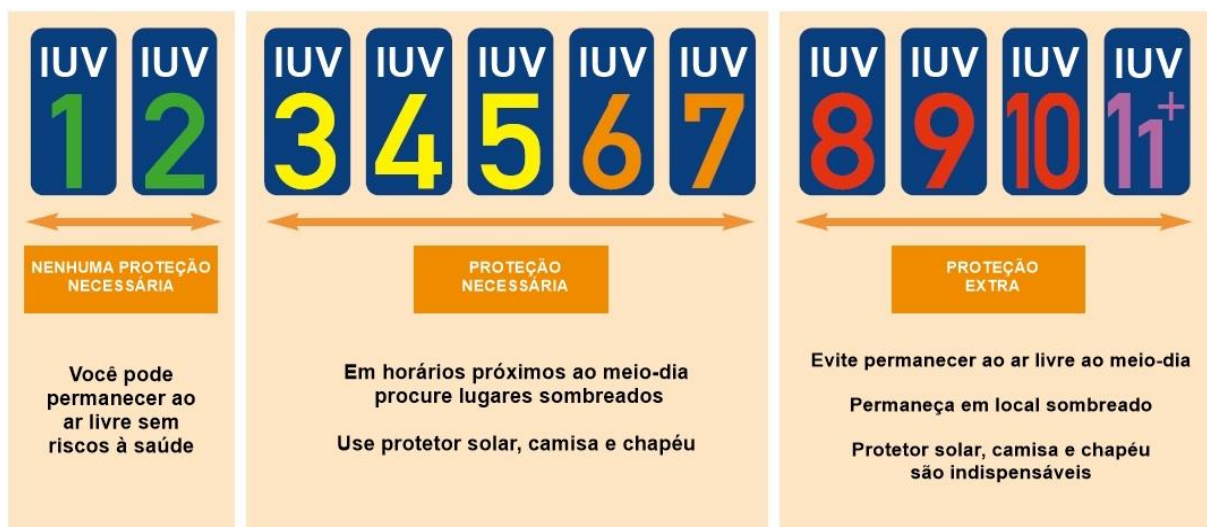


Figura 1. Classificação do IUUV e medidas de proteção recomendadas.

Fonte: Adaptado de WHO (2002).

2.3. Dose Eritematosa

A dose eritematosa é definida como a integral da irradiância eritêmica em um intervalo de tempo (Equação 2), sendo utilizada para caracterizar os efeitos cumulativos da exposição solar no indivíduo (MADRONICH, 1993).

$$\text{DOSE} = \int_{\Delta t} \int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} d\lambda dt \quad (2)$$

As doses mínimas de RUV-A e RUV-B necessárias para desencadear o processo de formação de eritema, após 24 horas de exposição solar e em um determinado tipo de pele, é denominada de dose eritematosa mínima (MED, do inglês, *minimum erythema dose*). A sensibilidade da pele varia de acordo com o fototipo, ou seja, indivíduos com a pele menos pigmentada são mais sensíveis e necessitam de menores doses de RUV para desencadear o eritema, se comparados aos indivíduos de pele mais pigmentada (Tabela 1) (YOUNG, 2006).

Tabela 1. Tipos de pele e reação à RUV.

Cor da pele (sem exposição)	Tipo de pele	Queimadura	Bronzeamento	MED (mJ/cm ²)
Branca	I	Sim	Não	20 - 30
	II	Sim	Mínimo	25 - 35
	III	Sim	Sim	30 - 50
	IV	Não	Sim	45 - 60
Mulata	V	Não	Sim	60 - 100
Negra	VI	Não	Sim	100 - 200

Fonte: Fitzpatrick (1988) apud Corrêa (2003).

A resposta do ser humano à formação do eritema pode ser expressa em função da dose biológica, em termos de MED, ou física, como dose eritematosa padrão (SED, do inglês, *standard erythema dose*), em que 1 SED equivale a 100 Jm⁻², independentemente do tipo de pele (DIFFEY et al., 1997). As recomendações internacionais sugerem que a dose diária de 1,08 SED (108 Jm⁻²) seja suficiente para satisfazer as necessidades diárias de Vitamina D, sem ocasionar efeitos nocivos (MOEHRL et al., 2003).

2.4. Caracterização das nuvens

Nuvens são aglomerados de gotículas de água líquida, vapor d'água e/ou cristais de gelo em suspensão na atmosfera que cobrem, em média, cerca de 40 a 60% da superfície terrestre. As nuvens refletem, absorvem e transmitem a radiação solar e terrestre, além de emitir a radiação terrestre, contribuindo significativamente nos processos de transferência radiativa na atmosfera e no balanço de energia do sistema terrestre (WACKER et al., 2015; LUIZ et al., 2018).

A formação das nuvens ocorre por meio da condensação de vapor d'água em presença de núcleos de condensação de nuvens (NCN). Os NCN são partículas constituídas de substâncias higroscópicas, cuja principal característica é a absorção de água do ambiente, compostas basicamente de sulfatos, nitratos e sal marinho (SALBY, 1996).

As nuvens podem ser classificadas conforme altitude, aparência e desenvolvimento vertical, como ilustrado na Figura 2. Nuvens baixas refletem grande parte da radiação solar e atuam no resfriamento da superfície. Por outro lado, nuvens altas e finas absorvem parte da radiação emitida pela terra e reemitem em comprimentos de onda respectivo à sua temperatura, contribuindo para o aquecimento da superfície e desempenhando um papel relevante sobre a temperatura do planeta (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

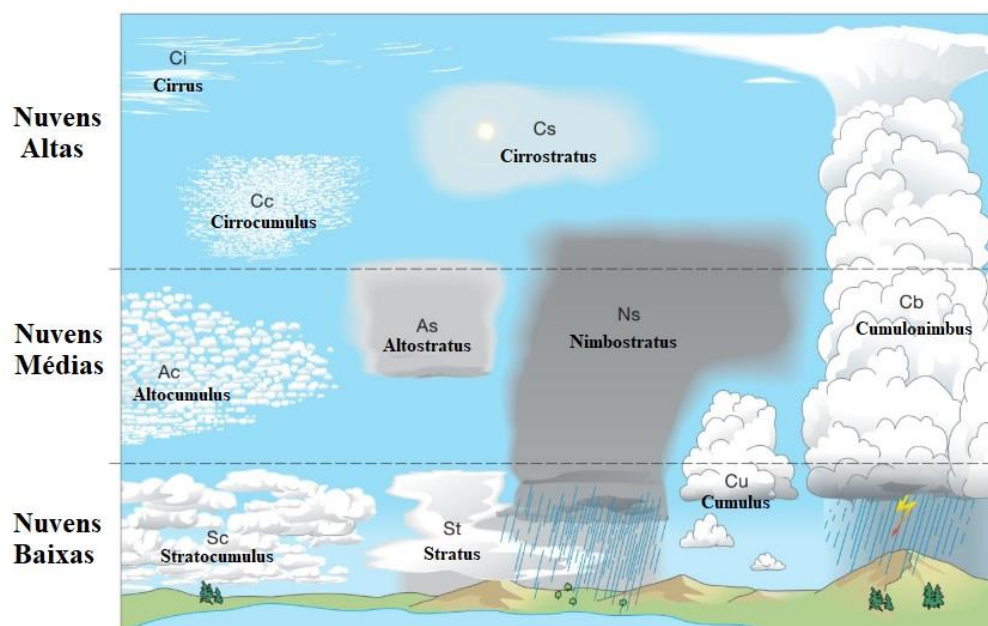


Figura 2. Classificação de nuvens.

Fonte: Adaptado de WMO (<https://cloudatlas.wmo.int/clouds-definitions.html>)

Devido à grande variabilidade temporal, espacial e de composição, a representação computacional das nuvens é complexa, o que torna o efeito sobre os fluxos de RUV um dos principais causadores de erros nos MTR. Os modelos inserem o efeito das nuvens nos processos radiativos por meio de parametrizações de suas propriedades, tais como conteúdo integrado de água líquida (LWC, do inglês, *liquid water content*), o raio efetivo das gotas (r_{eff}) e a profundidade óptica da nuvem (τ_{nuvem}) (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

O LWC (g m^{-3}) é dado pela expressão:

$$\text{LWC} = \int_{\text{base}}^{\text{topo}} w(z) dz \quad (3)$$

em que $w(z)$ (g m^{-2}) é o conteúdo de água líquida, descrito como:

$$w = \frac{4\pi}{3} \rho \int r^3 n_g(r) dr \quad (4)$$

onde ρ é a densidade da água líquida, r o raio da gota e $n_g(r)$, a distribuição numérica de gotas.

O raio efetivo das gotas (μm) é a medida do tamanho médio das gotas da nuvem, representado como:

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int r^3 n_g(r) dr}{\int r^2 n_g(r) dr} \quad (5)$$

Assim, assumindo o fator de eficiência Q para partículas muito grandes, aproximadamente 2, a profundidade óptica da nuvem é parametrizada como:

$$\tau_{\text{nuvem}} = \frac{3}{2\rho} \frac{\text{LWP}}{r_{\text{eff}}} \quad (6)$$

A τ_{nuvem} é o fator de atenuação da radiação ao passar por uma camada de material atenuador, nesse caso a nuvem, sendo diretamente proporcional à quantidade total de água líquida e inversamente proporcional ao raio efetivo das suas gotículas (Equação 6). Assim, em relação à RUV, o efeito das nuvens previsto é o de que, quanto menor o raio efetivo da

gótica da nuvem, mais significativa a atenuação da radiação nessa banda espectral (MATEOS et al., 2014).

No entanto, por falta de informação pertinente, para o presente trabalho não foram considerados os parâmetros supracitados, LWC, w e r_{eff} , para determinação de τ_{nuvem} . Sendo assim, a estimativa de τ_{nuvem} decorre das características padrão de nuvens segundo o ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*). A Figura 3 apresenta as categorias de profundidade óptica em função da altura e pressão do topo da nuvem para cada tipo de nuvem proposta pelo referido projeto.

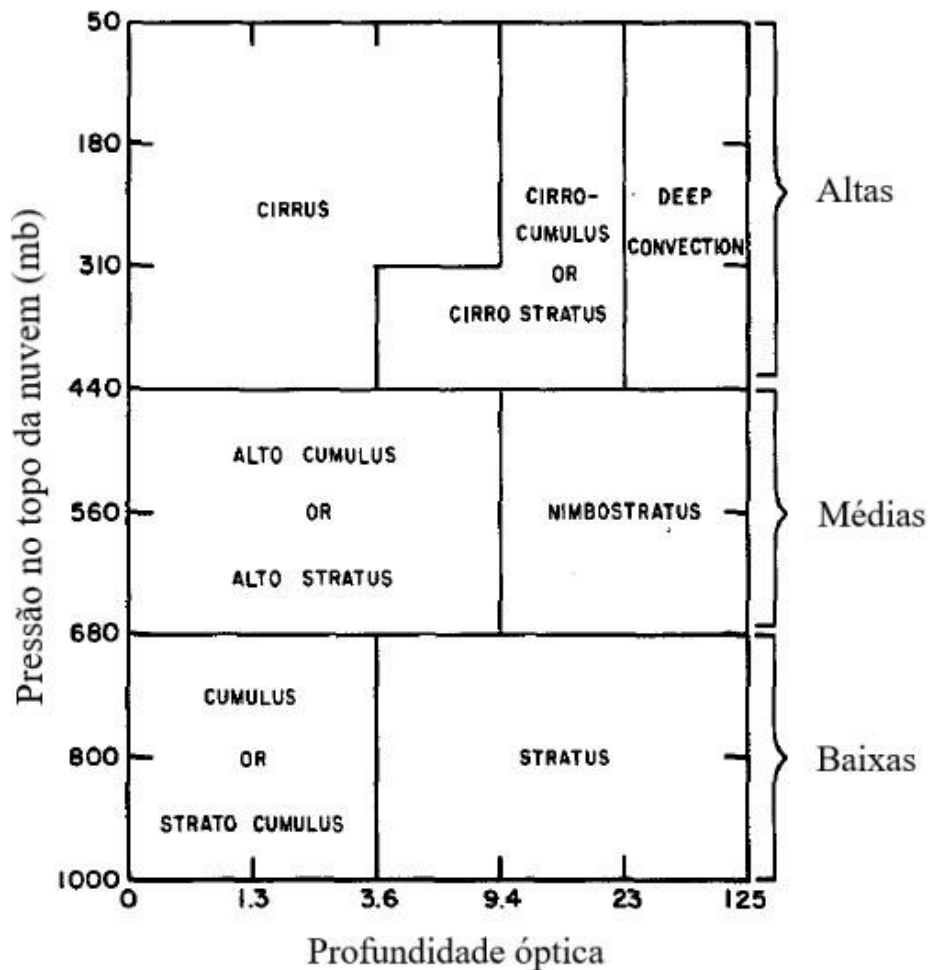


Figura 3. Categorias de profundidades ópticas e pressão no topo da nuvem.

Fonte: Adaptado de Tselioudis, Rossow e Rind (1992)

Outro parâmetro de entrada no MTR é a espessura vertical das nuvens, assumidas verticalmente uniformes a partir das alturas da base (Z_b) e topo (Z_t) das nuvens segundo, também, às recomendações do ISCCP.

3. DADOS E METODOLOGIA

3.1. Coleta e processamento de imagens digitais do céu

Para aplicação da técnica de imageamento de nuvens foram coletadas fotografias digitais do céu por uma câmera de *smartphone* (Samsung Galaxy A5) e uma câmera fotográfica (Sony Cyber-shot - DSH-H7) simultaneamente. O experimento foi realizado, entre os meses de março e maio de 2019, no prédio do Centro de Estudos em Qualidade Ambiental (CEQUAM), situado na Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (22° 24' S 45° 26' W).

A amostragem abrangeu um total de 21 dias e resultou em 230 imagens salvas no formato jpeg (*Joint Photographics Experts Group*), em 2448 linhas e 3264 colunas (aproximadamente 8 megapixels). Foram identificadas diferentes coberturas e tipos de nuvens - *Nimbostratus* (Ns), *Stratus* (St), *Stratocumulus* (Sc), *Cumulus* (Cu), *Alto cumulus* (Ac), *Cirrocumulus* (Cc) e *Cirrus* (Ci), além de condições de céu claro, em horários distintos entre 9 e 16 horas.

Os ângulos de visão das câmeras do *smartphone* e fotográfica são equivalentes a 65,1° e 71,9°, respectivamente. A pequena diferença na angulação possibilitou a comparação de ambas as câmeras com a observação visual. Não foi utilizada lente grande angular devido ao efeito de distorção da imagem, o que pode ocasionar superestimação da cobertura de nuvem (CN) devido ao brilho causado pela proximidade ao disco solar (LUIZ et al., 2018). Além disso, a proposta deste estudo é justamente a de avaliar a detecção de nuvens com sensores mais simples e comuns.

Com o intuito de caracterizar e classificar as condições atmosféricas de nebulosidade, foram realizadas análises descritivas a partir das imagens digitais do céu. Como etapa preliminar de classificação, as fotografias foram categorizadas de acordo com o tipo de nuvem, condição de Sol aparente ou encoberto e percentagem de cobertura do céu. Para condições de céu claro (CC), foram consideradas porcentagens entre 0 e 18% (0-1 octas); para céu parcialmente nublado (CPN), porcentagens variando entre 19 e 81% (2-6 octas); e céu totalmente encoberto (CTE) por nuvens, porcentagens entre 82 e 100% (7-8 octas).

A etapa seguinte do estudo consistiu no processamento das fotografias por um conjunto de algoritmos. A técnica consiste em converter cada imagem em uma matriz de três dimensões, sendo cada dimensão referente aos pixels R, G e B, do espaço vetorial de cores. O cálculo da diferença entre os pixels B e R e a aplicação de limiares arbitrários são utilizados para identificação e classificação dos pixels de nuvem ou de céu claro (HEINLE; MACKE;

SRIVASTAV, 2010; PARISI et al., 2016). Distintos valores de limiares são encontrados na literatura devido aos pequenos ajustes relacionados às características específicas de cada câmera. Por esta razão, foram avaliados três limiares equivalentes a 0,12, como no estudo de Heinle, Macke e Srivastav (2010), 0,9 e 0,6, para casos de céu brilhante e demais casos, respectivamente, como no estudo de Parisi e seus colaboradores (2016), e dez limiares arbitrários, para testes de sensibilidade.

Por fim, os pixels foram contabilizados para determinação da porcentagem total de cobertura de nuvens (Equação 7).

$$f = \frac{N_{\text{nuvem}}}{N_{\text{total}}} \quad (7)$$

Em que, N_{nuvem} é o número de pixels classificados como sendo pixels de nuvens, e N_{total} o número de pixels total da imagem.

Vale ressaltar que o método da diferença entre os pixels B e R para identificação da presença de nuvens se baseia na teoria de que, em uma atmosfera sem nuvens e com baixa quantidade de aerossóis, mais luz azul é espalhada por moléculas, ou seja, mais radiação azul é removida do feixe solar direto devido à forte dependência espectral (espalhamento Rayleigh). Por outro lado, para condições de nebulosidade, as partículas que constituem as nuvens, que possuem o comprimento de onda da mesma ordem de grandeza da radiação incidente, espalham radiação em todos os comprimentos de onda com a mesma eficiência, acarretando na coloração branca (espalhamento Mie) (HEINLE, MACKE; SRIVASTAV, 2010).

3.2. Instrumentação e modelagem da RUV

A segunda etapa do estudo consistiu da comparação e análise dos dados de RUV medidos por instrumento *in situ* e simulados por modelo de transferência radiativa. Os dados de RUV foram coletados por um radiômetro UV SUV-E da Kipp & Zonen (<https://www.kippzonen.com/Product/428/SUV-E-UV-Radiometer>), instalado no CEQUAM, na Universidade Federal de Itajubá. O radiômetro possui uma resolução temporal de um minuto, mede a RUV biologicamente ponderada por um espectro de ação do eritema semelhante ao proposto por McKinlay e Diffey (1987) e apresenta incerteza máxima de 5%, para ângulos solares zenitais inferiores a 70° (KIRCHHOFF et al., 2000).

Para a modelagem foi utilizado o MTR TUV (*Tropospheric Ultraviolet and Visible*) (MADRONICH, 1992), versão 5.3.2. Os MTR são utilizados para estimarem, de modo espectral ou integrado, as grandezas radiométricas, sob diferentes condições e níveis da atmosfera. Para tanto, considerou-se o perfil vertical de atmosfera tropical (ELLINGSON; ELLIS; FELS, 1991) e o MTR foi alimentado com os seguintes perfis atmosféricos para a localidade:

- CTO diários fornecidos pelo sensor *Ozone Monitoring Instrument* (OMI/NASA), com resolução espacial de 13 x 24 km², a bordo do satélite Aura, que possui órbita heliossíncrona (a cada órbita, o satélite cruza a linha do Equador no mesmo horário), a 750 km de altitude (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data>).

- Propriedades ópticas de aerossóis, como profundidade do aerossol (AOD, do inglês, *aerosol optical depth*) em 500 nm e coeficiente de Angström (α) entre 440 e 870 nm, fornecidas pelo fotômetro Cimel modelo 318A, da rede AERONET (*AErosol RObotic NETwork*), instalado no sítio experimental na Universidade Federal de Itajubá. A AOD é o fator de atenuação da radiação ao passar por uma camada de material atenuador, como o aerossol, e o coeficiente de Angström é um indicativo do tamanho médio predominante de aerossóis na atmosfera (YAMASOE; CORRÊA, 2016). Já, o parâmetro atmosférico referente ao albedo simples (ω_0), que representa a fração da radiação que foi atenuada por espalhamento, foi considerado constante e equivalente a 0,9, com base nas séries de dados precedentes coletados em Itajubá.

Para representação das nuvens no MTR, foram realizados testes de sensibilidade envolvendo distintos valores de profundidades ópticas da nuvem (0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 125 e 150), baseado no estudo de Tselioudis, Rossow e Rind (1992), alturas da base e topo (1-2 km, 6-7 km e 13-14 km) e espessura vertical (1, 4 e 9 km).

Por fim, os dados de RUV coletados pelo radiômetro UV e simulados pelo MTR foram avaliados em termos de IUUV.

3.3. Análise estatística

Para avaliar a acurácia dos dados de RUV simulados pelo MTR, foram utilizados métodos estatísticos: raiz do quadrado médio do erro (RQME), coeficiente de correlação (r), tendência (BIAS) e índice de concordância (d).

O RQME é utilizado como uma estatística padrão para avaliar a performance de modelos em áreas da meteorologia, como na qualidade do ar e estudos climáticos (CHAI; DRAXLER, 2014), e expressa a magnitude do erro produzido pelo modelo, ou seja, quanto mais próximo de zero, melhor é o modelo (JANSSEN; HEUBERGER, 1995; STRECK et al., 2008).

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

O r determina a intensidade da relação linear entre duas variáveis, ou seja, mede o grau de correlação entre os valores simulados e observados (HAUKE; KOSSOWSKI, 2011). Valores próximos de um, positivos ou negativos, indicam maior associação entre os dados.

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}} \quad (9)$$

O índice BIAS é dado pelo desvio dos valores estimados em relação aos observados e indica a tendência do modelo em subestimar ou superestimar os valores simulados. Desta forma, quanto mais próximo de zero, menor é a magnitude do erro do modelo (LEITE; ANDRADE, 2002).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

O índice d define a exatidão dos valores estimados em relação aos observados e varia de zero, para nenhuma concordância, a um, para concordância perfeita (WILLMOTT, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

Em que, E_i serão os valores de RUV simulados pelo MTR TUV, O_i os dados de RUV medidos pelo radiômetro, \bar{E} a média dos valores de RUV simulados, \bar{O} a média dos valores medidos de RUV e n o número de observações.

3.4. Avaliação das nuvens e RUV

Essa etapa do estudo constituirá da avaliação quantitativa do efeito dos tipos de nuvens sobre os fluxos de RUV em superfície. Para tanto, será utilizado o índice *Cloud*

Modification Factor (CMF) (Eq. 6), definido como a razão entre a irradiância UV medida, sob condições de nebulosidade (UV), e simulada, sob condições de céu claro (UV₀) (FOYO-MORENO et al., 2001; STAIGER et al., 2008; MATEOS et al., 2015; PARISI et al., 2016; PARK et al., 2017).

$$\text{CMF} = \frac{\text{UV}}{\text{UV}_0} \quad (12)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise das fotografias do céu

A Figura 4 exibe amostras de fotografias provenientes da câmera fotográfica categorizadas em três classes: céu claro - CC (0-18%), céu parcialmente nublado - CPN (19 - 81%) e céu totalmente encoberto por nuvens - CTE (82 - 100%), conforme observação visual. Condições de CC representam 60% da amostragem, seguidas pela classe de CTE, com cerca de 27% e CPN, em torno de 13%.



Figura 4. Amostras de fotografias para as condições de (a) CC, (b) CPN e (c) CTE.

Vale ressaltar que os casos de céu claro, correspondentes a maior parte da amostragem, não implicam em eventos de ausência total de nebulosidade, visto que abrangem porcentagens de cobertura de nuvens de até 18%, mas que não ocultam o disco solar. Para condições de CPN, cerca de 59% das amostras apresentaram sol encoberto por nuvens. Já, condições CTE apresentaram Sol encoberto em todos casos, respectivamente.

O conjunto amostral de fotografias englobou casos de ausência total de nebulosidade (31%) e sete tipos distintos de nuvens (69%): *Nimbostratus* (Ns), *Stratus* (St), *Stratocumulus* (Sc), *Cumulus* (Cu), *Alto cumulus* (Ac), *Cirrocumulus* (Cc) e *Cirrus* (Ci), pertencentes as categorias de nuvens baixas (abaixo de 2 km), nuvens médias (entre 2 e 6 km) e nuvens altas (acima de 6 km) (Figura 5). Nuvens do tipo Ac caracterizam a maior ocorrência (16%), ao passo que nuvens Sc e St, as menores (3,5%).

A alta ocorrência de eventos de ausência de nuvens foi influenciada pelas condições atmosféricas características da estação do outono, em que há diminuição da atividade convectiva devido a atuação de um sistema de alta pressão sobre a região sudeste e sul do Brasil. Esse sistema inibe os movimentos ascendentes na atmosfera e a propagação de sistemas frontais, o que acarreta em frequentes eventos de céu claro e conseqüentemente redução da precipitação (REBOITA et al., 2015).

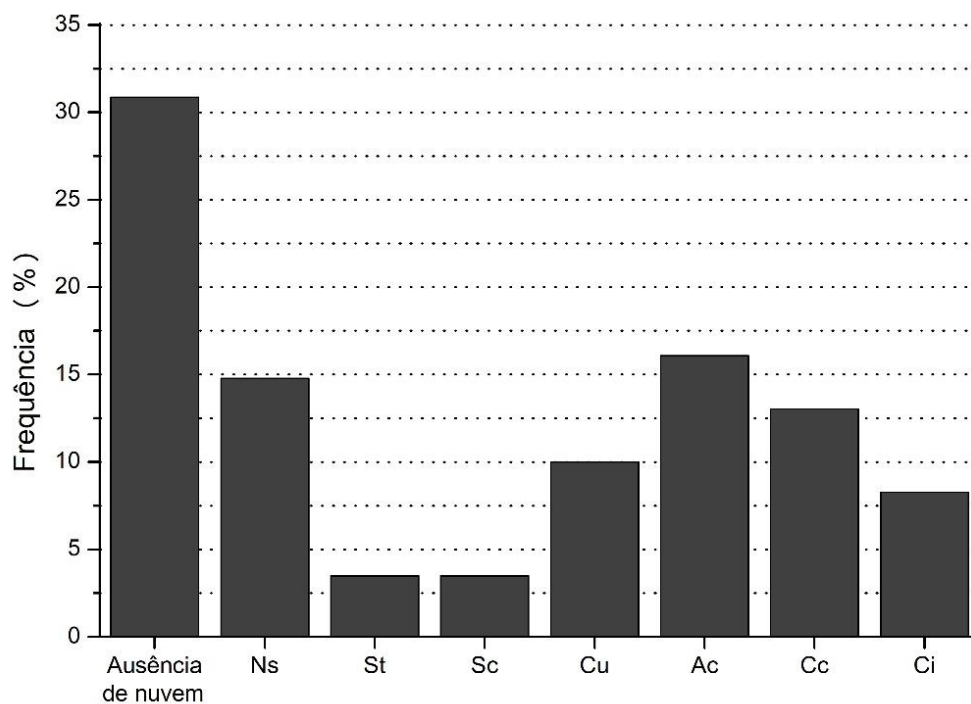


Figura 5. Distribuição de frequência dos casos de ausência de nebulosidade e tipos de nuvens presentes na amostragem.

Uma vez que os ângulos de visão das câmeras são distintos, fez-se necessário a realização de análises visuais para cada uma delas. Desta forma, a fim de verificar a correlação entre a cobertura de nuvem determinada pela inspeção visual das imagens de *smartphone* e câmera fotográfica, foi utilizado o método estatístico de análise de regressão com ajuste linear (Figura 6).

A equação de regressão linear apontou um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,9997$), o que indica alta correlação entre o conjunto dos dados observacionais. Isto é, a variação total dos dados observados provenientes da câmera fotográfica podem ser quase que totalmente explicados pela relação linear entre ambos os aparelhos. O alto valor do coeficiente de determinação comprova que o modelo linear utilizado é adequado e que os dados de cobertura de nuvem determinados a partir de inspeção visual, por meio das fotografias, produzem informações consistentes entre as câmeras, independentemente do tipo e condição de nebulosidade.

O coeficiente angular próximo de um (1,0037), indica que as variações da cobertura de nuvem entre as câmeras podem ser ajustadas por um fator de compensação “*offset*” de -0,2127. Esse valor pode estar relacionado aos diferentes campos de visão das câmeras, que ocasionaram em distintas coberturas de nuvens.

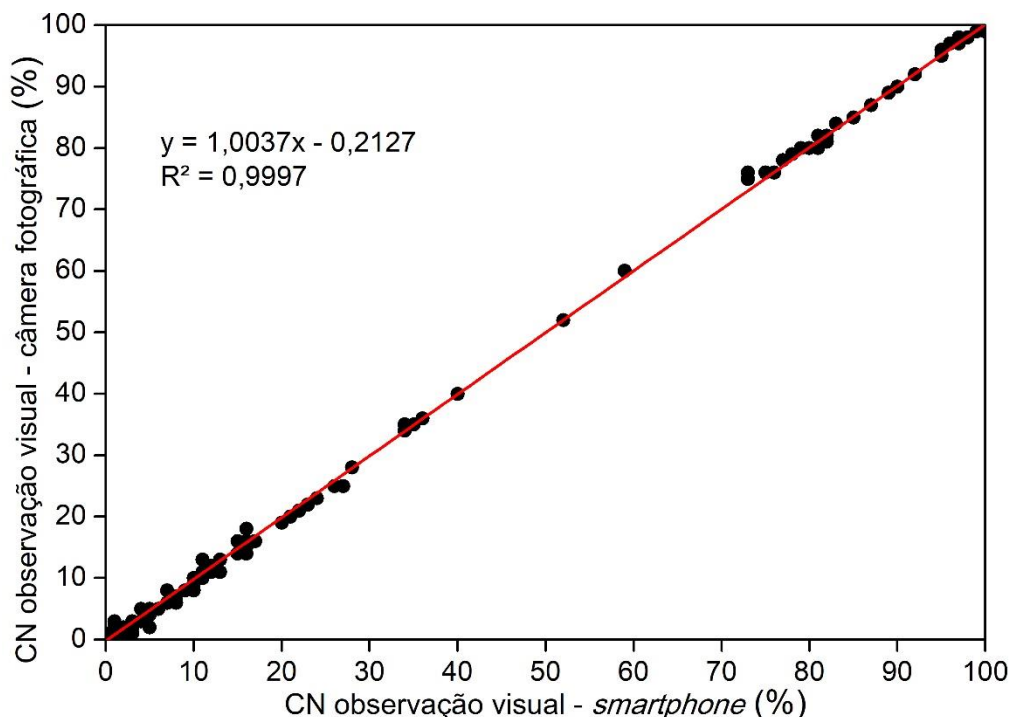


Figura 6. Correlação entre o conjunto de dados observacionais de CN provenientes das câmeras de *smartphone* e fotográfica.

4.2. Avaliação estatística dos limiares de classificação dos pixels de nuvens

Nesta subseção são apresentadas as análises estatísticas dos 13 limiares, dentre os encontrados na literatura (0,12, 0,165 e 0,9), aplicados no conjunto de algoritmos para identificação e classificação dos pixels de nuvens.

As Figuras 7a-b mostram a correlação entre os dados de CN a partir de observações visuais das fotografias e aquelas processadas pelos algoritmos, considerando o limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010). As equações de regressão linear apresentaram coeficientes de determinação equivalentes a 0,7717 e 0,7903 para a cobertura de nuvem imageada pelo *smartphone* e câmera fotográfica, respectivamente. A diferença entre os coeficientes de determinação pode estar relacionada às características específicas das câmeras, como por exemplo, o nível de sensibilidade à luz, o que diferencia a tonalidade do céu e das nuvens nas fotografias. De modo geral, os dados processados com aplicação do limiar de 0,12 para distinguir os pixels de nuvem, indicam característica de subestimativa em relação aos dados observacionais, para ambas metodologias de imageamento.

A presença de *outliers*, neste estudo considerado como valores acima do percentil 95 (P95), afeta diretamente os ajustes de regressão linear e conseqüentemente os coeficientes de determinação. Esses valores discrepantes estão associados à eventos específicos de nuvens Ci e Ac, com condição de céu totalmente encoberto. A eliminação desses eventos resultou em equações de regressão com coeficientes de determinação de 0,9284 e 0,9480 para os dados procedentes do *smartphone* (Figura 8a) e câmera fotográfica (Figura 8b), respectivamente, o que indica um bom desempenho da técnica e da aplicabilidade do limiar na determinação da cobertura de nuvem ($p < 0,0001$). Estudos mais aprofundados devem ser realizados para melhores ajustes do processamento quando há presença de nuvens Ci e Ac.

Quanto aos limiares de 0,65 e 0,9, descritos no estudo de Parisi et al. (2016), os resultados do processamento apontaram valores de cobertura de nuvem equivalentes a 100% para todos os casos, independentemente da cobertura e tipo de nuvem presentes. Esses eventos caracterizam a não aplicabilidade de ambos limiares na determinação da cobertura de nuvem e comprova que características específicas das câmeras interferem diretamente na seleção dos limiares de separação.

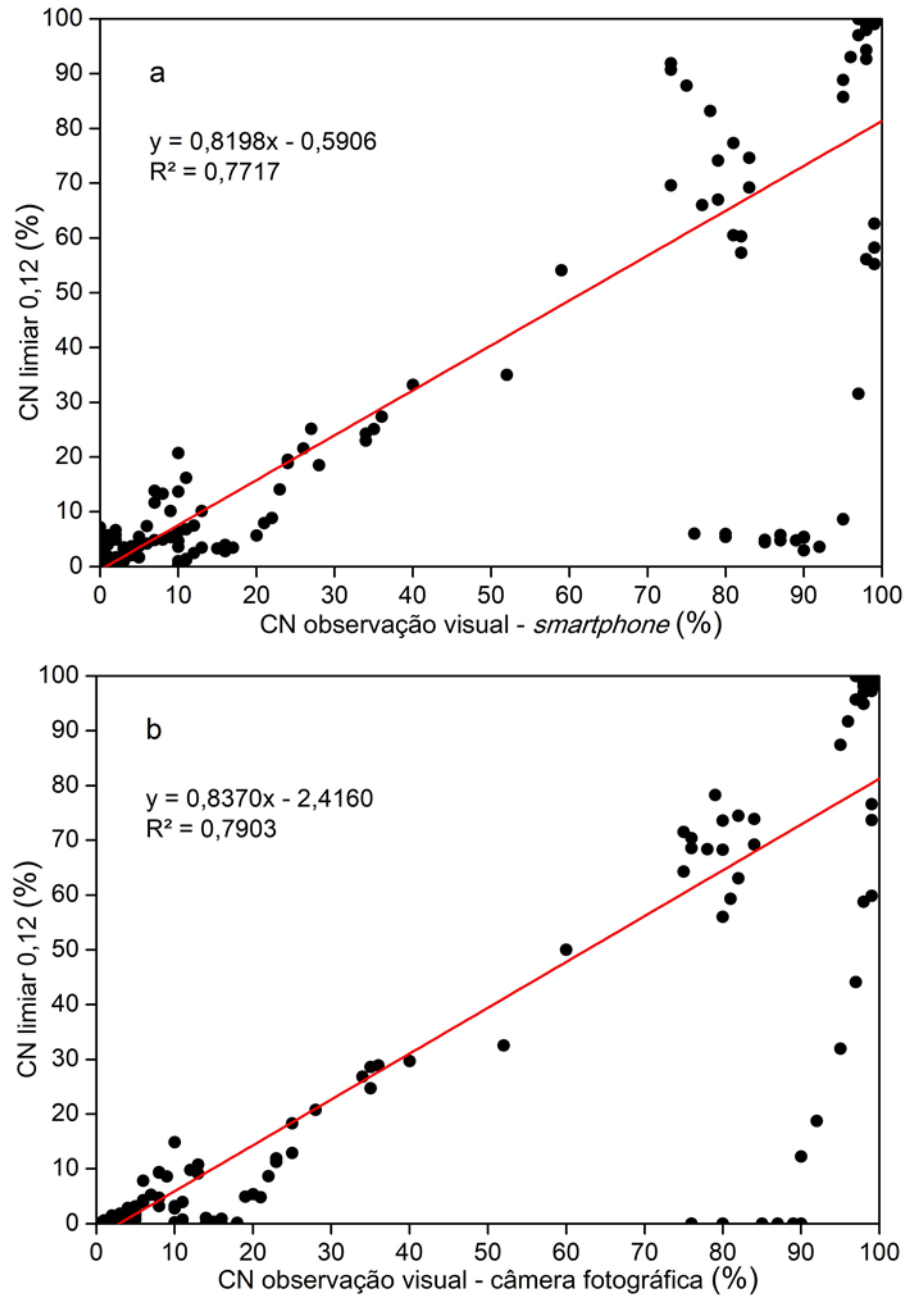


Figura 7. Correlação entre CN determinada pela inspeção visual das imagens a. de *smartphone* e b. câmera fotográfica, e processadas por algoritmos considerando o limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010).

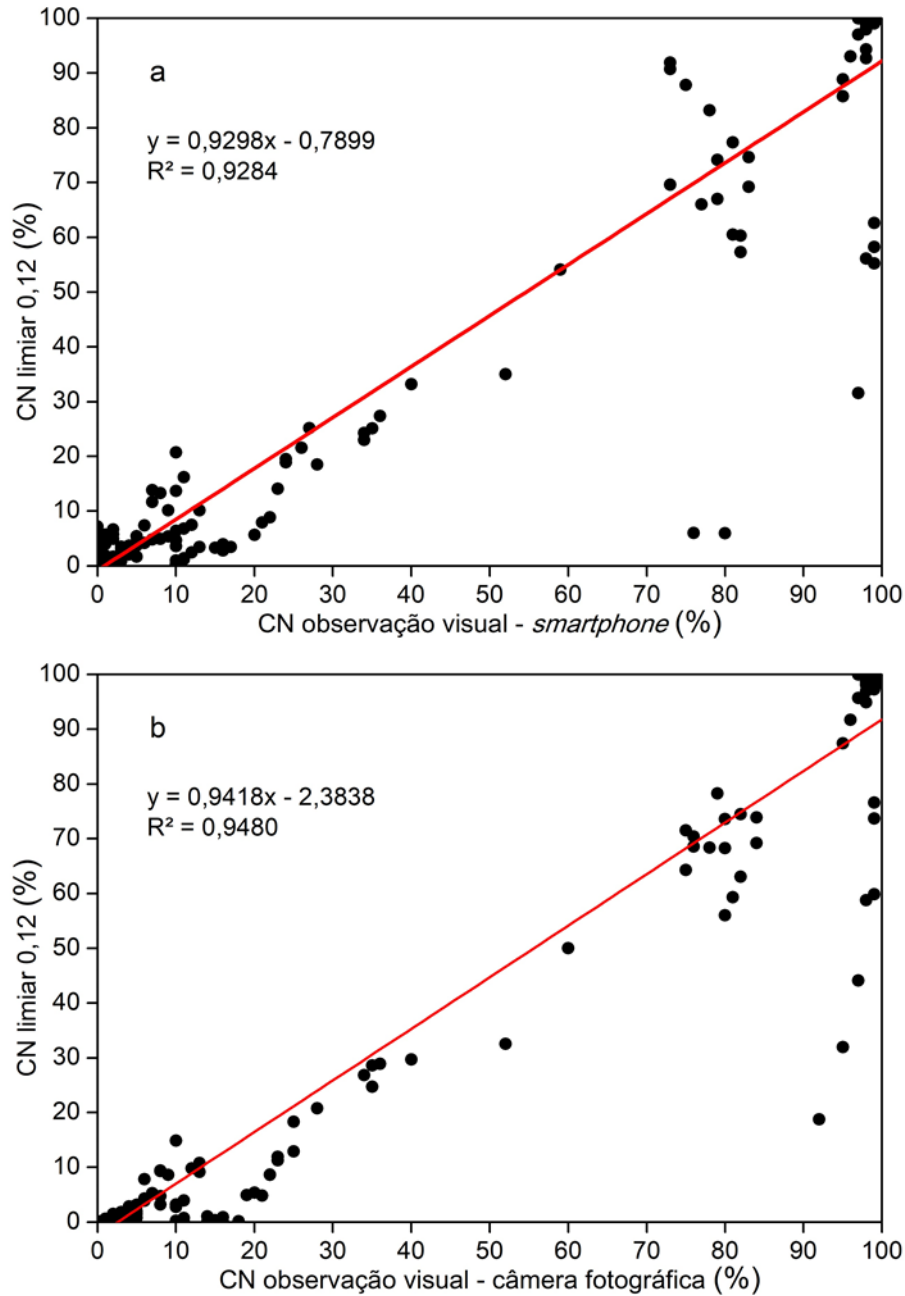


Figura 8. Correlação entre CN determinada pela inspeção visual das imagens a. de *smartphone* e b. câmera fotográfica, e processadas por algoritmos considerando o limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010) com exceção de *outliers*.

Para fins de complementariedade das análises, dez limiares para classificação dos pixels de nuvens foram avaliados em termos de análise de regressão linear. Os respectivos coeficientes angulares (a), lineares (b) e de determinação (R^2), para a cobertura de nuvens a partir do *smartphone* e câmera fotográfica são mostrados na Tabela 2. O maior coeficiente de determinação, ao se considerar as imagens do *smartphone*, foi equivalente a 0,8194 para o limiar de 0,18. Enquanto que, para a câmera fotográfica, o limiar de 0,26 resultou em um

coeficiente de determinação de 0,9048, ambos maiores do que os resultados processados com a utilização do limiar de 0,12, descrito na literatura. Com a eliminação dos valores de cobertura de nuvem acima do percentil 95, os coeficientes de determinação passaram para 0,9550 e 0,9697 ao se considerar as fotografias provenientes do *smartphone* e câmera fotográfica, respectivamente. O elevado coeficiente de determinação é um indicativo da qualidade do modelo, com alta significância estatística ($p < 0,0001$), o que aponta um bom desempenho do conjunto de algoritmos na determinação da cobertura de nuvem a partir das fotografias digitais do céu.

É válido ressaltar que os coeficientes de determinação referentes às análises de cobertura de nuvem a partir da câmera fotográfica foram maiores, em todos os casos, em comparação com o *smartphone*. Essas diferenças podem estar associadas às características relacionadas aos ângulos de visão e saturação de cor de cada uma das câmeras, que é a medida da intensidade das cores.

Tabela 2. Coeficientes angulares (a), lineares (b) e de determinação (R^2) das equações de regressão linear para o *smartphone* e câmera fotográfica, considerando distintos limiares.

Limiares	Coeficientes					
	a		b		R^2	
	<i>Smartphone</i>	Câmera fotográfica	<i>Smartphone</i>	Câmera fotográfica	<i>Smartphone</i>	Câmera fotográfica
0,10	0,7906	0,8042	-1,2037	-2,5500	0,7426	0,7667
0,14	0,8445	0,8578	0,2001	-2,1858	0,7953	0,8084
0,16	0,8603	0,8759	1,5533	-1,9236	0,8110	0,8237
0,18	0,8595	0,8930	4,2482	-1,5850	0,8194	0,8379
0,20	0,8368	0,9088	8,8055	-0,9924	0,7890	0,8560
0,22	0,7787	0,9220	16,6790	0,0020	0,6989	0,8755
0,24	0,6926	0,9309	27,271	1,4976	0,5878	0,8954
0,26	0,5736	0,9244	41,7080	5,1461	0,4072	0,9048
0,28	0,4803	0,8735	54,7700	13,8400	0,2983	0,8289
0,30	0,4021	0,7703	64,0400	27,3970	0,2336	0,6156

4.3. Testes de sensibilidade no MTR TUV

Nesta subseção são apresentados os resultados dos testes de sensibilidade envolvendo a simulação de dados de IUV no MTR TUV. Os testes de sensibilidade são fundamentais para a análise deste estudo pois permitem avaliar a dependência do IUV em relação aos principais parâmetros ópticos das nuvens. Os cálculos foram realizados em função de distintas

profundidades ópticas (0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 125 e 150), alturas da base e topo das nuvens (h1: 1-2 km, h2: 6-7 km e h3: 13-14 km) e espessura vertical (e1: 1 km, com $Z_b=1$ km e $Z_t=2$ km, e2: 4 km com $Z_b=1$ km e $Z_t=5$ km e e3: 9 km com $Z_b=1$ km e $Z_t=10$ km). Os resultados, para os solstícios de inverno e verão, são apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

O IUV apresentou um decréscimo exponencial com o aumento da profundidade óptica; essa redução foi de até 95,5% comparada com a profundidade óptica de 0 (céu claro). A presença de nuvens na atmosfera atenuou cerca de 25%, 58% e 93% ao se considerar as profundidades de 5, 20 e 120, respectivamente, independentemente das altitudes da base e topo e espessura vertical da nuvem. A utilização da profundidade óptica equivalente a 1 resultou na atenuação de IUV de até 7%, para o solstício de inverno e 6,5% para o solstício de verão.

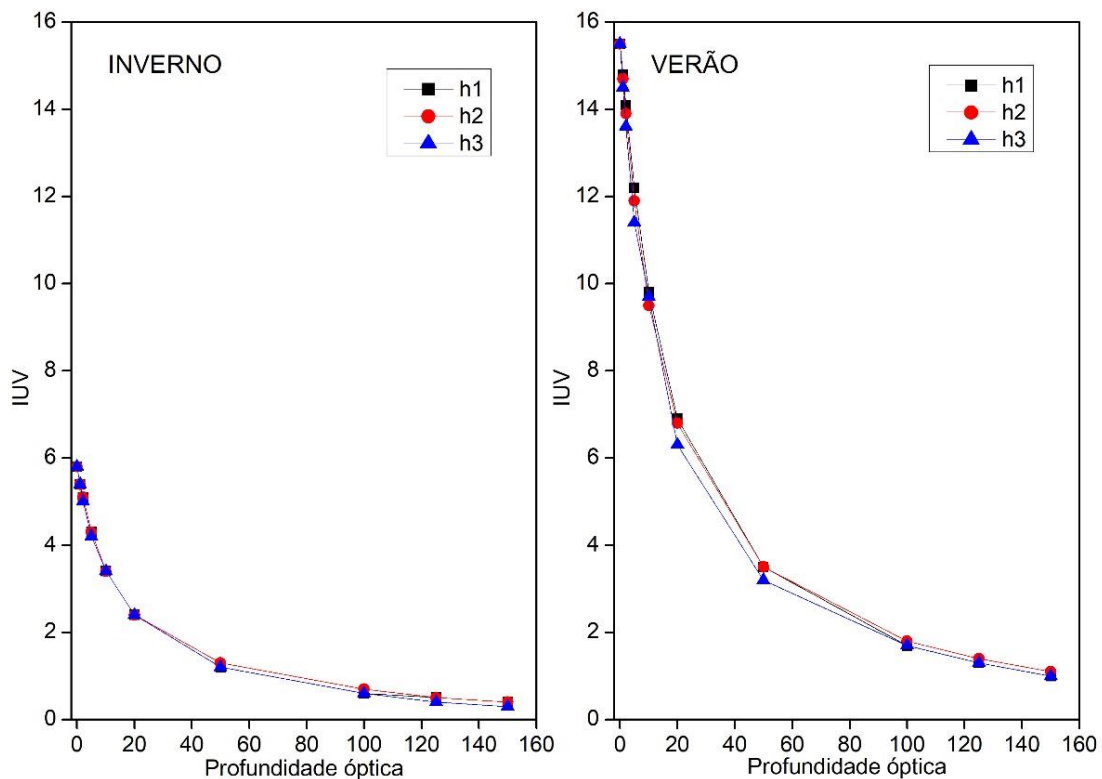


Figura 9. Relação de IUV e profundidade óptica para distintas alturas da base e topo das nuvens (h1, h2 e h3) nos solstícios de inverno e verão.

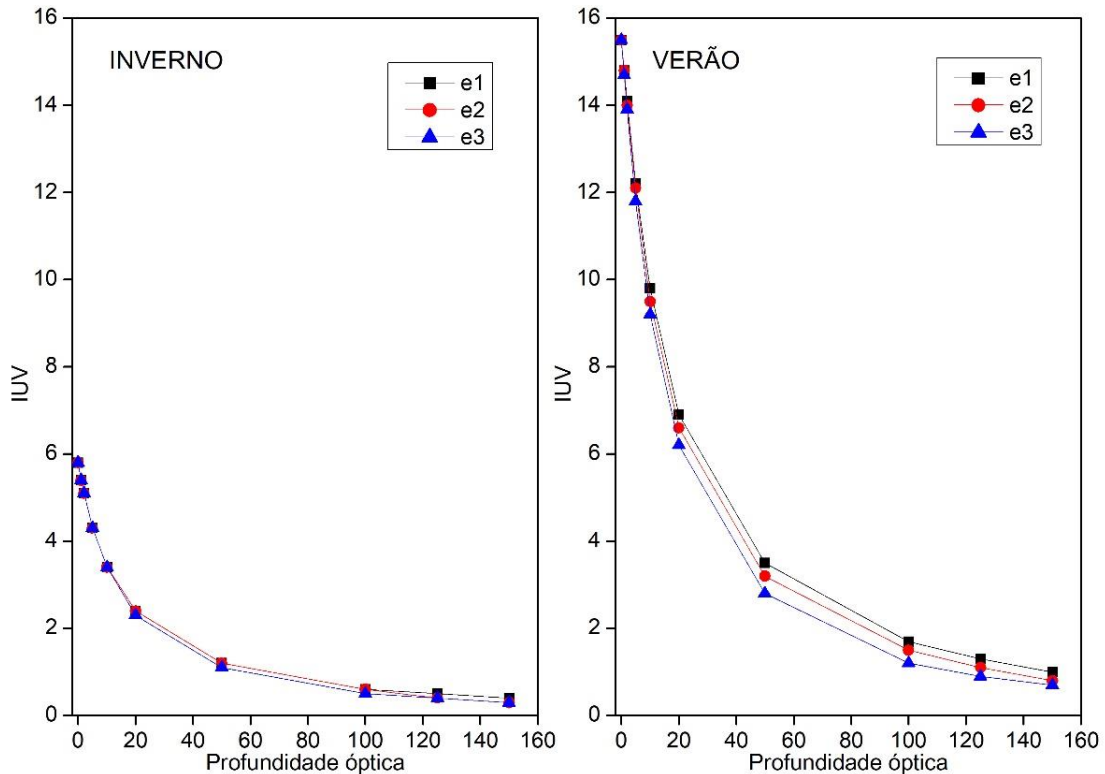


Figura 10. Relação de IUV e profundidade óptica para distintas extensões verticais das nuvens (e1, e2 e e3) nos solstícios de inverno e verão.

Em relação às alturas da base e topo e, por consequência, a espessura vertical das nuvens avaliadas, os resultados apontaram diferenças relativas inferiores a 1,7% e 3,2%, para os valores de IUV simulados para um mesmo valor de profundidade óptica, nos solstícios de inverno e verão, respectivamente. Esses percentuais indicam variações pouco significativas, inferiores a 0,03 IUV. Esses valores de diferenças indicam que a altura da base e topo da nuvem na atmosfera, ou seja, a altitude da nuvem no céu, bem como sua espessura vertical, não exerce influência significativa nas simulações de IUV pelo MTR TUV, se comparado à profundidade óptica. Isto é, o MTR TUV é pouco sensível às variações desses parâmetros.

4.4. Avaliação do MTR TUV

A avaliação estatística do desempenho do MTR TUV em simular o IUV em casos de céu claro, com ausência total de nebulosidade, é apresentado na Tabela 3. O coeficiente de correlação (r) equivalente a 0,8917 indica uma correlação forte e positiva entre os dados de RUV simulados e medidos pelo radiômetro UV. O índice de concordância (d) apresentou

valor próximo de um (0,9175) e infere a exatidão dos valores estimativos em relação aos observados. Além disso, o valor da tendência (BIAS) e da raiz do quadrado médio do erro (RQME), equivalentes a 0,1216 e 1,3344, respectivamente, apontam a existência de pequeno desvio entre os dados de RUV simulados e observados, com baixa magnitude de erro do modelo e tendência de superestimativa do modelo nas simulações. Os valores de r e d próximos de um, do BIAS próximo de zero e de um baixo valor de RQME são fortes indicativos que o modelo é bastante preciso para simulações do IUV sob condições de céu claro.

Tabela 3. Análise estatística comparativa entre os dados de IUV simulados pelo MTR TUV e coletados pelo radiômetro UV, em casos de ausência total de nuvens.

RQME	1,3344
r	0,8917
BIAS	0,1216
d	0,9172

Uma vez que o MTR TUV não admite informações de frações de cobertura de nuvem como dados de *input*, visto que a nuvem é representada por uma camada plano-paralela (cobertura total) e horizontalmente uniforme, foram realizadas simulações de IUV envolvendo dez distintos valores de profundidades ópticas (0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 125 e 150).

Sob condições de nebulosidade e Sol aparente, 68% dos dados de IUV apresentaram diferenças relativas dentro do limiar de $\pm 10\%$ para profundidade óptica de 0, ou seja, situações de céu claro (sem nuvens). Nesses casos, a diferença relativa máxima encontrada (-8,7%) implicou na variação de 0,8 ($\Delta IUV = 0,8$) no IUV. A tabela para todas as datas de coleta de Sol aparente se encontra no Apêndice A deste manuscrito. Adicionalmente, 54% dos dados de IUV se encontraram dentro do limiar: IUV observado $\pm 0,5$. Nesses casos, a máxima diferença relativa entre os valores simulados e observados foi de -7,2%, com diferença de 0,5 ($\Delta IUV = 0,5$). Para esses episódios, a inserção de nuvens nas simulações do MTR não acarretou resultados significativos na modelagem da RUV.

Para os casos em que o disco solar se encontrou encoberto pelas nuvens (Apêndice B), as simulações apresentaram resultados de IUV estimado dentro do limiar: IUV observado $\pm 0,5$, para todos os valores de profundidades ópticas. Esses resultados não indicaram a existência de relação entre tipo ou cobertura de nuvem e a utilização de profundidade óptica específica. No caso de forte atenuação do IUV causada por nuvens do tipo Ns, as medidas de IUV e as simulações apontaram diferenças relativas, dentro do limiar IUV observado $\pm 0,5$, de até -30%, com $\Delta IUV = -0,3$. Por outro lado, simulações para céu parcialmente nublado com nuvens Ci, mostraram diferenças em torno de 10%, com $\Delta IUV = 0,5$.

A fim de avaliar o desempenho do MTR sob condições de Sol aparente e encoberto por nuvens, os dados de IUV foram analisados estatisticamente em termos de RQME, r, BIAS e índice d (Tabela 4). Para tanto, foi selecionado o valor de IUV simulado, sob diferentes condições de profundidades ópticas, que mais se aproximou do valor observado (Apêndice B).

Em eventos de nebulosidade, as simulações de IUV pelo MTR apontaram correlação positiva muito forte ($r > 0,91$) e elevada concordância ($d > 0,92$) entre os dados simulados pelo modelo e medidos pelo instrumento, para os casos de Sol aparente e encoberto. Eventos de Sol aparente apresentaram valores inferiores de RQME e BIAS se comparado aos eventos de Sol encoberto por nuvens, o que acarreta em menores magnitudes de erros. No entanto, ambos os casos apresentaram bom desempenho do modelo, mas que tende a superestimar os dados de IUV (Figuras 11a-b).

Tabela 4. Métodos estatísticos para os dados de IUV simulados pelo MTR TUV e coletados pelo radiômetro UV em casos de nebulosidade com Sol aparente e encoberto.

Método estatístico	Casos Sol aparente	Casos Sol encoberto
RQME	0,7687	1,6278
r	0,9202	0,9176
BIAS	-0,0371	-0,1528
d	0,9439	0,9249

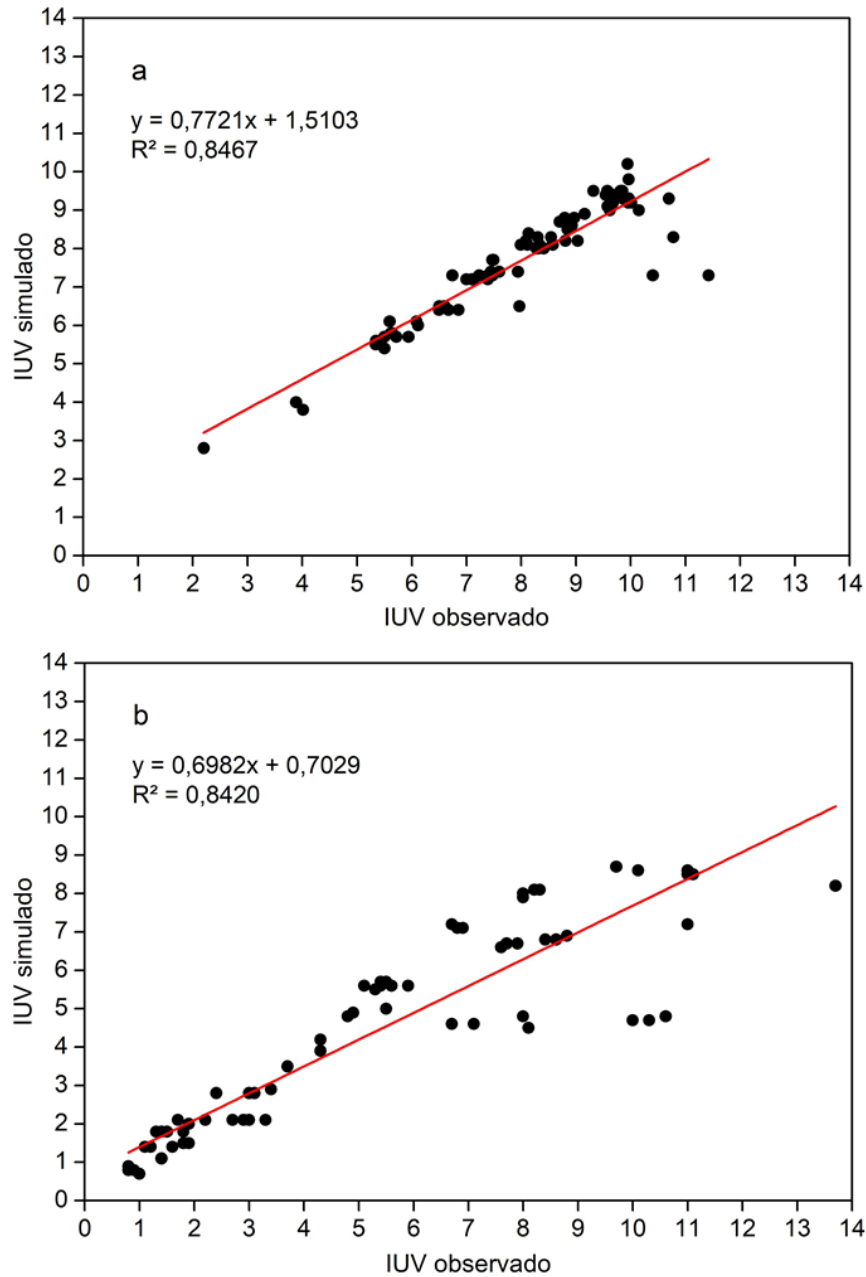


Figura 11. Correlação entre IUV medido pelo radiômetro UV e simulado pelo MTR TUV em eventos de nebulosidade em a. casos de Sol aparente e b. casos de Sol encoberto.

4.5. Avaliação do IUV e *Cloud Modification Factor* (CMF)

Durante a realização do experimento, o valor de IUV máximo observado na localidade de Itajubá foi de 13,7 (Extremo), na presença de nuvens do tipo *Alto cumulos* (Ac), em abril de 2019 (Figura 12). Esse resultado mostra que a presença de nuvens e a estação do outono não significam menor risco à saúde. Entre os meses de março e maio, no período das 9 às 16 horas, 50% das medidas de IUV registradas foram superiores a 7,0, com potencial danoso

“Muito Alto”, segundo a OMS (WHO, 2002). Nesse período de estudo, o valor médio de IUV foi de 6,4 ($\pm 2,9$), considerado a “Alto”.

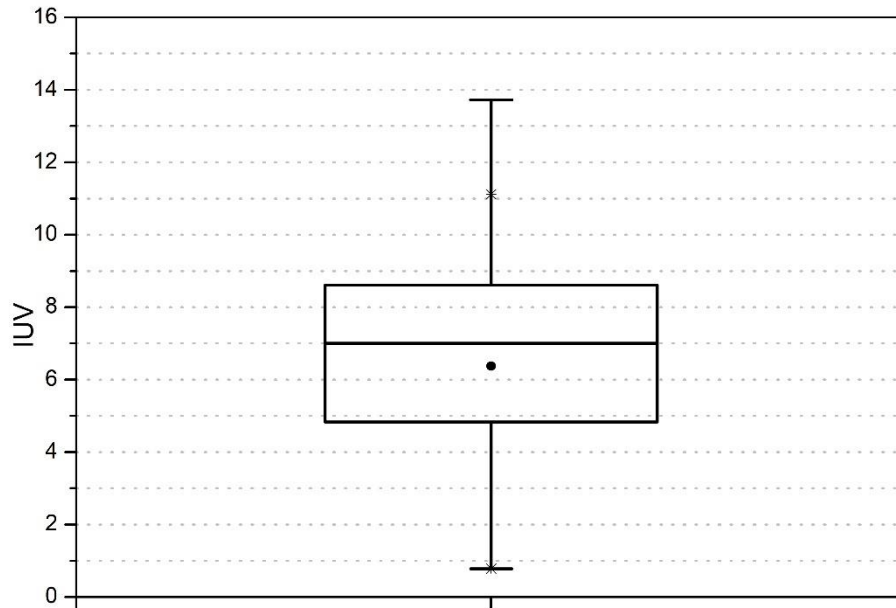


Figura 12. *Boxplot* do IUV para o período de realização do experimento (março-maio de 2019).

Para análise quantitativa do efeito das nuvens nos fluxos de RUV em superfície foi aplicado o índice *Cloud Modification Factor* (CMF) em termos de IUV e os resultados são mostrados na Figura 13.

Nuvens do tipo Cu apresentaram os maiores valores de CMF médios, equivalentes a 1,1 ($\pm 0,1$). Valores de CMF superiores a um indicam que o IUV medido sob condições de nebulosidade excede o IUV simulado sob condições de céu claro, sendo assim, ocorre um processo de intensificação da RUV. No caso de nuvens Cu esse fenômeno ocorre, possivelmente, devido à reflexão da radiação pelas laterais das nuvens (VILLÁN; CASTRILLO; SANTOS, 2010).

Por outro lado, o menor valor médio de CMF, correspondente a 0,2 ($\pm 0,1$), foi encontrado em nuvens Ns. Para esse tipo de nuvem, o CMF variou de 0,1 a 0,5, o que caracteriza um efeito de atenuação de RUV, uma vez que possuem grande extensão, espessura suficiente para encobrir completamente o Sol e, comumente, apresentam coloração acinzentada, o que está associada à ocorrência de precipitação. Nesses casos, a RUV sofreu atenuação, em média, de 6 unidades de IUV ($\pm 1,3$), causada por céu totalmente encoberto por nuvens.

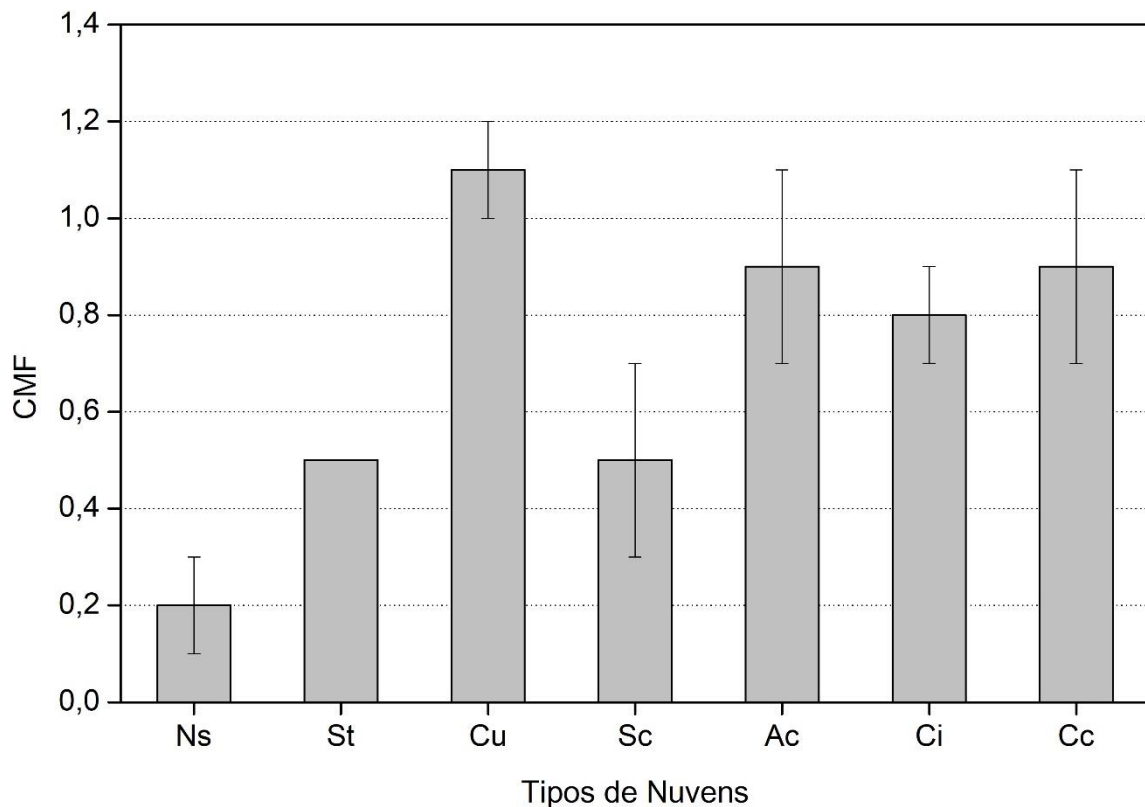


Figura 13. Valores médios de CMF e desvios padrão para cada tipo de nuvem.

4.6. Estudo de caso: IUV x CN

A Figura 14, mostra a variação do IUV, medido pelo radiômetro UV, e da CN, inferida pelo conjunto de algoritmos, em eventos de céu encoberto predominantemente por nuvens do tipo Ns, St e Ac, no período entre 10 e 12 horas do dia 02 de maio de 2019.

Em relação à RUV medida em superfície, o máximo valor de IUV foi equivalente a 13,3, considerado “Extremo”, segundo a OMS (WHO, 2002), mesmo em evento de céu parcialmente nublado com nuvens *Alto cumululus* (Ac). Ao longo da amostragem, a CN atingiu mínimos e máximos equivalentes a 49 e 100%, respectivamente, correspondendo às condições de céu parcialmente nublado e totalmente encoberto. Essas condições de nebulosidade acarretaram em variações de IUV em cerca de 12.

De modo geral, concomitantemente com a diminuição da CN, houve o aumento do IUV, o que evidencia a influência da cobertura de nuvens nas medidas de RUV, de modo diretamente proporcional em grande parte do período em questão, sendo mais representativo nas variações mais significativas.

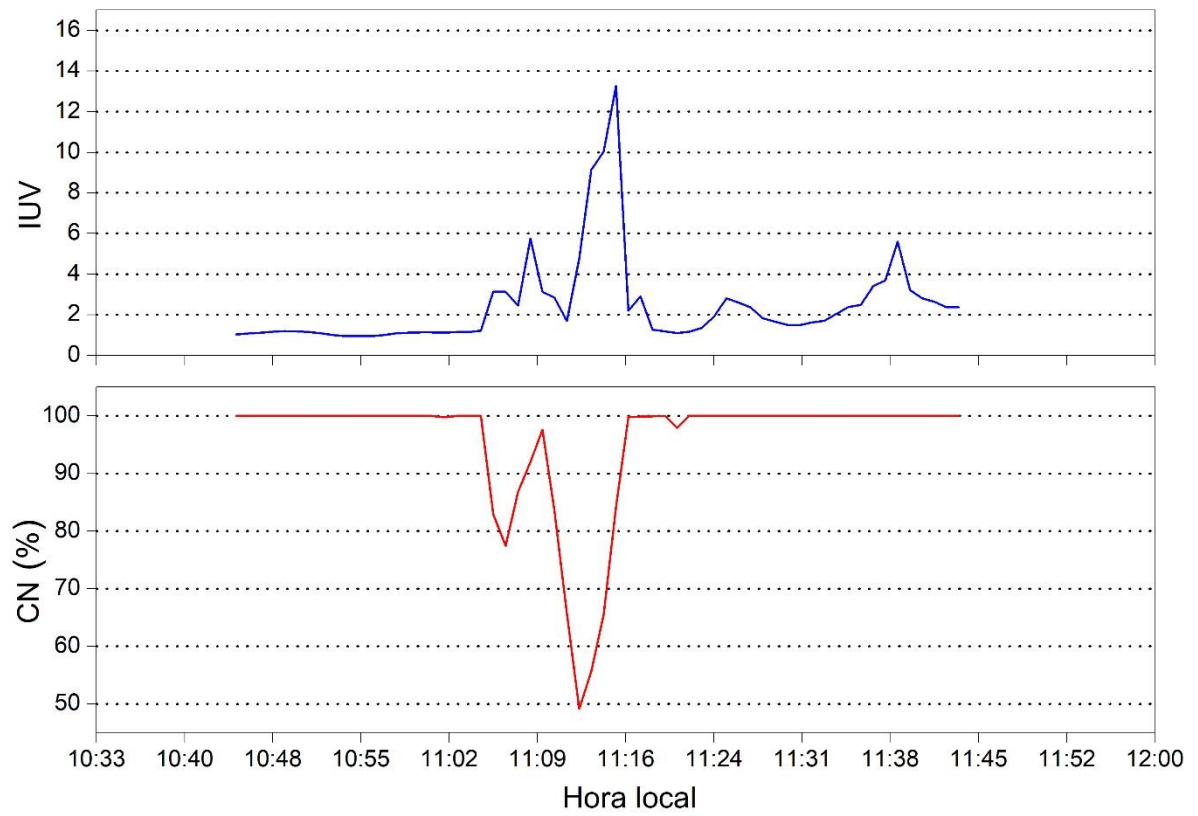


Figura 14. IUV e CN para a localidade de Itajubá (02 de maio de 2019, entre 10 e 12 horas).

5. CONCLUSÕES

A análise descritiva e estatística das fotografias digitais do céu apontou forte correlação linear entre o conjunto de dados observacionais de cobertura de nuvem inferidas pela observação visual das imagens provenientes do *smartphone* e câmera fotográfica, independentemente do tipo e condição de nebulosidade. Esse tipo de resposta indica que, pequenas variações de cobertura de nuvem podem estar relacionadas aos diferentes ângulos de visão das câmeras.

Em relação a utilização do conjunto de algoritmos para determinação da porcentagem de nuvens presentes nas fotografias, os resultados mostraram que os distintos coeficientes de determinação precedentes das imagens do *smartphone* e câmera fotográfica, podem estar relacionados às características específicas das câmeras como o nível de sensibilidade à luz. De modo geral, a utilização do limiar de 0,12 (HEINLE; MACKE; SRIVASTAV, 2010), encontrado na literatura, para distinção dos pixels de nuvem, indicou característica de subestimativa em relação aos dados observacionais. A eliminação de *outliers*, valores acima do percentil 95, resultou em coeficientes de determinação elevados ($> 0,9$) e indicou um bom desempenho, com alta significância estatística, da técnica e da aplicabilidade na determinação da cobertura de nuvem.

Os demais valores de limiares encontrados na literatura, referentes a 0,65 e 0,9 (PARISI et al., 2016) apontaram valores de cobertura de nuvem equivalente a 100% em todos os casos, independentemente das condições de nebulosidade, o que comprovou que características específicas das câmeras interferem diretamente na seleção dos limiares de separação dos pixels de nuvens ou de céu claro.

A avaliação dos distintos limiares para classificação dos pixels de nuvens exibiu resultados estatisticamente mais satisfatórios para as câmeras de *smartphone* e fotográfica, ao se considerar os limiares de 0,18 e 0,26, respectivamente, se comparado ao uso do limiar de 0,12, presente na literatura. Os elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,95$) indicaram uma boa performance do conjunto de algoritmos na determinação da cobertura de nuvem a partir das fotografias digitais do céu.

Em relação à modelagem da RUV pelo MTR TUV, os testes de sensibilidade evidenciaram que a variável mais relevante para simulações sob condições de nebulosidade é a profundidade óptica da nuvem. A relação entre atenuação da RUV e profundidade óptica é diretamente proporcional. Por outro lado, as outras duas variáveis de *input* do MTR, as

altitudes da base e topo e a espessura vertical da nuvem, não influenciam significativamente nos cálculos do IUV (diferenças relativas inferiores a 3,2%).

O desempenho do MTR TUV em simular o IUV em casos de céu claro, com ausência total de nebulosidade, foi bom segundo os resultados estatísticos. Resultados apontaram correlação forte e positiva ($r > 0,89$) entre os dados simulados e medidos *in situ*, com pequeno desvio dos valores estimados em relação aos observados ($\text{BIAS} < 0,13$) e magnitude de erro do modelo inferior a 1,4, com tendência de superestimativa nas simulações.

Em eventos de nebulosidade e condição de Sol aparente, os resultados das simulações de RUV pelo MTR TUV envolvendo os distintos valores de profundidades ópticas mostraram que a inserção de nuvens nas simulações do MTR não acarretou resultados significativos na modelagem para a grande maioria da amostragem (68% dos casos).

Nos casos de Sol encoberto, não foi encontrada nenhuma relação de tipo de nuvem ou cobertura e a empregabilidade de profundidade óptica específica no *input* no modelo. Em eventos de forte atenuação do IUV causada por nuvens do tipo Ns, as medidas de IUV e as simulações apontaram diferenças relativas de até -30%, com $\Delta\text{IUV} = -0,3$. Por outro lado, simulações para céu parcialmente nublado com nuvens Ci, mostraram diferenças em torno de 10%, com $\Delta\text{IUV} = 0,5$.

Em situações de presença de nuvens na atmosfera, o desempenho do MTR TUV foi bom segundo os resultados estatísticos, para os casos de Sol aparente e encoberto. As correlações entre os dados de IUV medido e simulado foram positivas e muito fortes ($r > 0,91$), com elevadas concordâncias ($d > 0,92$) e tendência de superestimativa do modelo.

A análise da amostragem do IUV evidenciou que a presença de nuvens e estação do ano (outono) não representam menor risco à saúde, uma vez que foi encontrado IUV extremo (13,7) na presença de nuvens Ac, na estação do outono. Nesse período, entre 9 e 16 horas, 50% das medidas de IUV registradas foram superiores a 7,0, com potencial danoso “Muito Alto”, segundo a OMS (WHO, 2002).

Em relação ao índice CMF, nuvens do tipo Cu apresentaram os maiores valores de CMF médios equivalentes a 1,1 ($\pm 0,1$), indicando a ocorrência de intensificação da RUV. Em contrapartida, para nuvens Ns foram encontrados valores de CMF médios equivalentes a 0,2 ($\pm 0,1$), caracterizando um efeito de atenuação média de aproximadamente 6 unidades de IUV ($\pm 1,3$).

Como perspectiva, esse trabalho sugere a realização de amostragens maiores, testes de sensibilidade e simulações de RUV nos demais MTR e estações do ano. Desta forma, será

possível avaliar o desempenho dos diferentes modelos nas estimativas de RUV sob condições de nebulosidade, bem como a comparação da magnitude dos erros produzidos pelos mesmos.

Por fim, vale ressaltar que a técnica de imageamento e determinação da cobertura de nuvens, a partir de imagens digitais do céu, é uma ferramenta útil e contribui para um avanço científico e tecnológico na obtenção e uso desse tipo de dado meteorológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEBI, C.; GRÖBNER, J.; KÄMPFER, N. Cloud fraction determined by thermal infrared and visible **all-sky cameras**. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 11, n. 10, p. 5549-5563, 2018.
- ALBERT, K. R.; MIKKELSEN, T. N.; RO-POULSEN, H.; MICHELSEN, A. ARNDAL, M. F. et al. Improved UV-B screening capacity does not prevent negative effects of ambient UV irradiance on PSII performance in High Arctic plants Results from a six-year UV exclusion study. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 1542-1549, 2010.
- ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 5, p. 859-870, 2005.
- BARNES, P. W.; WILLIAMSON, C. E.; R. M.; MADRONICH, S.; ROBINSON, S. A. Environmental effects and interactions of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and climate change: 2018 assessment report, **Environmental Effects Assessment Panel 2018 Quadrennial Assessment**, 2019.
- BARTÓK, B. Aerosol radiative effects under clear skies over Europe and their changes in the period of 2001–2012. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 37, n. 4, p. 1901-1909, 2017.
- BOTTINO, M. J.; CEBALLOS, J. C. Daytime cloud classification over South American region using multispectral GOES-8 imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 1, p. 1-19, 2015.
- BRESLAUER, D. N.; MAAMARI, R. N.; SWITZ, N. A.; LAM, W. A.; FLETCHER, D. A. Mobile phone based clinical microscopy for global health applications. **PloS one**, v. 4, n. 7, p. e6320, 2009.
- CABROL N.A.; FEISTER U.; HÄDER D-P.; PIAZENA H.; GRIN E.A.; KLEIN A. Record solar UV irradiance in the tropical Andes. **Frontiers in Environmental Science**, v.2, p.1-6, 2014.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific model development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014.
- CHEN, M.; HUANGA, Y.; LIU G.; QIN, F.; YANG, S. et al. Effects of enhanced UV-B radiation on morphology, physiology, biomass, leaf anatomy and ultrastructure in male and female mulberry (*Morus alba*) saplings. **Environmental and Experimental Botany**, v. 29, p. 85-93, 2016.
- CORRÊA, M.P. **Índice Ultravioleta: Avaliações e Aplicações**. 2003. 243 f. Tese (Doutor em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo; São Paulo, 2003.

CORRÊA, M. P.; PLANA-FATTORI, A. Uma análise das variações do índice ultravioleta em relação às observações de conteúdo de ozônio e da espessura óptica dos aerossóis sobre a cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 24-32, 2006.

CORRÊA, M. P.; PIRES, L. C. M. Doses of erythemal ultraviolet radiation observed in Brazil. **International Journal of Dermatology**, v. 52, n. 8, p. 966-973, 2013.

CORRÊA, M. P. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. **Anais brasileiros de dermatologia**, v. 90, n. 3, p. 297-313, 2015.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. **Estudos avançados**, v. 30, n. 86, p. 83-97, 2016.

DIFFEY, B. L.; JANSEN, C. T.; URBACHS, F.; WULF, H. C. The standard erythema dose: a new photobiological concept, **Photodermatol Photoimmunol Photomed**, v. 13, p. 64-66, 1997.

ELLINGSON, R. G.; ELLIS, J.; FELLS, S. The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long wave results. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. D5, p. 8929-8953, 1991.

FAN, L.; LI, W.; DAHLBACK, A.; STAMNES, J. J.; STAMNES, S. et al. New neural-network-based method to infer total ozone column amounts and cloud effects from multi-channel, moderate bandwidth filter instruments. **Optics express**, v. 22, n. 16, p. 19595-19609, 2014.

FENG, L.; JIANG, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, S. Sexual differences in defensive and protective mechanisms of *Populus cathayana* exposed to high UV-B radiation and low soil nutrient status. **Physiologia Plantarum**, v. 151, n. 4, p. 434-445, 2014.

FLINT, S. D.; CALDWELL, M. M. A biological spectral weighting function for ozone depletion research with higher plants, **Physiologia Plantarum**, v.117, p.137-144, 2003.

FOYO-MORENO, I.; VIDA, J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290–385 nm). **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 7, p. 1020-1026, 1999.

FOYO-MORENO, I.; ALADOS, I.; OLMO, F. J.; VIDA, J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. On the use of a cloud modification factor for solar UV (290–385 nm) spectral range. **Theoretical and applied climatology**, v. 68, n. 1-2, p. 41-50, 2001.

FOYO-MORENO, I.; ALADOS, I.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLETAS, L. The influence of cloudiness on UV global irradiance (295–385 nm). **Agricultural and forest meteorology**, v. 120, n. 1-4, p. 101-111, 2003.

FREDERICK, J. E. Ultraviolet sunlight reaching the earth's surface: a review of recent research. **Photochemistry and Photobiology**, v. 57, n. 1, p. 175-178, 1993.

FREITAS, C.; BREMNER, S. A.; GOUVEIA, N.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. Internações e óbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. **Revista Saúde Pública**, v.38, n.6, p.751-7, 2004.

HASSAN, I. A.; BASAHI, J. M.; HAIBA, N. S.; KADI, M. W. Investigation of Climate Changes on Metabolic Response of Plants: Interactive Effects of Drought Stress and Excess UV-B. **Journal of Earth Science & Climatic Change**, v. 4, p. 1-6, 2013.

HAUKE, J.; KOSSOWSKI, T. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, n. 2, p. 87-93, 2011.

HEINLE, A.; MACKE, A.; SRIVASTAV, A. Automatic cloud classification of whole sky images. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 3, n. 3, p. 557-567, 2010.

HOLICK, M. F. Biological effects of sunlight, ultraviolet radiation, visible light, infrared radiation and vitamin D for health. **Anticancer research**, v. 36, n. 3, p. 1345-1356, 2016.

HOLLÓSY, F. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. **Micron**, v. 33, n. 2, p. 179-197, 2002.

HUSSAIN, I.; AHAMAD, K. U.; NATH, P. Water turbidity sensing using a smartphone. **RSC Advances**, v. 6, n. 27, p. 22374-22382, 2016.

HUSSAIN, I.; DAS, M.; AHAMAD, K. U.; NATH, P. Water salinity detection using a smartphone. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 239, p. 1042-1050, 2017.

HUSSAIN, I.; AHAMAD, K. U.; NATH, P. Low-cost, robust, and field portable smartphone platform photometric sensor for fluoride level detection in drinking water. **Analytical chemistry**, v. 89, n. 1, p. 767-775, 2017.

ICNIRP - International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelength between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Physics**, v.87, p.171-186, 2004.

IGOE, D. P.; PARISI, A. V.; CARTER, B. Evaluating UVA aerosol optical depth using a smartphone camera. **Photochemistry and photobiology**, v. 89, n. 5, p. 1244-1248, 2013a.

IGOE, D. P.; PARISI, A. V.; CARTER, B. Characterization of a smartphone camera's response to ultraviolet A radiation. **Photochemistry and photobiology**, v. 89, n. 1, p. 215-218, 2013b.

IGOE, D. P.; PARISI, A. V.; CARTER, B. Smartphone-Based Android app for Determining UVA Aerosol Optical Depth and Direct Solar Irradiances. **Photochemistry and photobiology**, v. 90, n. 1, p. 233-237, 2014.

IGOE, D. P.; PARISI, A. V.; AMAR, A.; DOWNS, N. J.; TURNER, J. Atmospheric total ozone column evaluation with a smartphone image sensor. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 9, p. 2766-2783, 2018.

JACQUET, S.; BRATBAK, G. Effects of ultraviolet radiation on marine virus-phytoplankton interactions. **FEMS microbiology ecology**, v. 44, n. 3, p. 279-289, 2003.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, v.83, n. 1-2, p.55-56, 1995.

JÉGOU, H., PERRONNIN, F., DOUZE, M., SÁNCHEZ, J., PÉREZ, P. et al. Aggregating local image descriptors into compact codes. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 34, n. 9, p. 1704-1716, 2012.

JIN, W.; GONG, F.; TANG, B.; WANG, S. Cloud Types Identification for Meteorological Satellite Image Using Multiple Sparse Representation Classifiers via Decision Fusion. **IEEE Access**, v. 7, p. 8675-8688, 2019.

KERR, J. B. Understanding the factors that affect surface UV radiation. In: **Ultraviolet Ground-and Space-based Measurements, Models, and Effects III**. International Society for Optics and Photonics, p. 1-14, 2003.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; LEME, N. P.; SILVA, A. A. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 1, p. 63-74, 2000.

KRZÝSCIN, J. UV controlling factor and trends derived from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1976-1994. **Journal of Geophysical Research: Atmosphere**, v.101, p.16797-16805, 1996.

LAMY, K.; PORTAFAIX, T.; BROGNIEZ, C.; GODIN-BEEKMANN, S.; BENCHERIF, H. et al. Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 1, p. 227-246, 2018.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.

LONG, C. N.; SABBURG, J. M.; CALBÓ, J.; PAGÈS D. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, n. 5, p. 633-652, 2006.

LUIZ, E. W.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; PEREIRA, E. B. Comparison of methodologies for cloud cover estimation in Brazil-A case study. **Energy for Sustainable Development**, v. 43, p. 15-22, 2018.

MADRONICH, S. Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 1, p. 37-40, 1992.

MADRONICH, S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, UV-B Radiation and Ozone Depletion, Effects on Humans, Animals, Plants, Microorganisms, and Materials M. Tevini, Ed., **Lewis Publishers**, p. 17-69, 1993.

MATEOS, D.; PACE, G.; MELONI, D.; BILBAO, J.; DI SARRA, A.; DE MIGUEL, A.; CASASANTA, G.; MIN, Q. Observed influence of liquid cloud microphysical properties on ultraviolet surface radiation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 5, p. 2429-2440, 2014.

MATEOS, D.; DI SARRA, A.; BILBAO, J.; MELONI, D.; PACE, G. et al. Spectral attenuation of global and diffuse UV irradiance and actinic flux by clouds. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 141, n. 686, p. 109-113, 2015.

MAYER, B.; KYLLING, A. The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Katlenburg-Lindau, v. 5, n. 7, p. 1855-1877, 2005.

McKINLAY, A. F.; DIFFEY, B. L. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. **CIE Journal**, v. 6, p. 17-22, 1987.

MOEHRLE, M.; DENNENMOSER, B.; GARBE, C. Continuous long-term monitoring of UV radiation in professional mountain guides reveals extremely high exposure. **International Journal of Cancer**, v. 103, n. 6, p. 775-778, 2003.

MONTAGNER, S.; COSTA, A. Bases biomoleculares do fotoenvelhecimento. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 84, n. 3, p. 263-269, 2009.

NEZVAL, E. I.; CHUBAROVA, N. E. Long-term variability of UV radiation in the spectral range of 300–380 nm in Moscow. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 42, n. 11, p. 693-699, 2017.

PARISI, A. V.; TURNBULL, D. J.; TURNER, J. Calculation of cloud modification factors for the horizontal plane eye damaging ultraviolet radiation. **Atmospheric Research**, v. 86, n. 3-4, p. 278-285, 2007.

PARISI, A. V.; DOWNS, N.; IGOE, D. P.; TURNER, J. Characterization of cloud cover with a smartphone camera. **Instrumentation Science & Technology**, Monticello, v. 44, n. 1, p. 23-34, 2016.

PARK, S. S.; KIM, M.; LEE, H.; LEE, H.; KIM, S. et al. Estimating cloud and aerosol UV modification factors based on spectral measurement from the Brewer spectrophotometer. **Atmosphere**, v. 8, n. 6, p. 109, 2017.

PETER, T. The stratospheric ozone layer—An overview. **Environmental pollution**, v. 83, n. 1-2, p. 69-79, 1994.

PETERS, B. S. M.; SANTOS, L. C.; FISBERG, M.; WOOD R. J., MARTINI L. A. Prevalence of vitamin D insufficiency in Brazilian adolescents. **Annals of Nutrition and Metabolism**, v.54, p.15-21, 2009.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de minas gerais (Climate aspects in Minas Gerais state). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

RIVAS, M.; ROJAS, E.; CORTÉS, J. N.; SANTANDER E. G. Efecto de la altura en la radiación solar ultravioleta en Arica norte de Chile. **Revista Facultad de Ingeniería**, v.10, p. 59-62, 2002.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. Elsevier, 1996. 624 p.

SANTOS, J. B.; VILLÁN, D. M.; CASTRILLO, A. M. Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation. **International Journal of climatology**, v. 31, n. 3, p. 451-460, 2011.

SERRANO, D.; MARÍN, M. J.; NÚÑEZ, M.; GANDÍA, S.; UTRILLAS, M. P. et al. Relationship between the effective cloud optical depth and different atmospheric transmission factors. **Atmospheric Research**, v. 160, p. 50-58, 2015.

SAUCEDO, M. O.; RODRÍGUEZ, S. H. S.; FLORES, C. F. A.; VALENZUELA, R. B.; LUNA, M. A. L. Effects of ultraviolet radiation (UV) in domestic animals. Review. **Revista Mexicana Ciencias Pecuarias**, v. 10, n. 2, p. 416-432, 2019.

SILVA, A. A. Calmness of the aerosol layer in the atmosphere during biomass burning episodes. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p.1-11, 2006.

SILVA, A. A. Erythemal dose rate under noon overcast skies. **Photochemical & Photobiological Science**, v. 12, n. 5, p. 777-786, 2013.

SILVA, A. A.; SOUZA-ECHER, M. P. Ground-based observations of clouds through both an automatic imager and human observation. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 1, p. 150-157, 2016.

SNIK, F.; RIETJENS, J. H. H.; APITULEY, A.; VOLTEN, H.; MIJLING, B. et al. Mapping atmospheric aerosols with a citizen science network of smartphone spectropolarimeters. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 20, p. 7351-7358, 2014.

SOUZA-ECHER, M. P.; PEREIRA, E. B.; BINS, L. S.; ANDRADE, M. A. R. A simple method for the assessment of the cloud cover state in high-latitude regions by a ground-based digital camera. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, n. 3, p. 437-447, 2006.

STAIGER, H; DEN OUTER, P. N.; BAIS, A. F.; FEISTER, U.; JOHNSEN, B. et al. Hourly resolved cloud modification factors in the ultraviolet. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, n. 9, p. 2493-2508, 2008.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with linear and nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 449-455, 2008.

TIBA, C.; LEAL, S. S. Enhancement of UV Radiation by Cloud Effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

TSELIODIS, G.; ROSSOW, W. B.; RIND, D. Global patterns of cloud optical thickness variation with temperature. **Journal of climate**, v. 5, n. 12, p. 1484-1495, 1992.

TURNER, J.; PARISI, A. V.; IGOE, D. P.; AMAR, A. Detection of ultraviolet B radiation with internal smartphone sensors. **Instrumentation Science & Technology**, v. 45, n. 6, p. 618-638, 2017.

VANICEK, K.; FREI, T.; LITYNSKA, Z.; SCHMALWIESER, A. **UV Index for Public. COST-713 Action**. Luxembourg: Office for official publications of the European Communities, 2000.

VILLÁN, D. M.; CASTRILLO, A. M.; SANTOS, J. B. Empirical models of UV total radiation and cloud effect study. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 9, p. 1407-1415, 2010.

WACKER, S.; GRÖBNER, J.; ZYSSET, C.; DIENER, L.; TZOUMANIKAS, P. et al. Cloud observations in Switzerland using hemispherical sky cameras. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 2, p. 695-707, 2015.

WALSH, K. UV Radiation and the Eye. **Optician**, v.237, p.26-33, 2009.

WANG, L.; GONG, W.; LUO, M.; WANG, W.; HU, B. et al. Comparison of different UV models for cloud effect study. **Energy**, v. 80, p. 695-705, 2015.

WEI, Q.; NAGI, R.; SADEGHI, K.; FENG, S.; YAN, E. et al. Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone. **ACS nano**, v. 8, n. 2, p. 1121-1129, 2014.

WILD, M.; GILGEN, H.; ROESCH, A.; OHMURA, A.; LONG, C. N. et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. **Science**, v. 308, n. 5723, p. 847-850, 2005.

WILLCOX, J. L.; MARKS, S. L.; UEDA, Y.; SKORUPSKI, K. Clinical features and outcome of dermal squamous cell carcinoma in 193 dogs (1987-2017). **Veterinary and comparative oncology**, v. 17, n. 2, p. 130-138, 2019.

WILLMOTT, C. J. On the validation models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

WHO, **Ultraviolet Radiation**, EHC 160, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1994.

WHO. **Global Solar UV Index: A Practical Guide**. Geneva: World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Program (UNEP), and International Commission on Non- Ionising Radiation Protection (ICNRP), 2002.

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION). **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**, World Meteorological Organization, WMO-No. 8, Geneva, Switzerland, 2008.

WOO, R. S. C.; CHEN, Y.; ZHU, H.; LI, J. L.; KIM, J. K. et al. Environmental degradation of epoxy–organoclay nanocomposites due to UV exposure. Part I: Photo-degradation. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 15-16, p. 3448-3456, 2007.

YAMASOE, M. A; CORRÊA, M. P. **Processos radiativos na atmosfera (Fundamentos)**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 142 p.

YOUNG, A. R. Acute effects of UVR on human eyes and skin. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, v. 92, n.1, p. 80-85, 2006.

ZARATTI, F.; FORNO, R.; GARCIA, J.; ANDRADE, M. Erythemally weighted UV-B variations at two high altitude locations. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 1-6, 2003.

ZHANG, M.; QURESHI, A. A.; GELLER, A. C.; FRAZIER, L.; HUNTER, D. J. et al. Use of tanning beds and incidence of skin cancer. **Journal of Clinical Oncology**, v. 30, n. 14, p. 1588, 2012.

APÊNDICE A

IUV medido pelo radiômetro e simulado pelo MTR TUV sob condições de sol aparente e profundidades ópticas da nuvem de 0 (IUV 1), 1 (IUV 2), 2 (IUV 3), 5 (IUV 4), 10 (IUV 5), 20 (IUV 6), 50 (IUV 7), 100 (IUV 8), 125 (IUV 9) e 150 (IUV 10). CC: céu claro e CPN: céu parcialmente nublado.

Data	Horário	Tipo de nuvem	Condição do céu	IUV observado	IUV (1)	IUV (2)	IUV (3)	IUV (4)	IUV (5)	IUV (6)	IUV (7)	IUV (8)	IUV (9)	IUV (10)
27/03	10:38	Cc	CC	4,0	9,3	8,6	8,1	6,8	5,4	3,8	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:39	Cc	CC	8,1	9,3	8,7	8,1	6,9	5,4	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:40	Cc	CC	9,5	9,4	8,7	8,2	6,9	5,5	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:42	Cc	CC	9,6	9,5	8,8	8,2	6,9	5,5	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:44	Cc	CC	9,3	9,5	8,8	8,3	7,0	5,5	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:45	Cc	CC	9,2	9,6	8,9	8,3	7,0	5,6	3,9	2,0	1,1	0,8	0,6
	10:46	Cc	CC	8,1	9,6	9,0	8,4	7,1	5,6	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
28/03	10:17	Cc	CC	7,5	8,3	7,7	7,2	6,1	4,8	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	10:18	Cc	CC	8,5	8,3	7,7	7,2	6,1	4,9	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	10:21	Ac	CC	6,5	8,5	7,9	7,5	6,4	5,1	3,6	1,9	1,0	0,8	0,6
	10:22	Ac	CC	8,8	8,5	8,0	7,5	6,4	5,1	3,7	1,9	1,0	0,8	0,6
	10:23	Ac	CC	8,9	8,6	8,0	7,6	6,5	5,2	3,7	1,9	1,0	0,8	0,6
	10:24	Ac	CC	8,0	8,6	8,1	7,6	6,5	5,2	3,7	1,9	1,0	0,8	0,6
	13:41	Cc	CC	8,8	8,8	8,2	7,7	6,5	5,1	3,6	1,9	1,0	0,8	0,6
	13:42	Cc	CC	8,7	8,8	8,1	7,6	6,4	5,1	3,6	1,9	1,0	0,7	0,6
13:43	Cu	CC	8,1	8,7	8,2	7,8	6,6	5,3	3,7	1,9	0,9	0,7	0,6	
29/03	10:17	Cc	CC	8,3	8,9	8,3	7,8	6,5	5,2	3,6	1,9	1,0	0,8	0,6
	10:18	Ac	CC	9,6	9,0	8,4	7,9	6,7	5,4	3,8	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:19	Ac	CC	10,1	9,0	8,5	8,0	6,8	5,4	3,8	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:20	Ac	CC	9,6	9,1	8,5	8,0	6,8	5,4	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
	10:21	Ac	CC	10,0	9,2	8,6	8,1	6,9	5,5	3,9	2,0	1,0	0,8	0,6
01/04	10:13	Cc	CC	7,4	7,8	7,2	6,7	5,7	4,5	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
	10:14	Cc	CC	5,9	7,8	7,2	6,8	5,7	4,6	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
	10:17	Cc	CC	8,3	8,0	7,4	6,9	5,8	4,6	3,3	1,7	0,9	0,7	0,5
	10:18	Ac	CC	8,3	8,0	7,5	7,1	6,0	4,8	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	10:19	Cu	CC	8,4	8,0	7,6	7,1	6,1	4,8	3,4	1,7	0,9	0,7	0,5
	10:20	Cu	CC	8,3	8,1	7,6	7,2	6,1	4,9	3,4	1,8	0,9	0,7	0,5
	10:21	Cu	CC	8,6	8,1	7,7	7,2	6,2	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,5
	10:22	Cu	CC	8,8	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,5
	10:23	Cu	CC	9,0	8,2	7,8	7,3	6,2	5,0	3,5	1,8	0,9	0,7	0,5
03/04	13:45	Ac	CPN	10,8	8,3	7,8	7,3	6,2	5,0	3,6	1,9	1,0	0,7	0,6
04/04	14:34	Cc	CC	5,7	5,8	5,4	5,0	4,3	3,4	2,4	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:35	Cc	CC	5,6	5,8	5,3	5,0	4,2	3,4	2,4	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:36	Cc	CC	5,7	5,7	5,3	4,9	4,2	3,3	2,4	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:37	Ac	CC	5,5	5,7	5,3	4,9	4,2	3,4	2,4	1,3	0,7	0,5	0,4
	14:38	Cu	CC	5,4	5,6	5,2	4,9	4,1	3,3	2,3	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:39	Cu	CC	5,3	5,6	5,2	4,8	4,1	3,3	2,3	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:40	Cu	CC	5,3	5,5	5,1	4,8	4,0	3,2	2,3	1,2	0,6	0,5	0,4
	14:41	Cu	CC	5,5	5,4	5,1	4,7	4,0	3,2	2,3	1,2	0,6	0,4	0,4
09/04	14:01	Cu	CPN	10,4	7,3	6,9	6,4	5,4	4,3	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	14:02	Sc	CPN	11,4	7,3	6,8	6,4	5,4	4,3	3,0	1,6	0,8	0,6	0,5
11/04	10:59	Cu	CPN	10,0	9,8	9,3	8,7	7,4	5,9	4,1	2,1	1,1	0,8	0,6
12/04	11:11	Ci	CC	6,7	10,0	9,3	8,7	7,3	5,8	4,1	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:12	Ci	CC	7,6	10,0	9,3	8,7	7,4	5,8	4,1	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:13	Ci	CC	7,9	10,1	9,4	8,8	7,4	5,8	4,1	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:14	Ci	CC	9,0	10,1	9,4	8,8	7,4	5,9	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7
	11:15	Ci	CC	9,7	10,1	9,4	8,8	7,4	5,9	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7

Data	Horário	Tipo de nuvem	Condição do céu	IUV observado	IUV (1)	IUV (2)	IUV (3)	IUV (4)	IUV (5)	IUV (6)	IUV (7)	IUV (8)	IUV (9)	IUV (10)
12/04	11:16	Ci	CC	9,8	10,2	9,4	8,8	7,4	5,9	4,4	2,1	1,1	0,9	0,7
	11:17	Ci	CC	9,9	10,2	9,5	8,9	7,5	5,9	4,2	2,1	1,1	0,9	0,7
	11:18	Ci	CC	9,8	10,2	9,5	8,9	7,5	5,9	4,2	2,2	1,1	0,9	0,7
	11:19	Ci	CPN	9,8	10,2	9,5	8,9	4,5	5,9	4,2	2,2	1,1	0,9	0,7
17/04	11:16	Ac	CC	9,7	9,2	8,6	8,1	6,9	5,5	3,9	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:17	Ac	CC	10,0	9,2	8,7	8,2	7,0	5,6	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:18	Ac	CC	9,9	9,3	8,7	8,2	7,0	5,6	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:19	Cc	CC	10,0	9,3	8,6	8,1	6,8	5,4	3,8	1,9	1,0	0,8	0,6
	11:22	Cc	CC	10,7	9,3	8,7	8,1	6,8	5,4	3,8	2,0	1,0	0,8	0,6
	11:23	Ac	CC	8,8	9,4	8,8	8,3	7,1	5,6	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
	11:24	Ac	CC	3,9	9,4	8,8	8,3	7,1	5,7	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
18/04	13:42	Ac	CC	6,5	7,4	6,9	6,5	5,5	4,4	3,1	1,6	0,9	0,7	0,5
	13:43	Cu	CC	7,4	7,4	6,9	6,5	5,5	4,4	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	13:44	Cu	CC	7,4	7,3	6,9	6,5	5,5	4,3	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	13:45	Ac	CC	7,4	7,3	6,8	6,4	5,4	4,3	3,1	1,6	0,8	0,7	0,5
	13:47	Cc	CC	7,2	7,3	6,7	6,3	5,3	4,2	3,0	1,5	0,8	0,6	0,5
	13:48	Cc	CC	7,1	7,2	6,7	6,3	5,3	4,2	3,0	1,5	0,8	0,6	0,5
	13:49	Cc	CC	7,1	7,2	6,6	6,2	5,2	4,2	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
23/04	10:58	Cc	CC	5,6	8,3	7,7	7,2	6,1	4,8	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	10:59	Cc	CC	7,0	8,3	7,7	7,2	6,1	4,8	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	11:00	Cc	CC	7,5	8,3	7,7	7,2	6,1	4,8	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	11:01	Cc	CC	7,1	8,3	7,7	7,2	6,1	4,9	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	11:02	Cc	CC	7,5	8,4	7,8	7,3	6,1	4,9	3,4	1,8	0,9	0,7	0,6
	11:03	Cc	CC	7,5	8,4	7,8	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,6
07/05	10:24	Ac	CPN	6,9	6,4	5,9	5,6	4,7	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:25	Ac	CPN	6,1	6,4	6,0	5,6	4,8	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:26	Ac	CPN	6,7	6,4	6,0	5,6	4,8	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:27	Ac	CPN	6,6	6,5	6,0	5,7	4,8	3,9	2,8	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:28	Ac	CPN	6,1	6,5	6,1	5,7	4,8	3,9	2,8	1,4	0,8	0,6	0,5
	10:29	Ac	CPN	8,0	6,5	6,1	5,7	4,9	3,9	2,8	1,5	0,8	0,6	0,5
	10:33	Cc	CPN	2,2	6,7	6,2	5,8	4,9	3,9	2,8	1,4	0,7	0,6	0,5

APÊNDICE B

IUV medido pelo radiômetro e simulado pelo MTR TUV sob condições de sol aparente e profundidades ópticas da nuvem de 0 (IUV 1), 1 (IUV 2), 2 (IUV 3), 5 (IUV 4), 10 (IUV 5), 20 (IUV 6), 50 (IUV 7), 100 (IUV 8), 125 (IUV 9) e 150 (IUV 10). CC: céu claro, CPN: céu parcialmente nublado e CTE: céu totalmente encoberto.

Data	Horário	Tipo de nuvem	Condição do céu	IUV Observado	IUV (1)	IUV (2)	IUV (3)	IUV (4)	IUV (5)	IUV (6)	IUV (7)	IUV (8)	IUV (9)	IUV (10)
28/03	13:44	Cu	CC	9,7	8,7	8,2	7,7	6,6	5,3	3,7	1,9	0,9	0,7	0,6
	13:45	Cu	CPN	10,1	8,6	8,2	7,7	6,6	5,2	3,7	1,9	0,9	0,7	0,6
	13:46	Cu	CPN	8,3	8,6	8,1	7,7	6,5	5,2	3,7	1,9	0,9	0,7	0,5
	13:47	Cu	CPN	11,0	8,6	8,1	7,6	6,5	5,2	3,7	1,9	0,9	0,7	0,5
	13:48	Cu	CPN	11,0	8,5	8,0	7,6	6,4	5,1	3,6	1,8	0,9	0,7	0,5
	13:49	Cu	CPN	11,1	8,5	8,0	7,5	6,4	5,1	3,6	1,8	0,9	0,7	0,5
03/04	09:52	Ac	CTE	4,9	6,5	6,1	5,7	4,9	3,9	2,8	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:53	Ac	CTE	4,3	6,6	6,1	5,8	4,9	3,9	2,8	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:54	Ac	CTE	7,6	6,6	6,2	5,8	5,0	4,0	2,8	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:55	Ac	CTE	7,9	6,7	6,2	5,9	5,0	4,0	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:56	Ac	CTE	7,7	6,7	6,3	5,9	5,0	4,0	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:57	Ac	CTE	8,6	6,8	6,3	6,0	5,1	4,1	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:58	Ac	CTE	8,4	6,8	6,4	6,0	5,1	4,1	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	09:59	Ac	CTE	8,8	6,9	6,4	6,0	5,1	4,1	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	13:44	Ac	CPN	5,5	8,3	7,8	7,3	6,3	5,0	3,6	1,9	1,0	0,8	0,6
	13:46	Ac	CPN	13,7	8,2	7,7	7,3	6,2	5,0	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	13:47	Ac	CPN	6,7	8,2	7,7	7,2	6,1	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,6
	13:48	Ac	CTE	8,2	8,1	7,6	7,2	6,1	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,6
	13:49	Ac	CTE	6,9	8,1	7,6	7,1	6,1	4,9	3,5	1,8	0,9	0,7	0,6
	13:50	Cu	CTE	8,0	8,0	7,6	7,1	6,1	4,8	3,4	1,7	0,9	0,7	0,5
13:51	Cu	CTE	6,8	8,0	7,5	7,1	6,0	4,8	3,4	1,7	0,9	0,7	0,5	
13:52	Cu	CPN	8,0	7,9	7,5	7,0	6,0	4,8	3,4	1,7	0,9	0,7	0,5	
05/04	14:09	Ns	CTE	0,8	7,8	7,3	6,8	5,8	4,6	3,3	1,7	0,9	0,7	0,5
	14:10	Ns	CTE	0,8	7,7	7,2	6,8	5,7	4,6	3,3	1,7	0,9	0,7	0,5
	14:11	Ns	CTE	0,8	7,7	7,2	6,7	5,7	4,6	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
	14:12	Ns	CTE	0,8	7,6	7,1	6,7	5,7	4,5	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
	14:13	Ns	CTE	0,8	7,6	7,1	6,6	5,6	4,5	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
	14:14	Ns	CTE	0,8	7,5	7,0	6,6	5,6	4,5	3,2	1,6	0,9	0,7	0,5
	14:15	Ns	CTE	0,8	7,5	6,9	6,5	5,5	4,4	3,1	1,6	0,8	0,7	0,5
	14:16	Ns	CTE	0,9	7,4	6,9	6,5	5,5	4,4	3,1	1,6	0,8	0,7	0,5
14:17	Ns	CTE	0,9	7,3	6,8	6,4	5,4	4,3	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5	
09/04	14:03	Sc	CPN	11,0	7,2	6,8	6,4	5,4	4,3	3,0	1,6	0,8	0,6	0,5
	14:04	Sc	CPN	1,9	7,2	6,7	6,3	5,3	4,2	3,0	1,5	0,8	0,6	0,5
	14:05	Sc	CPN	1,8	7,1	6,7	6,3	5,3	4,2	3,0	1,5	0,8	0,6	0,5
	14:06	Sc	CPN	4,3	7,1	6,6	6,2	5,3	4,2	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
	14:07	Sc	CPN	3,4	7,0	6,6	6,2	5,2	4,4	2,9	1,5	0,8	0,6	0,5
11/04	10:49	Ns	CTE	1,7	9,5	8,9	8,4	7,1	5,7	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
	10:50	Ns	CTE	2,2	9,5	8,9	8,4	7,1	5,7	4,0	2,1	1,1	0,8	0,7
	10:51	Ns	CTE	2,7	9,5	8,9	8,4	7,2	5,7	4,1	2,1	1,1	0,8	0,7
	10:52	Ns	CTE	2,9	9,6	9,0	8,5	7,2	5,7	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7
	10:53	Ns	CTE	3,0	9,6	9,0	8,5	7,2	5,8	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7
	10:54	Ns	CTE	2,7	9,6	9,1	8,5	7,2	5,8	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7
	10:55	Ns	CTE	3,3	9,7	9,1	8,6	7,3	5,8	4,1	2,1	1,1	0,9	0,7
02/05	14:18	Ns	CTE	1,4	5,0	4,6	4,3	3,6	2,9	2,1	1,1	0,6	0,4	0,3
	14:19	Ns	CTE	1,9	4,9	4,5	4,3	3,6	2,9	2,0	1,1	0,6	0,4	0,3

Data	Horário	Tipo de nuvem	Condição do céu	IUV Observado	IUV (1)	IUV (2)	IUV (3)	IUV (4)	IUV (5)	IUV (6)	IUV (7)	IUV (8)	IUV (9)	IUV (10)
02/05	14:20	Ns	CTE	2,4	4,9	4,5	4,2	3,6	2,8	2,0	1,1	0,6	0,4	0,3
	14:21	Sc	CTE	3,7	4,8	4,5	4,2	3,5	2,8	2,0	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:22	Sc	CTE	8,0	4,8	4,4	4,1	3,5	2,8	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:23	St	CTE	10,6	4,8	4,4	4,1	3,4	2,7	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:24	St	CTE	10,0	4,7	4,3	4,0	3,4	2,7	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:25	St	CTE	10,3	4,7	4,3	4,0	3,4	2,7	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:26	St	CTE	6,7	4,6	4,3	4,0	3,3	2,6	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:27	St	CTE	7,1	4,6	4,2	3,9	3,3	2,6	1,9	1,0	0,5	0,4	0,3
	14:28	St	CTE	8,1	4,5	4,2	3,9	3,3	2,6	1,8	0,9	0,5	0,4	0,3
03/05	11:02	Ci	CTE	4,8	7,5	7,0	6,5	5,5	4,4	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	11:03	Ci	CTE	5,3	7,6	7,0	6,6	5,5	4,4	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	11:04	Ci	CTE	5,1	7,6	7,0	6,6	5,6	4,4	3,1	1,6	0,8	0,6	0,5
	11:05	Ci	CPN	5,1	7,6	7,1	6,6	5,6	4,4	3,1	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:06	Ci	CPN	5,4	7,6	7,1	6,6	5,6	4,5	3,1	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:07	Ci	CPN	5,6	7,7	7,1	6,6	5,6	4,5	3,2	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:08	Ci	CTE	5,9	7,7	7,1	6,7	5,6	4,5	3,2	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:09	Ci	CTE	5,4	7,7	7,1	6,7	5,6	4,5	3,2	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:10	Ci	CTE	5,5	7,7	7,2	6,7	5,7	4,5	3,2	1,6	0,8	0,7	0,5
	11:11	Ci	CTE	5,4	7,7	7,2	6,7	5,7	4,5	3,2	1,7	0,9	0,7	0,5
07/05	11:57	Ns	CTE	1,8	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	11:58	Ns	CTE	1,5	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	11:59	Ns	CTE	1,4	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	12:00	Ns	CTE	1,4	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	12:01	Ns	CTE	1,3	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
	12:02	Ns	CTE	1,3	8,2	7,7	7,3	6,2	4,9	3,5	1,8	1,0	0,7	0,6
10/05	10:20	Ns	CTE	1,0	6,4	5,9	5,5	4,7	3,7	2,7	1,4	0,7	0,6	0,4
	10:21	Ns	CTE	1,1	6,4	5,9	5,6	4,7	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,4
	10:22	Ns	CTE	1,0	6,4	6,0	5,6	4,7	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:23	Ns	CTE	1,0	6,5	6,0	5,6	4,8	3,8	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:24	Ns	CTE	1,0	6,5	6,0	5,7	4,8	3,4	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:25	Ns	CTE	1,1	6,5	6,1	5,7	4,8	3,9	2,7	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:26	Ns	CTE	1,2	6,6	6,1	5,7	4,9	3,9	2,8	1,4	0,7	0,6	0,5
	10:27	Ns	CTE	1,6	6,6	6,2	5,8	4,9	3,9	2,8	1,4	0,8	0,6	0,5
	10:28	Ns	CTE	3,1	6,7	6,2	5,8	4,9	3,9	2,8	1,5	0,8	0,6	0,5
	10:29	St	CTE	3,1	6,7	6,2	5,8	4,9	3,9	2,8	1,4	0,7	0,6	0,4
	10:30	St	CTE	3,0	6,7	6,3	5,9	4,9	3,9	2,8	1,4	0,7	0,6	0,4