UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Mauro MASILI

Cálculo do ultravioleta solar que atinge o olho, com e sem óculos de sol, em função do campo de visão

São Carlos

2022

Mauro MASILI

Cálculo do ultravioleta solar que atinge o olho, com e sem óculos de sol, em função do campo de visão

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Sinais e Instrumentação

Orientador: Prof. Dr. Adilson Gonzaga

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Masili, Mauro Cálculo do ultravioleta solar que atinge o olho, com e sem óculos de sol, em função do campo de visão / Mauro Masili; orientador Adilson Gonzaga. São Carlos, 2022. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Óculos de sol. 2. Ultravioleta. 3. Campo de visão. 4. Pupila. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel MAURO MASILI.

Título da tese: "Cálculo do ultravioleta solar que atinge o olho, com e sem óculos de sol, em função do campo de visão".

Data da defesa: 30/09/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

APROVADO

Prof. Associado Adilson Gonzaga (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Associado Daniel Varela Magalhães (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Associado Sidney Julio de Faria e Sousa (Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/FMRP-USP)

Profa. Dra. Lígia de Oliveira Ruggiero APRAVADO (Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Prof. Dr. Lino Misoguti (Instituto de Física de São Carlos/IFSC-USP)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior

Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Titular Murilo Araujo Romero

APNOURDS

APROVADO

Aprovado

Dedico este trabalho especialmente à minha esposa, Chris, por nunca ter deixado de estar ao meu lado e pelo seu apoio, suporte e dedicação constantes.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos às pessoas e instituições que contribuíram para este trabalho.

Ao Prof. Adilson Gonzaga por todo o suporte acadêmico.

À Profa. Liliane por sua incansável dedicação e incentivo e por proporcionar os meios para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Dra. Fernanda pela importante contribuição de realizar toda a parte experimental deste trabalho.

Ao Prof. Lino Misoguti por permitir o uso do espectrofotômetro UV-Vis UV-1800 (Shimadzu) para as medidas espectroscópicas das lentes dos óculos de sol.

A todos os colegas de grupo.

Ao SEL/EESC/USP nas pessoas de seus funcionários.

Às agências CNPq, Capes e FAPESP (processo 2021/12240-2) pelo financiamento ao longo de muitos anos.

À Abióptica pela doação dos óculos de sol utilizados neste trabalho.

I would rather have questions that can't be answered than answers that can't be questioned. – Attributed to Richard Feynman but without a source.

Science is more than a body of knowledge, it's a way of thinking. If we are not able to ask skeptical questions, to interrogate those who tell us that something is true, to be skeptical of those in authority, then, we are up for grabs for the next charlatan who comes rambling along. – Carl Sagan, in his last interview.

RESUMO

MASILI, M. Cálculo do ultravioleta solar que atinge o olho, com e sem óculos de sol, em função do campo de visão. 2022. 73p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Os meios de comunicação e até mesmo a literatura especializada divulgam que a proteção ultravioleta (UV) para os óculos escuros é crítica, sob o argumento de que os óculos podem causar efeito contrário caso as lentes não proporcionem proteção UV adequada. Argumenta-se que óculos escuros sem a devida proteção UV não só deixam de proteger como podem aumentar as lesões ao sistema ocular. O mecanismo principal e natural é que, sem os óculos escuros e sob exposição solar, a pupila do olho se contrai para diminuir a incidência de radiação e proteger o interior do olho. Os óculos escuros, ao mimetizarem as funções da pupila no controle da luminosidade, inibem suas ações naturais, resultando na sua não-contração. Portanto, se as lentes escuras não possuírem proteção UV adequada, há um aumento da incidência dessa radiação nos meios oculares internos, potencializando os efeitos adversos, afetando de forma mais severa os tecidos oculares do que nos casos em que não se usa nenhum tipo de proteção. No entanto, não há na literatura científica especializada publicações que quantifiquem adequadamente e deem suporte a esse argumento. Assim, este trabalho teve como objetivo o cálculo do influxo de UV solar através da pupila do olho em duas situações: quando um indivíduo usa óculos escuros e quando não os usa. Em ambas situações considerou-se a dilatação pupilar e o campo de visão devido à compressão das pálpebras e semicerração dos olhos (squint) em função da luminosidade do ambiente, calculada por meio de uma modelagem da irradiação solar. Por fim, calculou-se o influxo de radiação UV através da pupila nas duas situações e determinou-se, portanto, se óculos com lentes de baixa proteção UV de fato aumentam o influxo de UV através da pupila dilatada em comparação à pupila não dilatada. Foram testadas 214 lentes de óculos e os resultados mostram que usar óculos de sol com proteção UV abaixo de 95% tem ligeiro potencial de aumentar os riscos para a saúde dos olhos. Porém, o argumento de que isso se deve à dilatação da pupila está errado. O argumento mais apropriado deve ser que os óculos de sol proporcionam um ambiente mais escuro ao olho, aumentando o campo de visão. Esses resultados podem ter impacto direto nas normas de óculos de sol no que diz respeito à proteção UV vinculada à categoria das lentes.

Palavras-chave: Óculos de sol. Ultravioleta. Campo de visão. Pupila.

ABSTRACT

MASILI, M. Calculation of solar ultraviolet that reaches the eye, with and without sunglasses, as a function of the field of view. 2022. 73p. Thesis (Doctor) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

The media and even the specialized literature report that the ultraviolet (UV) protection for sunglasses is critical, on the grounds that sunglasses can have a counter effect if the lenses do not provide adequate UV protection. The argument is that sunglasses without proper UV protection not only fail to protect but can potentially increase damage to the eye. The primary and natural mechanism is that the pupil of the eye contracts to decrease the incidence of radiation and protect the inner eye from sun exposure. Sunglasses, by mimicking the functions of the pupil to control light, inhibit its natural actions, resulting in its non-contraction. Therefore, if dark lenses do not have appropriate UV protection, there is an increased incidence of this radiation in the inner ocular media, enhancing the adverse effects and impacting the ocular tissues more severely than in cases where no protection is used at all. However, there are no publications in the literature that properly quantify and support this argument. Thus, this work aimed to calculate the influx of solar UV throughout the pupil of the eye in two situations: when an individual wears sunglasses and when he/she does not. In both situations, pupil dilation and the field of view were considered, along with (squint) their dependence on the ambient brightness, calculated by modeling the solar irradiation. Finally, one computed the influx of UV radiation through the pupil in the two situations and assessed whether sunglasses with poor UV protection actually increased the UV influx through the dilated pupil compared with the non-dilated pupils. A set of 214 sunglasses lenses were tested, and the results showed that wearing sunglasses with UV protection of less than 95% has a slight potential to increase hazards to the eye. However, the argument relating this statement to pupil dilation is incorrect. A more appropriate argument is that sunglasses provide a darker environment to the eye, increasing the field of view. These results might have a direct impact on sunglasses standards regarding UV protection linked to the category of lenses.

Keywords: Sunglasses. Ultraviolet. Field of view. Pupil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	O sol e a estrela Sírius	27
Figura 2 –	"Óculos de sol" ancestrais de povos do Ártico.	28
Figura 3 –	Reflexos fotomotores da pupila em resposta à luz incidente no olho. $\ .$	29
Figura 4 –	Ilustração do franzimento das sobrancelhas e semicerração das pálpe- bras (squint).	30
Figura 5 –	Pupila e estruturas anteriores do olho, objeto desta investigação	35
Figura 6 –	Aspectos geométricos relacionados à posição do sol e de um indivíduo com linha de visão para o horizonte	37
Figura 7 –	Componentes direta, difusa e refletida da irradiância solar.	38
Figura 8 –	Irradiância espectral solar na superfície terrestre calculada pelo modelo SMARTS2 (GUEYMARD, 1995) comparada com valores experimentais.	39
Figura 9 –	Irradiância espectral solar na faixa UV incidente na superfície terrestre, calculada pelo modelo SMABTS2 (GUEVMARD, 1995)	40
Figura 10 –	Conceitos básicos em fotometria	40
Figura 11 –	Intervalo de sensibilidade do olho humano para o brilho percebido de	10
1 18414 11	objetos e fontes luminosas	41
Figura 12 –	Aspectos geométricos relacionados à posição do sol e um elemento do	
C	céu para o cálculo da luminância.	41
Figura 13 –	Comparação entre quatro modelos para o diâmetro da pupila e os res-	44
Figura 14 –	Mecanismos naturais de atenuação da incidência de radiação solar no	11
1 18414 11	olho	45
Figura 15 –	Transmitância espectral dos componentes anteriores do olho e o pro-	
-	duto $\tau_e(\lambda)$.	47
Figura 16 –	Diâmetro da pupila sem óculos de sol comparado com a luminância do	
	ambiente para o dia 23 de janeiro.	50
Figura 17 –	Diâmetro da pupila com e sem óculos de sol para o dia 23 de janeiro. Também está mostrada a curva após ensaio de 2500 h das lentes em	
	simulador solar	50
Figura 18 –	Luminância do ambiente percebida pelo olho sem óculos escuros ao longo do ano.	51
Figura 19 –	Diâmetro da pupila devido à luminância do ambiente, sem óculos escu-	
	ros, ao longo do ano.	51
Figura 20 –	FOV ao longo do dia 21 de dezembro usando-se alguns óculos escuros.	
	Linha tracejada: FOV sem óculos	52

Figura	21 -	- Transmitância espectral para algumas lentes em não conformidade e	
		uma lente bloqueadora até 400 nm (R311-24)	54
Figura	22 -	- Influxo relativo de UV das lentes com as piores proteções UV segundo	
		a NBR ISO 12312-1 (ABNT, 2015) e uma lente ideal (R 311-24)	55
Figura	23 -	- Influxo relativo de UV de lentes que falharam e uma lente ideal (R311-24).	56
Figura	24 -	- Razão entre as áreas das pupilas com óculos escuros e sem óculos escuros.	57
Figura	25 -	- Razão entre ângulos sólidos compreendendo o FOV com e sem óculos	
		escuros.	57
Figura	26 -	- Razão entre ω e α mostrando os períodos em que cada um tem maior	
		contribuição.	58
Figura	27 -	– Influxo relativo de UV considerando as razões α e ω (linha sólida) e	
		desprezando ω (linha pontilhada)	59

LISTA DE TABELAS

- Tabela2~- Amostra de lentes de óculos escuros por categoria, totalizando 214 lentes.53
- Tabela 3 Lentes potencialmente perigosas segundo a norma e 3 lentes ideais com 100% de proteção UV. τ_V é a transmitância luminosa (400 nm 780 nm). 54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	—	Organizaçõ	es qu	ıe	uti	lizə	m	0	lir	nite	e de	$ > \lambda $. =	= 4	00	n	m	pε	ara	a	r	ad	iag	ção	
		UV-A						•	•												•				33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CIE Commission Internationale de l'Eclairage
- FOV Campo de visão (*Field of view*)
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- ISO International Organization for Standardization
- SMARTS2 Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Version 2
- UV Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Ângulo azimutal
Ω	Ângulo sólido
Ζ	Ângulo zenital
A	Área da pupila
θ	Campo de visão
λ	Comprimento de onda
D	Diâmetro da pupila
χ	Distância angular entre dois pontos no céu
Н	Exposição radiante solar
$\epsilon_{ m UV}$	Influxo relativo
E_{λ}	Irradiância espectral solar
E	Irradiância solar
L	Luminância
α	Razão entre as áreas da pupila
ω	Razão entre os campos de visão
τ	Transmitância espectral
$ au_{ m V}$	Transmitância luminosa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO
1.1	Motivação
1.2	Norma brasileira
1.3	Objetivos
1.4	Desafios científicos
2	MÉTODO
2.1	Conceitos fundamentais
2.2	Irradiância solar
2.3	Luminância
2.4	Diâmetro pupilar
2.5	Campo de visão
2.6	Transmitância espectral das lentes
2.7	Influxo de UV solar através da pupila
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO
3.1	Luminância e pupila
3.2	Luminância e campo de visão
3.3	Medidas espectroscópicas das lentes
3.4	Influxo relativo de UV através da pupila
3.4.1	Contribuição da dilatação da pupila
3.4.2	Contribuição da dilatação da pupila e do campo de visão 56
4	CONCLUSÕES 61
5	PERSPECTIVAS
	REFERÊNCIAS
	GLOSSÁRIO
	ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 13,77 bilhões de anos, incontáveis estrelas se formaram, evoluíram e encerraram sua atividade de variadas formas. Mais recentemente, há cerca de 4,5 bilhões de anos, surgiu uma estrela que denominamos de Sol. Outras estrelas, como a jovem Sírius¹ de estimados 242 milhões de anos, nos fazem companhia (Fig. 1).

Figura 1 – O sol e a estrela Sírius.



Fonte: Adaptada de Space.com (2012) e Space.com (2022).

Estrelas emitem radiação eletromagnética em um amplo espectro de frequências². Essa emissão não é homogênea em todos os comprimentos de onda e se dá de acordo com a distribuição de Planck para a radiação de corpo negro, cujo pico de emissão depende da temperatura do corpo. O sol, como as outras estrelas, emite desde raios-X até comprimentos de onda longos como das ondas de rádio. Uma particular faixa de interesse do espectro de emissão do sol é o intervalo que se estende do ultravioleta (UV) ao visível, com comprimentos de onda entre 100 nm e 800 nm. Em especial, a faixa do UV de 280 nm a 400 nm tem grande interesse por induzir resposta actínica no tecido biológico, i.e., efeitos fotoquímicos e fotobiológicos, não necessariamente deletérios.

Os óculos de sol surgiram para atenuar a luz visível a níveis confortáveis de luminância e brilho. Antigos povos da região ártica esculpiam óculos de neve em marfim de morsa, couro, madeira ou osso. Essas máscaras tinham pequenas fendas na linha dos olhos que atenuavam o brilho da neve e do gelo, como representado na Fig. 2.

 $^{^1}$ Sírius é a estrela mais brilhante do céu noturno e está a meros 8,6 anos-luz de distância. Logo ali em termos astronômicos.

² E consequentemente de comprimentos de onda já que $c = \lambda \nu$, sendo c a velocidade da luz, λ o comprimento de onda e ν a frequência.



Figura 2 – "Óculos de sol" ancestrais de povos do Ártico.

Fonte: Adaptada de Reddit (2021).

Além da atenuação da intensidade luminosa, atualmente os óculos de sol são projetados para filtrar a radiação UV. Uma variedade de óculos de sol de marca e sem marca pode ser encontrada em todo o mundo e alguns deles não filtram eficientemente parte da faixa UV. Uma extensa parcela da população usa óculos de sol, seja por finalidade estética e/ou pelo conforto visual. Assim, os óculos escuros assumem importante propósito como instrumento de proteção contra os efeitos adversos do sol, sobretudo num país como o Brasil, de extensa área territorial e com índices de radiação UV que chegam próximos ao nível máximo em determinadas regiões e épocas do ano (SCHIABEL, 2022). Mesmo durante o inverno, os índices UV no Brasil se assemelham aos índices UV de verão dos países do hemisfério Norte, por localizarem-se em regiões de altas latitudes.

É bem conhecido que a exposição do ser humano à radiação UV solar acima de determinado limite pode causar danos à saúde (DIFFEY, 1991). Embora a radiação UV solar que atinge a superfície terrestre seja não-ionizante, os danos causados devem-se a um efeito cumulativo da irradiância de UV solar (DIFFEY, 1991). Particularmente para o sistema ocular, esse efeito cumulativo pode induzir patologias que vão de inflamações na córnea a catarata e retinopatias (DOUGHTY; CULLEN, 1989; ZUCLICH, 1989; SÖ-DERBERG, 1990; SLINEY, 1995; ROBERTS, 2001; MOORE *et al.*, 2010). Essa última, se for severa, pode evoluir para cegueira. No entanto, a hipótese de que o UV solar seja um fator etiológico para algumas patologias oculares, especialmente na cataratogênese, já

recebeu algum questionamento na literatura (DOLIN, 1994; HARDING, 1995). Embora haja pouca controvérsia na literatura sobre os efeitos nocivos do UV solar no sistema ocular, do ponto de vista de saúde pública e medicina preventiva, deve-se ponderar que o UV seja um agente altamente provável. De fato, seria muito surpreendente se o UV solar não fosse um fator significante (ou até mesmo primário) em algumas patologias oculares. Assim, é indiscutível a necessidade de meios que promovam a proteção da saúde contra a radiação UV. No caso do sistema ocular, essa proteção é essencialmente proporcionada pelos óculos escuros, que contêm filtro que bloqueia a radiação UV.

Em um meio de grande luminosidade, talvez o efeito mais conhecido e que vem à mente em primeiro lugar seja o da constrição da pupila como reação de adaptação à luz, objetivando reduzir o estímulo luminoso que adentra o olho. Reciprocamente, uma percepção menos luminosa acarretada pelos óculos escuros provoca uma resposta fotomotora no sentido de aumentar o diâmetro da pupila e permitir maior incidência de luz no olho. Esses reflexos da pupila são ilustrados na Fig. 3.



Figura 3 – Reflexos fotomotores da pupila em resposta à luz incidente no olho.

Fonte: Adaptada de Kaltura (2022).

O marketing para o consumidor adquirir óculos de sol de boa qualidade fez um bom trabalho ao alertar o público e divulgar a informação de que é melhor ir ao sol sem óculos de sol do que com óculos de sol que não ofereçam proteção UV adequada (TIME, 2009; COCKS, 2015; WIKIPEDIA, 2022). Um dos temas mais debatidos sobre óculos de sol e proteção dos olhos contra a radiação UV solar é se os óculos de sol de baixa qualidade, de economia informal (sem marca), são prejudiciais à saúde dos olhos se não fornecerem um filtro adequado ou se não forem certificados pelos padrões atuais da indústria. As indústrias e entidades que lutam contra a pirataria de óculos escuros insistem firmemente que, quando o consumidor usa óculos de sol, gerando um ambiente mais escuro, a pupila se abstém de contrair, ficando propensa a receber doses mais altas de radiação UV se os óculos escuros não filtrarem suficientemente essa radiação (TIME, 2009; COCKS, 2015; WIKIPEDIA, 2022). Assim, de acordo com esse argumento, o olho diminuiria sua proteção natural de constrição pupilar e estaria exposto à radiação nociva devido aos óculos de sol de baixa qualidade (ANDERSON; GEBEL, 1977; SEGRÈ *et al.*, 1981). Mesmo publicações recentes replicam esse argumento (BACKES *et al.*, 2019). Hoover (1987) mostrou que para situações específicas de luminância e usando o espectro de ação da radiação UV para o olho, o argumento poderia quebrar, ou seja, mesmo óculos de sol de baixa qualidade protegeriam em alguma medida contra a radiação UV, independentemente da dilatação pupilar resultante do uso de tais óculos de sol.

Além da dilatação da pupila, outro efeito produzido pelos óculos escuros é a ampliação do campo de visão vertical (FOV) e consequentemente do ângulo sólido de admissão de luz no olho. Dito de outra forma, em ambientes com alta luminosidade ocorrem franzimentos das sobrancelhas e semicerração das pálpebras ($squint^3$) para atenuar a incidência luminosa no meio ocular. A Fig. 4 exemplifica esse efeito de squint, tornado célebre por um personagem de cinema.

Figura 4 – Ilustração do franzimento das sobrancelhas e semicerração das pálpebras (squint).



Fonte: Adaptada de Decider (2015).

A questão que persiste é se os materiais das lentes de óculos escuros, devido às suas propriedades intrínsecas, absorvem radiação UV suficiente para prevenir seu influxo no olho por causa da dilatação pupilar desencadeada pelos óculos escuros. No entanto, não há na literatura científica especializada publicações que quantifiquem adequadamente e

³ Uma tradução comum para *squint* é estrabismo mas no contexto deste trabalho significa franzir os músculos da testa para aproximar as sobrancelhas e fechar parcialmente as pálpebras.

deem suporte a esse argumento. Mais ainda, há somente uma única referência na literatura (HOOVER, 1987) que propõe que esse argumento está errado por ignorar a absorção de UV característica dos materiais usados na fabricação das lentes dos óculos de sol. Além disso, o argumento usual ignora a absorção de UV pelas estruturas anteriores do olho, i.e., da córnea e do humor aquoso. Hoover (1987) abordou esse problema e fez um grande esforço ao analisar a geometria do olho quando uma pessoa está ao ar livre com e sem óculos escuros, levando em conta as transmissões espectrais dos óculos escuros. No entanto, Hoover (1987) utilizou um modelo simples para o cálculo da irradiância solar e do diâmetro pupilar, além de não estimar a luminância ambiente em função da posição do indivíduo. Hoover também considerou apenas algumas situações e usou em seus cálculos o limite superior de 380 nm para a faixa UV. Contudo, o peso da evidência científica aponta para uma extensão do limite superior do UV para 400 nm (ICNIRP, 2004; CIE, 1987; CIE, 1998; CIE, 1999; MASILI; SCHIABEL; VENTURA, 2015; RABBETTS; SLINEY, 2019). Esse aspecto será discutido na seção 1.2.

1.1 Motivação

Gostaria de fazer um pequeno relato de como surgiu a motivação desta pesquisa e situá-la em contexto histórico. Minha curiosidade se iniciou na leitura de um dos artigos de Herbert L. Hoover, especificamente o artigo intitulado *Sunglasses, pupil dilation, and solar ultraviolet irradiation of the human lens and retina* (HOOVER, 1987). Nesse trabalho, o *Abstract* inicia-se peremptoriamente e ganhou minha atenção. A saber:

The supposition that, because of pupil dilation, there are greater influxes of solar UV and short-wavelength visibile radiation when some sunglasses are worn **is wrong** [grifo meu]. It is based on an incomplete and, therefore, misleading analysis. That analysis is particularly defective in ignoring the attenuation of the more highly actinic shorter wavelengths. This paper provides the most nearly complete analysis that is now possible.

Isso ia de encontro ao que supostamente era sabido até então e ficou latente em minha mente. Em setembro de 2013, após contato com o prof. Hoover e seu posterior convite, a profa. Liliane e eu fomos visitá-lo na cidade de Corning, NY, sede da famosa indústria de vidros e cerâmicas Corning Inc. O motivo da visita não tinha relação com esse problema mas era discutir a possível degradação da proteção contra os raios UV dos óculos de sol que naquele momento suspeitávamos. Isso pode representar um risco adicional para o usuário. Essa degradação da proteção UV ao longo do tempo foi finalmente observada após uma investigação que demonstrou que o teste de resistência à irradiação, exigido pelas normas, é ineficaz e não oferece garantia de proteção UV a longo prazo. De fato, observamos um aumento da transmitância UV conforme as lentes são submetidas à incidência do UV ao longo do tempo (MASILI; VENTURA, 2016; MASILI *et al.*, 2019). Ainda que os encontros com Hoover nos três dias da visita tenham se concentrado em torno da deterioração da proteção UV das lentes, pude questioná-lo marginalmente a respeito da minha curiosidade em relação à incidência de UV através da pupila. Porém, havia outra prioridade naquele momento mas a semente da inquietude estava incubada. De tempos em tempos voltava a meditar no assunto até que em 2019 trouxemos o prof. David H. Sliney como pesquisador visitante dentro do programa PrInt da Capes, o qual ministrou uma série de palestras e minicursos. Nesse evento, conversamos sobre o campo de visão e como ele é influenciado pela luminosidade do ambiente. Ali comecei, secretamente, a delinear uma estratégia para maior compreensão desse problema e como solucioná-lo. Ou, pelo menos, prover uma resposta mais ampla à presente indagação.

Embora em seu trabalho anterior Hoover (1986) tenha apontado que o franzimento (*squint*) seria uma resposta dominante de uma pessoa em um ambiente brilhante, em seu artigo subsequente (HOOVER, 1987) esse efeito não foi estimado. Assim, Hoover (1987) adotou um campo de visão fixo admitindo um cone com um meio-ângulo de 55°. Aqui, deve-se fazer justiça ao trabalho de Hoover (1987) porque a despeito de ter mencionado que o franzimento tivesse papel relevante, não havia na época dados quantitativos disponíveis desse efeito. Experimentos que começaram a mensurar esse fenômeno surgiram somente muito tempo depois, em meados dos anos 90. Sliney *et al.* (SLINEY, 1995; DE-AVER; DAVIS; SLINEY, 1996) mostraram que o FOV está relacionado à luminância do ambiente com uma análise quantitativa (SLINEY, 1995; DEAVER; DAVIS; SLINEY, 1996) só disponível muito depois do trabalho de Hoover (1987).

Este trabalho visa investigar mais profundamente esse problema em aberto, com modelos teóricos e dados experimentais, para avançar em direção à sua elucidação. Objetiva-se mostrar o que é melhor para a saúde e segurança dos olhos, além de usar óculos de sol de boa qualidade: usar óculos de sol de má qualidade ou evitá-los. Será necessário levar em conta um modelo melhor da irradiância espectral solar e da luminosidade do céu. Além disso, pretende-se usar um cálculo melhorado do diâmetro da pupila e, mais importante, considerar o FOV em função da luminância ambiental. Esse último não tem paralelo na literatura especializada. Salienta-se que esta investigação não diz respeito à radiação UV que vem por trás, ou seja, a incidência de radiação na camada interna das lentes. Nessa situação, o desenho da armação desempenha o papel mais importante na proteção periférica (SLINEY, 2001; SLINEY, 2011).

1.2 Norma brasileira

No Brasil, a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que regulamenta o setor de óculos de sol é a NBR ISO 12312-1 (ABNT, 2015). Essa norma é uma norma espelho da norma internacional ISO 12312-1 e não contempla alguns aspectos relevantes para as condições de insolação no Brasil. Não são objeto da norma os óculos

corretivos nem os filtros UV para fontes artificiais.

A norma internacional ISO 12312-1 e a sua tradução brasileira, a NBR ISO 12312-1, consideram que a radiação UV é composta por três sub-regiões do espectro eletromagnético. Assim, o espectro UV é dividido em UV-C, para radiação com comprimento de onda (λ) entre 100 nm e 280 nm; UV-B, para λ entre 280 nm e 315 nm; e UV-A para λ entre 315 nm e 380 nm. Aqui surge um primeiro conflito com os requisitos da *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) (ICNIRP, 2004), que define a região UV-A mais ampla, com λ entre 315 nm e 400 nm (em vez de 380 nm). A ICNIRP dá subsídios de limites de segurança para a Organização Mundial da Saúde em relação à exposição ao UV. Além da ICNIRP, muitas organizações internacionais adotam o limite superior de 400 nm para a região UV-A. Algumas são listadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Organizações que utilizam o limite de $\lambda = 400$ nm para a radiação UV-A.

World Health Organization (WHO)						
International Organization for Standardization (ISO) 21348(E)						
International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)						
European Space Agency (ESA)						
United States Environmental Protection Agency (EPA)						
United States National Institute of Standards and Technology (NIST)						
NASA Earth Observatory						
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)						
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)						
The Health Physics Society (HPS)						
The Skin Cancer Foundation						
Encyclopaedia Britannica, Inc.						
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE)						

Fonte: O autor.

Uma das poucas organizações relevantes que utilizam o limite de 380 nm para o UV-A é a International Organization for Standardization (ISO) – uma organização da indústria – por meio da norma ISO 20473 (ABNT, 2014) e suas correlatas. Embora a escolha do limite de definição da banda UV-A possa parecer apenas uma questão de padronização, preocupações têm sido levantadas de que um usuário de óculos de sol que absorvam bem até 380 nm, mas mal entre 380 nm e 400 nm, pode estar em risco de danos à saúde ocular. Portanto, ao se calcular a dose de energia (o termo correto em radiometria é exposição radiante) para o espectro UV, haverá discrepância entre os resultados obtidos usando-se a definição para UV-A adotada pela norma ISO (e a correspondente norma brasileira) e aquela utilizada por outras organizações. Em Masili, Schiabel e Ventura (2015) calculamos essa discrepância e enfatizamos a necessidade de se adotar na norma o limite superior de 400 nm para o UV em vez de 380 nm.

Outro aspecto é que a NBR ISO 12312-1 estabelece categorias de transmitância

para os óculos de sol conforme o escurecimento das lentes. Essas categorias são numeradas de 0 a 4, sendo a categoria 4 para as lentes mais escuras, conforme a Tabela 1. Assim, a norma considera, baseada no argumento já delineado, que a proteção UV deve ser vinculada à categoria dos óculos escuros, ou seja, lentes mais escuras (categoria mais alta) devem exigir maior proteção contra radiação UV.

	Requisitos										
	Faixa espe	Faixa espectral visível									
	Máxima	Máxima	Intervalo de								
Catago	transmitância	transmitância	${f transmit}$ ância								
Catego-	$\mathbf{UV-B} \ (au_{\mathrm{SUVB}})$	\mathbf{UV} - \mathbf{A} (au_{SUVA})	luminosa $(\tau_{\rm V})$								
ria	$280~\mathrm{nm}-315~\mathrm{nm}$	$315~\mathrm{nm}-380~\mathrm{nm}$	$380~\mathrm{nm}-780~\mathrm{nm}$								
0	$0{,}05 au_{ m V}$	$ au_{ m V}$	$ au_{ m V} > 80\%$								
1	$0,\!05 au_{ m V}$	$ au_{ m V}$	$43\% < \tau_V \le 80\%$								
2	1% absoluta ou 0,05 $\tau_{\rm V}$	0.5 m	$18\% < \pi_{\star} < 43\%$								
Z	(o que for maior)	$0,0$ $r_{\rm V}$	$10/0 < 7\sqrt{240}/0$								
3	1% absoluta	$0.5 au_{ m V}$	$8\% < \tau_{\rm V} \le 18\%$								
4	1% absoluta	1% absoluta ou $0.25 \tau_{\rm V}$ (o que for maior)	$3\% < \tau_{\rm V} \le 8\%$								

Tabela 1 – Requisitos de proteção e transmitância para óculos de sol.

Fonte: Adaptada de ABNT (2015).

Além das normas para proteção ocular feitas para óculos de sol, ainda existem requisitos da ICNIRP (ICNIRP, 2004) quanto aos limites de segurança para exposição ao UV. Um dos mais relevantes é que a ICNIRP recomenda que a exposição radiante do UV (180 nm – 400 nm), em um período de 8 horas, utilizando um fator de ponderação adequado (ICNIRP, 2004) para a resposta do tecido ocular ao UV, não exceda 30 J/m². Adicionalmente, para o UV-A (315 nm – 400 nm), a exposição radiante sem o fator de ponderação não deve exceder 10^4 J/m². Esses requisitos de segurança da ICNIRP não são contemplados pela norma ISO 12312-1.

1.3 Objetivos

A região de interesse desta investigação está concentrada notadamente na pupila e nas suas estruturas anteriores (Fig. 5). O principal objetivo foi calcular o influxo de radiação UV solar através da pupila do olho humano em duas situações básicas: quando um indivíduo, em ambiente externo diurno, usa óculos escuros e quando não os usa. Em ambas situações, foi levada em consideração a dilatação pupilar de modo a determinar a área iluminada pela radiação UV solar. Além disso, considerou-se o FOV percebido pelo olho, uma vez que, além da dilatação/contração da pupila, outras respostas fisiológicas naturais ocorrem visando diminuir a luminância. Por exemplo, ocorre franzimento e diminuição
da distância intrapalpebrar em ambientes muito iluminados, onde cílios e sobrancelhas promovem mais sombra para o meio ocular.



Figura 5 – Pupila e estruturas anteriores do olho, objeto desta investigação.

Fonte: Adaptada de Olhar Digital (2022).

Se a razão entre o influxo de UV através da pupila, com óculos e sem óculos, for maior que 100%, isso significa que óculos com lentes de baixa qualidade de fato aumentam o influxo de UV através da pupila dilatada (com óculos) em comparação à pupila contraída (sem óculos). Para maior fidelidade e realismo, foram levadas em consideração as respectivas absorções de UV pelos meios oculares anteriores à pupila, i.e., a córnea e o humor aquoso (Fig. 5).

Os resultados deste trabalho poderão dar suporte aos comitês de revisão da norma ISO 12312-1, às sociedades médicas e ao público em geral.

Long story short, em termos da proteção contra radiação UV solar, sabemos o que é um bom par de óculos escuros. Esses devem filtrar 100% do UV. Mas o que é um par de óculos ruins, i.e., usá-los aumentaria o risco? Não perca os próximos capítulos...

1.4 Desafios científicos

O maior desafio foi a produção sistemática de resultados teóricos para a incidência de radiação UV solar nos meios oculares através da pupila. Foi necessário esforço teórico para determinar, por meio de modelos adequados e precisos, a irradiância espectral solar ao nível do solo em determinada localidade e horário, podendo, a seguir, determinar a luminância a céu aberto. Calcular a luminância do ambiente externo exigiu a compreensão de alguns modelos teóricos para se avaliar o modelo mais adequado a esta investigação. Dessa forma, foi possível estimar o diâmetro pupilar sob variadas condições de luminância. As medidas⁴ espectroscópicas de transmitância de amostras de óculos de sol foram a seguir utilizadas para atenuar a luminância externa e estimar novamente o diâmetro pupilar. Nessas duas situações (sem e com óculos de sol), foram calculadas as respectivas exposições radiantes de radiação UV através das respectivas pupilas.

Este é um trabalho de grande demanda teórica e computacional, com o estudo de modelos atmosféricos, adequação e desenvolvimento de novos programas computacionais para a realidade brasileira. Foi necessário o uso exaustivo e intensivo de um sistema computacional na forma de operações de ponto flutuante em precisão dupla (REAL*8). Os códigos computacionais foram desenvolvidos na linguagem FORTRAN, que é uma linguagem de programação científica por excelência.

⁴ Medidas realizadas pela Dra. Fernanda Oliveira Duarte.

2 MÉTODO

2.1 Conceitos fundamentais

Nesta seção serão utilizados alguns conceitos fundamentais de radiometria, como definidos no Glossário na página 71. Dessa forma, os cálculos e simulações computacionais podem ser detalhados.

A situação típica que este trabalho se propôs a investigar é a de um indivíduo usando óculos de sol na posição vertical, exposto a condições atmosféricas descritas como céu limpo (*clear sky*), ou seja, sem nuvens e poluentes. Esse indivíduo pode estar em qualquer localidade do globo terrestre, em qualquer dia e horário do ano. Nesse cenário, o indivíduo manteve o olhar fixo para o horizonte (linha de visada de 0°), conforme esquematizado na Fig. 6.

Figura 6 – Aspectos geométricos relacionados à posição do sol e de um indivíduo com linha de visão para o horizonte.



Fonte: Adaptada de Sliney (1997).

Assim, calculou-se a irradiância e a exposição radiante para uma superfície vertical, simulando-se o espectro da radiação solar por meio de um modelo amplamente utilizado e validado na literatura (GUEYMARD, 1995; GUEYMARD, 2001; GUEYMARD, 2019). Como exemplo prático, esse cálculo foi feito para a latitude da cidade de São Paulo (23°32′51″ S), para todos os dias do ano, do nascer ao pôr do sol.

2.2 Irradiância solar

A irradiância solar pode ser caracterizada a partir de suas componentes, ou seja, as irradiâncias direta, difusa e refletida, conforme mostrado na Fig. 7. A soma dessas três componentes resulta na irradiância global.

Figura 7 – Componentes direta, difusa e refletida da irradiância solar.



Fonte: Adaptada de Penn State (2021).

Considerando apenas a faixa do UV, a irradiância solar direta total (em W/m^2) para um determinado instante de tempo e em um determinado local, é calculada em termos da irradiância espectral pela seguinte expressão:

$$E_d(\mathbf{r},t) = \int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E(\lambda,\mathbf{r},t) d\lambda.$$
(2.1)

Nessa expressão, \mathbf{r} representa as coordenadas espaciais do local, dadas pelas coordenadas geográficas latitude, longitude e altitude.

A exposição radiante direta (em J/m^2) sobre uma superfície vertical, durante um determinado período de tempo, pode ser calculada como:

$$H_d(\mathbf{r}) = \int_{t_1}^{t_2} E_d(\mathbf{r}, t) \sin[Z_S(\mathbf{r}, t)] dt, \qquad (2.2)$$

na qual a variável $Z_S(\mathbf{r}, t)$ é o ângulo entre o raio incidente do sol e a normal à superfície terrestre, em função do local considerado, do dia do ano e do horário do dia escolhido. Esse ângulo com a vertical é chamado ângulo zenital e será usado mais adiante.

A grande dificuldade para esses cálculos é obter a irradiância espectral $E(\lambda, \mathbf{r}, t)$ na superfície terrestre para a localidade desejada, para a época do ano e hora do dia. A irradiância espectral solar $E(\lambda, \mathbf{r}, t)$ ao nível do solo deve ser obtida ou por medições ou por modelagem teórica. Uma vez que dados experimentais sobre a irradiância espectral solar não estão prontamente disponíveis, deve-se usar um modelo de transferência radiativa atmosférico. Deve-se considerar a posição geográfica do local, sua respectiva altitude e o ângulo de inclinação da Terra na data desejada. Além disso, dados atmosféricos típicos, como coluna de ozônio, vapor de água e poluentes podem ser considerados.

Algumas tentativas de modelagem do espectro solar na superfície da Terra existem na literatura para aplicações semiquantitativas (HOOVER, 1986; HOOVER; MAR-SAUD, 1986). Neste trabalho, foi utilizado um modelo conhecido na literatura, chamado *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, Version 2* (SMARTS2) (GUEYMARD, 1995; GUEYMARD, 2001; GUEYMARD, 2019). Esse modelo é baseado em dados de satélite e na teoria da transferência de radiação na atmosfera. A escolha desse modelo deveu-se ao fato de ter seu código aberto, permitindo que fosse adaptado às condições locais de utilização. Além disso, esse modelo provou-se preciso e suficientemente acurado quando comparado com modelos proprietários e sofisticados (KOEPKE *et al.*, 1998; GUEYMARD, 2019). Para efeitos de comparação, a Fig. 8 mostra a irradiância espectral solar incidente na superfície da Terra calculada pelo modelo SMARTS2 e comparada com dados experimentais. Nota-se claramente uma excelente concordância entre as medidas e os resultados teóricos previstos.





Fonte: O autor com dados de Gueymard (2019).

A Fig. 9 mostra a irradiância espectral solar na faixa do UV, incidente sobre a

superfície da Terra, calculada pelo modelo SMARTS2 para exemplificar uma situação típica. A irradiância global é a soma das componentes direta e difusa.





2.3 Luminância

Em fotometria, luminância é o brilho aparente percebido, isto é, quão brilhante um objeto aparece ao olho humano. É medida em candelas por metro quadrado (cd/m^2) . A Fig. 10 relaciona alguns conceitos essenciais de fotometria para o presente projeto.





Fonte: Adaptada de RS Agencies (2015).

As fontes de luz que observamos também têm luminância. O olho humano pode suportar uma enorme gama de brilho, podendo variar de 10^{-6} cd/m² a 10^{6} cd/m² ou mais, conforme esquematizado na Fig. 11.

Figura 11 – Intervalo de sensibilidade do olho humano para o brilho percebido de objetos e fontes luminosas.



Fonte: Adaptada de Foster, Hughes e Peirson (2020).

Neste trabalho, dada a condição esquematizada na Fig. 6, foi calculada a luminância de um elemento do céu, mostrado na Fig. 12. Nessa figura estão representadas as principais variáveis geométricas para o cálculo da luminância, sendo Z o ângulo zenital (já definido na seção 2.2), γ o ângulo azimutal (a partir do Norte e em sentido horário) e χ a distância angular entre o sol e o elemento de céu, dada pela expressão:

$$\cos\chi = \cos Z_S \cos Z + \sin Z_S \sin Z \cos(|\gamma - \gamma_S|).$$
(2.3)

Figura 12 – Aspectos geométricos relacionados à posição do sol e um elemento do céu para o cálculo da luminância.



Fonte: Adaptada de Xiao et al. (2010).

No cálculo da luminância do elemento de céu, foi utilizado um modelo de distribuição de luminância apresentado em Igawa *et al.* (2004). No entanto, o modelo de Igawa *et al.* (2004) foi melhorado pela utilização do modelo SMARTS2 (GUEYMARD, 1995; GUEYMARD, 2001; GUEYMARD, 2019) no cálculo da iluminância, que é necessária para a posterior determinação da luminância. Essa escolha se deve à maior precisão e fidelidade do modelo SMARTS2.

A luminância é calculada por:

$$L_{va}(Z_S, Z, \chi) = L_{vz}(Z_S)L_v(Z_S, Z, \chi).$$
(2.4)

A função $L_v(Z_S, Z, \chi)$ é a distribuição de luminância relativa do céu, calculada pelo produto da função de gradação $\phi(Z)$ pela função indicatriz $f(\chi)$, i.e.,

$$L_{v}(Z_{S}, Z, \chi) = \frac{\phi(Z)f(\chi)}{\phi(0)f(Z_{S})},$$
(2.5)

na qual $\phi(Z)$ e $f(\chi)$ são dadas por:

$$\phi(Z) = 1 + A \exp\left(\frac{B}{\cos Z}\right) \tag{2.6}$$

е

$$f(\chi) = 1 + C \left[\exp(D\chi) - \exp\left(D\frac{\pi}{2}\right) \right] + E \cos^2\chi.$$
(2.7)

As constantes para céu claro são dadas em CIE (2003) e valem A = -1, B = -0.55, C = 10, D = -3 e E = 0.45.

A função de gradação $\phi(\theta)$ expressa as variações da luminância ao longo do meridiano vertical do céu causadas pela difusão espectral, ou seja, relaciona a luminância de um elemento do céu com o respectivo ângulo zenital. A função indicatriz de espalhamento $f(\chi)$ representa a distribuição de raios solares difundidos por uma partícula atmosférica. Relaciona a luminância relativa de um elemento do céu à sua distância angular do sol.

Na Eq. (2.4), a função $L_{vz}(Z_S)$ é a luminância do zênite e é dada por:

$$L_{vz}(Z_S) = \frac{E_{vd}}{\int_{Z=0}^{\pi/2} \int_{\gamma=0}^{2\pi} L_v(Z_S, Z, \chi) \sin Z \cos Z \, dZ \, d\gamma},$$
(2.8)

na qual E_{vd} é a iluminância difusa. Essa grandeza foi calculada pelo modelo SMARTS2 (GUEYMARD, 1995; GUEYMARD, 2001; GUEYMARD, 2019) em vez da maneira proposta por Igawa *et al.* (2004). Vale lembrar que a distância angular χ depende do ângulo azimutal γ na Eq. (2.8).

Neste trabalho, o ângulo de azimute γ do elemento de céu é igual ao ângulo de azimute do sol γ_s . Como a elevação do elemento de céu é 0°, ou seja, linha de visão no

horizonte (ver Fig. 6), a distância angular χ entre o sol e o elemento de céu é igual à própria elevação do sol, que vale 90° – Z_S (ver Fig. 12). Como salientado por Gueymard e Ivanova (2018), o modelo de Igawa *et al.* (2004), utilizado neste trabalho, subestima a radiância circunsolar devido a imprecisões nas medidas de radiância ao redor do sol. Assim, para evitar essas imprecisões, Gueymard e Ivanova (2018) apontam que a distância angular entre o centro do sol e o elemento de céu deve ser maior que 18° para uma modelagem confiável da luminância. Portanto, essa restrição de distância angular será respeitada na presente investigação.

2.4 Diâmetro pupilar

Estudos sobre pupilometria têm sido realizados desde 1918 (BLANCHARD, 1918; REEVES, 1918) para estimar o tamanho médio da pupila em uma gama de níveis de luminância variando de níveis escotópicos a fotópicos. Esses experimentos mediram o diâmetro da pupila dependendo da luminância ambiente e uma função matemática foi ajustada às medidas. Watson e Yellott (2012) forneceram uma revisão abrangente dos modelos comumente usados na pupilometria. Além disso, eles desenvolveram um modelo próprio para o diâmetro da pupila. Entre os modelos revisados por Watson e Yellott (2012), foram selecionados três modelos (MOON; SPENCER, 1944; STANLEY; DAVIES, 1999; BARTEN, 1999) que dão melhores resultados em comparação com o modelo de Watson e Yellott (2012). Os quatro modelos matemáticos utilizados para o diâmetro da pupila (D) em função da luminância (L) são mostrados nas equações a seguir:

$$D(L) = 4.9 - 3\tanh(0.4\log L - 0.00114), \tag{2.9}$$

$$D(L,a) = 7,75 - 5,75 \frac{(La)^{0,41}}{(La)^{0,41} + 31,714},$$
(2.10)

na qual a é a área do FOV, dado em graus.

$$D(L,a) = 5 - 3\tanh\left(0.4\log\frac{La}{40^2}\right)$$
(2.11)

е

$$D(L,a) = 2,003 \frac{(La)^{0,41} + 121,514}{(La)^{0,41} + 31,714}.$$
(2.12)

Esses modelos têm diferentes medidas experimentais com diferentes sujeitos. Assim, para não ater a apenas um dos quatro modelos (MOON; SPENCER, 1944; STAN-LEY; DAVIES, 1999; BARTEN, 1999; WATSON; YELLOTT, 2012) em particular e para buscar um resultado combinado entre eles, foi usado um modelo de pós-processamento para estimar uma expectativa ótima para o diâmetro da pupila, dadas as estimativas dos quatro modelos selecionados. Essa estimativa de pós-processamento deve cancelar os enviesamentos dos modelos individuais em algum nível. O pós-processamento mais simples consiste em calcular a respectiva média aritmética entre os quatro modelos. Portanto, quando necessário, foram utilizados os resultados dessa média para o diâmetro da pupila. A Fig. 13 mostra as curvas das funções matemáticas de cada modelo selecionado e a respectiva média. O destaque mostra a faixa de interesse no presente cálculo da luminância ambiente e do diâmetro da pupila.





Fonte: O autor.

2.5 Campo de visão

Em ambientes muito claros à luz do dia, existem características e reações faciais naturais e involuntárias com o objetivo de atenuar a luminosidade percebida pelo olho. Além da bem reconhecida constrição pupilar que limita a entrada do UV nos olhos, a redução fisiológica normal da fissura palpebral também limita muito o total de UV atingindo a córnea e entrando através da pupila, reduzindo o campo visual vertical. Por exemplo, as sobrancelhas, pálpebras e franzimento (*squint*) reduzem o ângulo sólido de admissão de luz no olho. A Fig. 14 ilustra esses mecanismos.

O ângulo sólido da admissão de luz corresponde à metade do ângulo do ápice de um cone reto, ou seja, o ângulo do ápice é 2θ . O ângulo θ (ver Fig. 6) é o FOV e está relacionado ao ângulo sólido Ω (em sr) por:

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \left(\frac{\theta}{2}\right). \tag{2.13}$$

Figura 14 – Mecanismos naturais de atenuação da incidência de radiação solar no olho.



Fonte: Adaptada de Sliney (2011).

Dados experimentais de como a luminância do ambiente afeta o FOV permitiram a obtenção de uma relação empírica entre eles. Essa expressão foi determinada por Sliney e colaboradores (SLINEY, 1995; DEAVER; DAVIS; SLINEY, 1996) e é reproduzida a seguir:

$$\theta = 34^{\circ} - 0.0013L_{va},\tag{2.14}$$

na qual L_{va} é a luminância do ambiente (em cd/m²) que, neste trabalho, é calculada pela Eq. (2.4).

2.6 Transmitância espectral das lentes

As transmitâncias espectrais das lentes dos óculos escuros, denotadas por $\tau_f(\lambda)$, foram medidas por dois espectrofotômetros para dupla verificação dos resultados. A saber, o espectrofotômetro UV-Vis CARY 5000 (Agilent) de feixe duplo, do Laboratório de Instrumentação Oftálmica — LIO do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos — EESC/USP e o espectrofotômetro UV-Vis UV-1800 (Shimadzu) do Intituto de Física de São Carlos — IFSC/USP. As lentes foram medidas espectroscopicamente usando uma máscara circular com um diâmetro de 5 mm no centro das lentes e com resolução espectral de 1 nm. Antes de cada medição, as lentes foram limpas para evitar interferências espúrias. Todas as medidas foram realizadas pela Dra. Fernanda Oliveira Duarte. Essas medidas na faixa do UV-Vis, ou seja, no intervalo 280 nm — 780 nm, permitiram quantificar a proteção UV das lentes e os respectivos graus de escurecimento, os quais são separados por categorias, conforme a Tabela 1. Nessa tabela, a transmitância luminosa τ_V (em %) é calculada em termos da transmitância espectral $\tau_f(\lambda)$ da lente de acordo com a prescrição da norma NBR ISO 12311 (ABNT, 2018):

$$\tau_{\rm V} = 100 \times \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \tau_f(\lambda) S_{D65}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_{D65}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}.$$
(2.15)

Nessa equação, $S_{D65}(\lambda)$ é a distribuição espectral de radiação do iluminante padrão CIE D65 e $V(\lambda)$ é a função de eficiência luminosa espectral para visão fotópica. Ambos são dados no anexo D da norma NBR ISO 12311 (ABNT, 2018).

2.7 Influxo de UV solar através da pupila

Finalmente, tendo-se calculada para uma determinada situação a luminância do céu [Eq. (2.4)], o diâmetro pupilar e o FOV em função dessa luminância, pode-se calcular a "quantidade" de UV solar que atravessa a pupila. Nesse sentido, apresentaram-se duas condições de cálculo. Uma condição refere-se à situação com o indivíduo usando óculos de sol e a outra sem os óculos. Assim, calculou-se o influxo de UV através da pupila dilatada (com óculos) e através da pupila contraída (sem óculos), sempre considerando o FOV para cada situação. A razão entre essas duas quantidades fornece o influxo relativo, denominado $\epsilon_{\rm UV}$ (do grego $\epsilon\iota\sigma\rho\eta - eisroi$). Se o influxo relativo resultar em valores maiores que a unidade ($\epsilon_{\rm UV} > 100\%$) para determinados óculos de sol, isso representa que a dilatação da pupila e/ou o FOV devidos aos óculos permitiram maior incidência de radiação UV ao meio interno dos olhos. Ao contrário, $\epsilon_{\rm UV} < 100\%$ significa que a dilatação pupilar e/ou o

FOV devidos ao uso dos óculos não são suficientes para promover um aumento do influxo de UV através da pupila quando comparado com o influxo sem os óculos.

Especificamente, o influxo relativo $\epsilon_{\rm UV}$ foi calculado pela expressão

$$\epsilon_{\rm UV} = \frac{\Omega_f A_f \int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_c(\lambda) \tau_e(\lambda) \tau_f(\lambda) W(\lambda) \, d\lambda}{\Omega_u A_u \int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_c(\lambda) \tau_e(\lambda) W(\lambda) \, d\lambda} = \omega \alpha \frac{\int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_c(\lambda) \tau_e(\lambda) \tau_f(\lambda) W(\lambda) \, d\lambda}{\int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_c(\lambda) \tau_e(\lambda) W(\lambda) \, d\lambda}.$$
(2.16)

Nessa expressão¹, $E_c(\lambda)$ é a irradiância espectral solar incidente sobre a córnea, calculada pelo modelo SMARTS2. $\tau_e(\lambda)$ é a transmitância espectral dos componentes do olho anteriores à superfície de interesse. Para uma superfície plana na pupila, $\tau_e(\lambda)$ é o produto das transmitâncias espectrais da córnea e do humor aquoso. Ambas as transmitâncias são descritas na literatura (HOOVER, 1987; CIE, 2012) e mostradas na Fig. 15. A transmitância





Fonte: O autor com os dados de CIE (2012).

 $\tau_f(\lambda)$ é a transmitância espectral das lentes de óculos de sol. Os coeficientes A_f e A_u são as áreas da pupila com e sem os óculos escuros, respectivamente, sendo $A_f > A_u$. Os ângulos Ω_f e Ω_u são os ângulos sólidos correspondentes ao FOV para cada situação. Por fim, $W(\lambda)$ é uma função de ponderação espectral para a resposta da córnea em absorver a radiação actínica (biologicamente ativa). Neste trabalho, será adotado o valor constante $W(\lambda) = 1$ por se tratar do pior cenário.

¹ Os índices têm os seguintes significados: c - cornea; e - eye; f - filtered; u - unfiltered.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados para o influxo relativo de UV que atravessa a pupila. Inicialmente, considerando-se apenas a dilatação da pupila, ou seja, desprezando-se os efeitos do FOV. A seguir, será incorporado o efeito do FOV. Assim, de acordo com a Eq. (2.16), o termo α será ignorado em um primeiro momento. Isso visa analisar a contribuição da dilatação da pupila de forma isolada e posteriormente comparar com a inclusão do FOV.

Como exemplo típico, foi escolhida a cidade de São Paulo, localizada na latitude 23°32′51″ S, longitude 46°38′10″ W e uma altitude média de 760 m. Também admitiu-se a condição de céu limpo por ser o pior cenário de exposição ao sol, isto é, sem cobertura de nuvens e sem poluentes que diminuem a incidência de UV na superfície. Todas as integrais nas equações foram computadas usando o método de 5 pontos da quadratura Gauss-Legendre com uma interpolação cúbica de Lagrange do integrando (ABRA-MOWITZ; STEGUN, 1970). Tais métodos numéricos foram escolhidos pois provaram-se robustos e precisos em problemas de grande demanda computacional (GROOTE; MA-SILI; HORNOS, 2000; GROOTE; MASILI, 2004; MASILI; VENTURA, 2019; MASILI; DUARTE; VENTURA, 2022a).

3.1 Luminância e pupila

A literatura contém vários estudos do diâmetro da pupila em função da luminância do ambiente. Utilizando a prescrição estabelecida na seção 2.4, o diâmetro da pupila sem o uso dos óculos foi calculado e está mostrado na Fig. 16 juntamente com a luminância. Esse gráfico exemplifica o dia 23 de janeiro. Pode-se notar o comportamento antagônico esperado da pupila em relação à luminância. Ao meio-dia, quando a elevação do sol é maior, o olho com linha de visada horizontal percebe uma menor luminância, ao contrário do início da manhã e do fim da tarde, quando o sol está mais próximo ao horizonte.

Usando-se um par de óculos escuros, a luminância percebida pelo olho é atenuada, provocando uma resposta fisiológica de dilatação da pupila. Esse comportamento está mostrado na Fig. 17 para o dia 23 de janeiro e um determinado par de óculos de sol. Também está mostrado o diâmetro da pupila sem o uso dos óculos escuros para comparação, representado pela curva inferior (verde). Apesar de não ser objeto de análise nesta investigação, também está representada na Fig. 17 a curva para o diâmetro da pupila usando-se os mesmos óculos após ensaio de envelhecimento em simulador solar (MASILI *et al.*, 2019). Os óculos tornam-se mais claros com o passar do tempo e, portanto, atenuam menos a luminância, acarretando em menor dilatação da pupila.





Figura 17 – Diâmetro da pupila com e sem óculos de sol para o dia 23 de janeiro. Também está mostrada a curva após ensaio de 2500 h das lentes em simulador solar.



Fonte: O autor.

Para se ter ideia da variação da luminância do ambiente percebida pelo olho e o respectivo diâmetro da pupila ao longo do ano, as Figs. 18 e 19 mostram as curvas para o primeiro dia de cada mês, de janeiro a julho, na condição sem óculos escuros. Os meses restantes repetem o comportamento de forma inversa.





Fonte: O autor.

Figura 19 – Diâmetro da pupila devido à luminância do ambiente, sem óculos escuros, ao longo do ano.



Fonte: O autor.

No inverno, quando a elevação do sol ao meio-dia local é menor, a luminância percebida pelo olho é maior quando comparada com o mesmo horário em um dia de verão, quando o sol está praticamente no zênite. Assim, o diâmetro da pupila comportase inversamente (Fig. 19).

3.2 Luminância e campo de visão

Além da pupila, o FOV também se ajusta à luminância do ambiente pelos mecanismos de franzimento e cerramento das pálbebras, mostrados na seção 2.5 e ilustrados na Fig. 14. Portanto, quanto maior a atenuação luminosa proporcionada pelos óculos de sol, maior o FOV, assim como ocorre com a pupila. Isso pode ser observado na Fig. 20, na qual o FOV é mostrado ao longo do dia 21 de dezembro para o uso de alguns óculos de sol, escolhidos como exemplos típicos. As curvas superiores ilustram os óculos mais escuros, com maior FOV, ao contrário das curvas mais inferiores, que são mais claras. Em comparação, a linha tracejada indica o FOV sem os óculos, mostrando nitidamente a grande diferença entre os dois cenários.





3.3 Medidas espectroscópicas das lentes

Esta investigação utilizou 214 lentes de óculos de sol, das quais três eram de vidro e as restantes eram de materiais poliméricos típicos usados na indústria (policarbonato, polimetilmetacrilato, CR-39 e poliamida). Todos os óculos eram desprovidos de marca, oriundos da economia informal, variando da categoria 1 (mais claros) à categoria 4 (mais escuros). Óculos muito escuros, com transmitância luminosa abaixo de 3%, não são permitidos pela norma (ABNT, 2015), não sendo categorizados portanto. Porém, na amostra foram encontradas lentes muito escuras e, para efeitos deste trabalho, serão consideradas sem categoria. As lentes da categoria 0 não foram investigadas porque são lentes transparentes e não proporcionam dilatação pupilar nem aumento do FOV. Os óculos de sol utilizados neste trabalho foram doados pela Associação Brasileira da Indústria Óptica (Abióptica). Não havia nenhuma informação prévia sobre suas especificações. A Tabela 2 lista a quantidade de lentes de óculos escuros por categoria. A proporção de cada categoria replica aproximadamente o mercado de óculos de sol no Brasil, no qual os óculos das categorias 2 e 3 são os mais comercializados.

Categoria	Quantidade	Proporção (%)
1	6	$2,\!80$
2	109	$50,\!93$
3	65	$30,\!37$
4	26	$12,\!15$
	8	3,74
Total	214	99,99 🞤

Tabela 2 – Amostra de lentes de óculos escuros por categoria, totalizando 214 lentes.

Fonte: O autor.

A Fig. 21 mostra as medidas¹ das transmitâncias espectrais de algumas lentes de óculos de sol e uma lente ideal (100% de proteção UV), rotulada como R311-24, e listadas na Tabela 3. Essas lentes apresentaram transmitância significativa na faixa UV, exceto para a lente ideal, que tem uma transmitância espectral UV na linha do 0%. Embora este trabalho considere a faixa UV até 400 nm, mesmo observando que a norma estabelece 380 nm como limite superior, ainda assim essas lentes estariam em não conformidade no quesito transmitância UV-A e/ou UV-B, conforme listado na Tabela 3.

Dentre as 214 lentes testadas, a Tabela 3 lista as piores lentes no que diz respeito à proteção UV dentro de cada categoria, totalizando 16 lentes. Segundo a norma (ABNT, 2015), essas lentes estariam com não conformidades na proteção UV e seriam potencialmente perigosas. As 3 últimas lentes listadas na Tabela 3 são exemplos de lentes ideais que filtram 100% de UV até 400 nm. Contudo, as duas lentes sem categoria não são permitidas pela norma por serem excessivamente escuras. A última coluna da Tabela 3 mostra o resultado do teste de conformidade da norma (ABNT, 2015), cujos requisitos foram apresentados na Tabela 1. Note que apenas uma lente (R311-24) está em conformidade com a norma. As demais não filtram o UV-A, UV-B ou ambos dentro dos limites adotados pela norma (Tabela 1).

¹ Medidas realizadas pela Dra. Fernanda Oliveira Duarte.

Figura 21 – Transmitância espectral para algumas lentes em não conformidade e uma lente bloqueadora até 400 nm (R311-24).



Fonte: O autor.

Tabela 3 – Lentes potencialmente perigosas segundo a norma e 3 lentes ideais com 100% de proteção UV. $\tau_{\rm V}$ é a transmitância luminosa (400 nm – 780 nm).

Categoria	Lente	$ au_{ m V}~(\%)$	Proteção UV (%)	Não-conformidade
1	R210-08	43,43	83,81	UV-B
	R273-06	$43,\!14$	84,40	UV-B
2	R139-09	$18,\!68$	$76,\!33$	UV-A/UV-B
	R268-06	$40,\!59$	80,64	UV-A/UV-B
	R197-08	$38,\!93$	83,43	UV-A/UV-B
	R080-08	$29,\!04$	$85,\!68$	UV-A
	R071-01	$27,\!08$	86,26	UV-A/UV-B
	R275-05	42,24	$86,\!90$	UV-B
	R126-22	$23,\!91$	87,98	UV-A
	R362-06	$25,\!58$	88,04	UV-A/UV-B
3	R069-11	$12,\!45$	$78,\!61$	UV-A/UV-B
	R010-06	$17,\!51$	$90,\!56$	UV-A/UV-B
	R075-20	$9,\!63$	90, 91	UV-A
	R195-20	$17,\!94$	$91,\!40$	UV-A/UV-B
4	R124-01	7,89	$92,\!07$	UV-A/UV-B
	R144-11	$7,\!53$	96,78	UV-A
	R311-24	$3,\!29$	100,00	
	L305-18	$2,\!49$	99,99	$ au_{ m V} < 3\%$
	R224-18	$2,\!64$	99,99	$\tau_{\rm V} < 3\%$

3.4 Influxo relativo de UV através da pupila

Os cálculos foram realizados para cada dia do ano, do nascer ao pôr do sol, mas respeitando o mínimo de 18° para a elevação do sol, como justificado na seção 2.3. No cálculo do influxo de UV no olho, serão reportados apenas os resultados para o pior dia do ano para a localidade em questão. Após análise dos resultados de todos os dias do ano, a pior situação ocorreu no dia 21 de dezembro, ano não bissexto, que corresponde ao solstício de verão (maior fotoperíodo do ano no hemisfério sul).

3.4.1 Contribuição da dilatação da pupila

Nesta seção, os resultados mostrarão apenas a contribuição da dilatação da pupila para o influxo relativo de UV, $\epsilon_{\rm UV}$, i.e., o FOV será negligenciado [ω na Eq. (2.16)]. Dessa forma, será possível confrontar os resultados com aqueles obtidos por Hoover (1987) e posteriormente com os resultados incluindo o FOV.

A Fig. 22 mostra o influxo relativo de UV para algumas lentes cujas transmitâncias foram mostradas na Fig. 21. Todas as curvas são para o dia 21 de dezembro. Os óculos prejudiciais seriam aqueles com $\epsilon_{\rm UV}$ maior do que 100%, o que significa que os óculos de sol permitiriam mais influxo de UV através da pupila do que o influxo sem óculos de sol.





Fonte: O autor.

A pior amostra exibiu um valor médio de $\epsilon_{\rm UV}$ de aproximadamente 42% ao longo do dia. Isso significa que a irradiância solar que atravessa a pupila ao se usar esses óculos ainda é 58% a menos do que irradiância admitida pela pupila sem os óculos. Esse resultado mostra que o fator dilatação da pupila sozinho não dá suporte à alegação de que os óculos que não filtram todo o espectro UV representam um risco adicional e, portanto, seria melhor não usá-los. Assim, chegamos à mesma conclusão observada por Hoover (1987), ainda que o presente cálculo utilize modelos muito mais sofisticados para a irradiância solar, a luminância do ambiente e a dilatação da pupila.

3.4.2 Contribuição da dilatação da pupila e do campo de visão

A Fig. 23 mostra o influxo relativo de UV $\epsilon_{\rm UV}$ [Eq. (2.16)] para as mesmas lentes apresentadas na Fig. 21. Todas as curvas são para o dia 21 de dezembro. Os períodos prejudiciais são aqueles com $\epsilon_{\rm UV}$ maior do que 100%, o que significa que o uso dos óculos de sol propiciam mais influxo de UV no olho do que o influxo quando na condição sem óculos de sol.





Fonte: O autor.

O principal fator para esse comportamento é a relação ω entre os FOVs (lembrando que o squint é o principal componente da diminuição do FOV) com e sem óculos escuros. A relação α entre as áreas da pupila desempenha um papel menor e sozinha não é responsável pelos resultados atuais [Eq. (2.16)]. Por exemplo, a Fig. 24 mostra a razão entre as áreas da pupila com e sem os óculos selecionados. Quanto mais escura a lente, maior o valor de α . Assim, a lente mais escura (R311-24) tem a maior proporção entre as áreas da pupila em todos os momentos ao longo do dia, atingindo o pico ao meio-dia com um valor de 1,47. Entretanto, essa lente tem 100% de proteção UV e não representa nenhum risco. Para a pior lente (R069-11) mostrada na Fig. 22, o pico na relação da área pupilar α por volta do meio-dia é apenas 1,20, não sendo suficiente para resultar em um perigo para os olhos.



Figura 24 – Razão entre as áreas das pupilas com óculos escuros e sem óculos escuros.

Por outro lado, a razão ω entre o FOV com e sem óculos escuros desempenha um papel preponderante, como mostrado na Fig. 25.



Figura 25 – Razão entre ângulos sólidos compreendendo o FOV com e sem óculos escuros.

Fonte: O autor.

Em comparação com a Fig. 24, a razão entre os FOVs (ω) é maior do que a razão entre as áreas da pupila (α) na maior parte do tempo, como mostrado na Fig. 26.



Figura 26 – Razão entre ω e α mostrando os períodos em que cada um tem maior contribuição.

Nessa figura, no início da manhã e final da tarde, algumas lentes apresentam $\alpha > \omega$, ou seja, a dilatação da pupila tem maior contribuição para o influxo de UV do que o FOV, dado que ω/α é menor que a unidade. Porém, essa maior contribuição da dilatação da pupila nesses períodos é marginal visto que ω/α é ligeiramente menor que a unidade. Por outro lado, nos períodos em que o FOV tem contribuição mais relevante, ω chega a ser até quatro vezes maior que α . Além disso, como já demonstrado na seção 3.4.1, apenas a dilatação da pupila não representa um fator preponderante para aumentar o risco em relação ao não uso dos óculos.

O comportamento concorrente de ω e α mostra um declínio em $\epsilon_{\rm UV}$ por volta do meio-dia, como mostrado na Fig. 23. Esse declínio surge por causa do FOV crescente sem óculos escuros, ou seja, com o aumento da elevação do sol, no qual não há irradiação direta sobre os olhos a partir de um determinado horário. Isso enfraquece a resposta de squint, fazendo com que a razão ω diminua, como mostrado na Fig. 25.

Esse efeito é evidente pela razão de influxo $\epsilon_{\rm UV}$. Por exemplo, no pior caso (R069-11 na Fig. 23), desconsiderando completamente a relação ω entre os FOVs e levando-se em conta apenas a proporção α entre as áreas da pupila, o resultado apresenta manifesta diferença. Essa análise é mostrada na Fig. 27, na qual a linha sólida representa o cálculo completo do influxo relativo $\epsilon_{\rm UV}$ (considerando $\alpha \in \omega$) e a linha pontilhada representa o cálculo negligenciando a relação ω . Esse último resultado inferiria uma falsa lente aceitável, enquanto que é uma lente potencialmente perigosa ao permitir mais influxo de UV ao olho se não for usada.





Fonte: O autor.

Das 214 lentes testadas, 8 apresentaram um risco maior quando usadas em comparação aos olhos desprotegidos, representando 3,7% do total de lentes analisadas. A Tabela 3 mostra os piores resultados para cada categoria de lentes, incluindo as 8 lentes potencialmente inseguras, listadas em vermelho.

As lentes da categoria 1 são naturalmente adequadas para o uso porque são muito claras e não proporcionam atenuação da luz suficiente para induzir uma dilatação pupilar significativa e um FOV maior. As lentes potencialmente perigosas para os olhos são as das categorias 2 e 3. Todas as lentes da categoria 2 com proteção UV maior que 88% e na categoria 3 maior que 91% exibiram uma proteção eficaz. Embora se pudesse esperar que as lentes mais perigosas estivessem na categoria 4 e sem categoria por serem muito escuras, todas essas lentes (26 lentes da categoria 4 e 8 lentes sem categoria, conforme Tabela 2) tinham pelo menos 92% de proteção UV e resultaram adequadas para uso. Como exemplo das melhores lentes, a Tabela 3 lista uma com 100% de proteção UV, marcada em azul (R311-24). Entretanto, é interessante notar que mesmo as lentes em não conformidade com a norma atual, ainda assim podem ser protetoras, embora não no melhor sentido. Isso significa que é melhor usar essas lentes do que não usá-las.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho apoiam a conclusão de que o uso de óculos de sol com baixa proteção UV tem o potencial de aumentar os riscos para a saúde dos olhos. Porém, o argumento de que isso se deve à dilatação da pupila está errado.

Considerando apenas a dilatação pupilar, todas as lentes testadas, por pior que fossem em termos de proteção contra o UV, ainda assim mostraram-se mais protetoras quando comparadas com o seu não uso. No entanto, a inclusão do fator relacionado ao FOV mostrou um novo aspecto. Os resultados apontaram que o argumento mais apropriado deve ser que os óculos de sol proporcionam um ambiente mais escuro ao olho, diminuindo as respostas faciais involuntárias de franzimento (*squint*), aumentando assim o FOV. Nesse novo contexto, óculos escuros com **muito baixa** proteção UV permitem mais influxo de radiação UV no olho devido ao maior FOV em comparação ao não uso dos óculos.

Entre as lentes de fato inadequadas considerando o FOV, a que apresentou melhor proteção filtrava 91% do UV, exibindo um risco potencial, pelo menos no cenário mais adverso analisado neste trabalho. No entanto, nem todas as lentes com proteção UV abaixo de 91% são inadequadas, uma vez que o FOV depende do grau de escurecimento das lentes, encontrando-se lentes adequadas com proteção UV abaixo de 91%.

Deve-se observar que óculos escuros com proteção UV aquém dos 91% são muito difíceis de se encontrar atualmente devido ao material de que são feitas as lentes, mesmo na economia informal. A amostra utilizada neste trabalho continha 16 óculos com proteção UV abaixo de 91%, representando somente 7,5% do total. Porém, apenas 8 de fato se mostraram inadequados. Esses são os verdadeiros óculos ruins.

Em termos de saúde pública e medicina preventiva, para se estar do lado seguro, sugere-se como regra prática de fácil memorização que os óculos de sol tenham no mínimo 95% de proteção contra radiação UV solar, independente da categoria dos óculos. Nesse sentido, usar qualquer par de óculos escuros é melhor do que nenhum, considerando que os materiais que compõem as lentes dos óculos de sol já possuem transmitância UV menor do que 5%.

Este trabalho apresentou resultados que são inéditos na literatura por quantificar em que medida os óculos escuros são de fato protetores contra a radiação UV no que diz respeito ao influxo de UV através da pupila (MASILI; DUARTE; VENTURA, 2022b).

5 PERSPECTIVAS

Este trabalho mostrou que para situações específicas é possível que determinados óculos de sol promovam um risco adicional à saúde dos olhos, embora esse risco não esteja relacionado à dilatação da pupila, como largamente propagado. Porém, esta pesquisa considerou um cenário severo de exposição ao UV solar, como por exemplo, o alinhamento entre o indivíduo e o sol¹, a linha de visada em 0° e a função de ponderação espectral para a resposta da córnea adotada como valor constante igual à unidade. Pode-se arrazoar que esse não seja um cenário corriqueiro ou, mais ainda, que seja muito pouco provável. Assim, uma extensão natural deste trabalho seria moderar essas condições mais adversas e recalcular o influxo relativo de UV num cenário mais provável de uso dos óculos. Ou seja, adotar incidência de radiação solar proveniente de outras direções, fixar a linha de visada normal para baixo em -15° e adicionar a função de resposta actínica da córnea. É minha opinião abalizada que, nesse novo cenário, nenhum óculos será inapropriado. Mas somente os cálculos darão números definitivos, evidentemente.

Um desdobramento secundário seria calcular a exposição radiante sobre a córnea quando do uso de óculos de sol e verificar se está em acordo com os limites de segurança prescritos pela ICNIRP, que estão para além das normas.

¹ Esse alinhamento significa que o plano de incidência da radiação solar é o plano sagital anatômico (divide o corpo humano em direita e esquerda).

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 20473**: Óptica e fotônica — Bandas espectrais. Rio de Janeiro, 2014. [Citação na pág. 33.]

ABNT. **NBR ISO 12312-1**: Proteção dos olhos e do rosto — Óculos para proteção solar e óculos relacionados Parte 1: Óculos para proteção solar para uso geral. Rio de Janeiro, 2015. [Citação nas págs. 16, 32, 34, 53 e 55.]

ABNT. **NBR ISO 12311**: Proteção dos olhos e do rosto — Métodos de ensaio para óculos para proteção solar e óculos relacionados. Rio de Janeiro, 2018. [Citação na pág. 46.]

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. (ed.). Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. Ninth printing. New York City, NY, USA: Dover Publications, 1970. [Citação na pág. 49.]

ANDERSON, W. J.; GEBEL, R. K. H. Ultraviolet windows in commercial sunglasses. Appl. Opt., v. 16, p. 515, 1977. [Citação na pág. 30.]

BACKES, C. *et al.* Sun exposure to the eyes: Predicted UV protection effectiveness of various sunglasses. **J Expo Sci Environ Epidemiol**, v. 29, n. 6, p. 753, 2019. [Citação na pág. 30.]

BARTEN, P. G. J. Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1999. [Citação na pág. 43.]

BLANCHARD, J. The brightness sensibility of the retina. **Phys. Rev.**, v. 11, n. 2, p. 81, 1918. [Citação na pág. 43.]

CIE. Publication CIE No 17 (E-l.l): International lighting vocabulary. Vienna, 1987. [Citação na pág. 31.]

CIE. **CIE Standard S007**: Erythemal reference action spectrum and standard erythemal dose. Vienna, 1998. [Citação na pág. 31.]

CIE. **Report CIE-134/1**: Standardization of the terms UV-A1, UV-A2 and UV-B. Vienna, 1999. [Citação na pág. 31.]

CIE. **CIE Standard S 011/E**: Spatial distribution of daylight – CIE standard of general sky. Vienna, 2003. [Citação na pág. 42.]

CIE. **CIE 203:2012**: A computerized approach to transmission and absorption characteristics of the human eye. Vienna, 2012. [Citação na pág. 47.]

COCKS, S. Are poor-quality sunglasses worse for you than none at all? 2015. Disponível em: https://www.goodhousekeeping.com/uk/product-reviews/latest-news/ a665736/poor-quality-sunglasses-worse-than-none-at-all/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação nas págs. 29 e 30.]

DEAVER, D. M.; DAVIS, J.; SLINEY, D. H. Vertical visual fields-of-view in outdoor daylight. Lasers Light Ophthalmol., v. 7, n. 2/3, p. 121, 1996. [Citação nas págs. 32 e 45.]

DECIDER. Clint Eastwood is not a good actor – and that's a really good thing. 2015. Disponível em: https://decider.com/2015/06/02/ clint-eastwood-is-not-a-good-actor/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 30.]

DIFFEY, B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. **Phys. Med. Biol.**, v. 36, p. 299, 1991. [Citação na pág. 28.]

DOLIN, J. P. Ultraviolet radiation and cataract: A review of the epidemiological evidence. **Br. J. Ophthalmol.**, v. 78, p. 478, 1994. [Citação na pág. 29.]

DOUGHTY, M. J.; CULLEN, A. P. Long-term effects of a single dose of ultraviolet-B on albino rabbit cornea-I. In vivo analyses. **Photochem. Photobiol.**, v. 49, p. 185, 1989. [Citação na pág. 28.]

FOSTER, R. G.; HUGHES, S.; PEIRSON, S. N. Circadian photoentrainment in mice and humans. **Biology**, v. 9, n. 7, 2020. [Citação na pág. 41.]

GROOTE, J. J.; MASILI, M. Electron affinity of the sodium atom within the coupled-channel hyperspherical approach. **The Journal of Chemical Physics**, v. 120, n. 6, p. 2767, 2004. [Citação na pág. 49.]

GROOTE, J. J.; MASILI, M.; HORNOS, J. E. Analytical functions for the calculation of hyperspherical potential curves of atomic systems. **Phys. Rev. A**, v. 62, p. 032508, 2000. [Citação na pág. 49.]

GUEYMARD, C. A. SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: Algorithms and performance assessment. [S.l.], 1995. Technical Report No. FSEC-PF-270-95. [Citação nas págs. 15, 37, 39, 40 e 42.]

GUEYMARD, C. A. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. **Sol. Energy**, v. 71, p. 325, 2001. [Citação nas págs. 37, 39 e 42.]

GUEYMARD, C. A. The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. **Sol. Energy**, v. 187, p. 233, 2019. [Citação nas págs. 37, 39 e 42.]

GUEYMARD, C. A.; IVANOVA, S. Progress in sky radiance and luminance modeling using circumsolar radiation and sky view factors. *In*: EUROSUN 2018 CONFERENCE, 12., 2018, Rapperswil, Switzerland. **Proceedings of 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry**. Rapperswil, Switzerland: International Solar Energy Society, 2018. [Citação na pág. 43.]

HARDING, J. J. The untenability of the sunlight hypothesis of cataractogenesis. **Doc. Ophthalmol.**, v. 88, p. 345, 1995. [Citação na pág. 29.]

HOOVER, H. L. Solar ultraviolet irradiation of human cornea, lens, and retina: Equations of ocular irradiation. **Appl. Optics**, v. 25, n. 3, p. 359, 1986. [Citação nas págs. 32 e 39.]

HOOVER, H. L. Sunglasses, pupil dilation, and solar ultraviolet irradiation of the human lens and retina. **Appl. Optics**, v. 26, n. 4, p. 689, 1987. [Citação nas págs. 30, 31, 32, 47, 55 e 56.]

HOOVER, H. L.; MARSAUD, S. G. Calculating solar ultraviolet irradiation of the human cornea and corresponding required sunglass lens transmittances. **Proc. SPIE** 0601, Ophthalmic Optics, p. 140, 1986. [Citação na pág. 39.]

ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Phys.**, v. 87, n. 2, p. 171, 2004. [Citação nas págs. 31, 33 e 34.]

IGAWA, N. *et al.* Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. **Sol. Energy**, v. 77, p. 137, 2004. [Citação nas págs. 42 e 43.]

KALTURA. Neurologic Exam-Adult | Cranial Nerve Exam | Normal | Cranial Nerves 2 & 3 - Pupillary Light Reflex. 2022. Disponível em: https://www.kaltura.com/index.php/extwidget/preview/partner_id/816122/uiconf_id/ 44640261/entry_id/0_a3ngkhtt/embed/dynamic? Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 29.]

KOEPKE, P. *et al.* Comparison of models used for UV index calculations. **Photochem. Photobiol.**, v. 67, n. 6, p. 657, 1998. [Citação na pág. 39.]

MASILI, M.; DUARTE, F. O.; VENTURA, L. Blue-light transmittance in sunglasses over long-term irradiation within a solar simulator. **Submitted to Research on Biomedical Engineering**, p. to appear, 2022. [Citação na pág. 49.]

MASILI, M.; DUARTE, F. O.; VENTURA, L. Calculation of solar ultraviolet influx in the eye considering the field of view and pupillary dilation due to sunglasses. A ser submetido. 2022. [Citação na pág. 61.]

MASILI, M. *et al.* Degradation of sunglasses filters after long-term irradiation within solar simulator. **Eng. Fail. Analys.**, v. 103, p. 505, 2019. [Citação nas págs. 31 e 49.]

MASILI, M.; SCHIABEL, H.; VENTURA, L. Contribution to the radiation protection for sunglasses standards. **Radiat. Prot. Dosimetry**, v. 164, n. 3, p. 435, 2015. [Citação nas págs. 31 e 33.]

MASILI, M.; VENTURA, L. Equivalence between solar irradiance and solar simulators in aging tests of sunglasses. **BioMed. Eng. OnLine**, v. 15, n. 86, 2016. [Citação na pág. 31.]

MASILI, M.; VENTURA, L. Local tilt optimization of photovoltaic solar panels for maximum radiation absorption. International Journal of Photoenergy, v. 2019, p. 3254780, 2019. [Citação na pág. 49.]

MOON, P.; SPENCER, D. On the Stiles-Crawford effect. J. Opt. Soc. Am., v. 34, p. 319, 1944. [Citação na pág. 43.]

MOORE, L. A. *et al.* Review of photokeratitis: Corneal response to ultraviolet radiation (UVR) exposure. **S. Afr. Optom.**, v. 69, p. 123, 2010. [Citação na pág. 28.]

OLHAR DIGITAL. Cientistas criam camada ocular de pele de porco e restauram a visão de 14 pessoas. 2022. Disponível em: https://olhardigital.com.br/2022/08/14/medicina-e-saude/ cientistas-criam-camada-ocular-de-pele-de-porco-e-restauram-a-visao-de-14-pessoas/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 35.]

PENN STATE. Solar resource assessment and economics. 2021. Disponível em: https://www.e-education.psu.edu/eme810/node/683. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 38.]

RABBETTS, R. B.; SLINEY, D. H. Technical report: Solar ultraviolet protection from sunglasses. **Optom. Vis. Sci.**, v. 96, p. 523, 2019. [Citação na pág. 31.]

REDDIT. Snow goggles: The first sunglasses were used 2,000 years ago by Inuit hunters. 2021. Disponível em: https://www.reddit.com/r/Damnthatsinteresting/ comments/odzzuy/snow_goggles_the_first_sunglasses_were_used_2000/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 28.]

REEVES, P. Rate of pupillary dilation and contraction. **Psychol. Rev.**, v. 25, n. 4, p. 330, 1918. [Citação na pág. 43.]

ROBERTS, J. E. Ocular phototoxicity. **J. Photochem. Photobiol. B: Biology**, v. 64, p. 299, 2001. [Citação na pág. 28.]

RS AGENCIES. **RSA**. 2015. Disponível em: http://rsagencies.co.za/ lumens-for-the-laymen/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 40.]

SCHIABEL, H. Estudo sobre os índices ultravioleta no Brasil. *In*: VENTURA, L.; MASILI, M. **Bioengenharia ocular: Os óculos de sol e suas normas**. 1. ed. Ponta Grossa, PR, Brasil: Atena Editora, 2022. capítulo 5, p. 43. [Citação na pág. 28.]

SEGRÉ, G. *et al.* Efficiency of ordinary sunglasses as a protection from ultraviolet radiation. **Ophthalmic Res.**, v. 13, p. 180, 1981. [Citação na pág. 30.]

SLINEY, D. H. UV radiation ocular exposure dosimetry. J. Photochem. Photobiol. B: Biology, v. 31, p. 69, 1995. [Citação nas págs. 28, 32 e 45.]

SLINEY, D. H. Ultraviolet radiation effects upon the eye: Problems of dosimetry. Radiat. Prot. Dosimetry, v. 72, n. 3-4, p. 197, 1997. [Citação na pág. 37.]

SLINEY, D. H. Photoprotection of the eye - UV radiation and sunglasses. J. Photochem. Photobiol. B: Biology, v. 64, p. 166, 2001. [Citação na pág. 32.]

SLINEY, D. H. Intraocular and crystalline lens protection from ultraviolet damage. **Eye** & Contact Lens, v. 37, n. 4, p. 250, 2011. [Citação nas págs. 32 e 45.]

SÖDERBERG, P. G. Experimental cataract induced by ultraviolet radiation. Acta Ophthalmol. Suppl., v. 196, p. 75, 1990. [Citação na pág. 28.]

SPACE.COM. Spectacular solar flare erupts from the sun. 2012. Disponível em: https://www.space.com/15300-solar-flare-sun-eruption-photos.html. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 27.]

SPACE.COM. Sirius: The brightest star in Earth's night sky. 2022. Disponível em: https://www.space.com/21702-sirius-brightest-star.html. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação na pág. 27.]

STANLEY, P. A.; DAVIES, A. K. The effect of field of view size on steady-state pupil diameter. **Ophthalmic & Physiological Optics**, v. 15, n. 6, p. 601, 1999. [Citação na pág. 43.]

TIME. Can cheap sunglasses be bad for your eyes? 2009. Disponível em: http://healthland.time.com/2009/08/04/can-cheap-sunglasses-be-bad-for-your-eyes/. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação nas págs. 29 e 30.]

WATSON, A. B.; YELLOTT, J. I. A unified formula for light-adapted pupil size. J. Vis., v. 12, n. 10:12, p. 1, 2012. [Citação na pág. 43.]

WIKIPEDIA. **Sunglasses**. 2022. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/ Sunglasses. Acesso em: 18 de outubro de 2022. [Citação nas págs. 29 e 30.]

XIAO, H. *et al.* A dynamic sky recognition method for use in energy efficient lighting design based on CIE standard general skies. **Building and Environment**, v. 45, n. 5, p. 1319, 2010. [Citação na pág. 41.]

ZUCLICH, J. A. Ultraviolet-induced photochemical damage in ocular tissues. **Health Phys.**, v. 56, p. 671, 1989. [Citação na pág. 28.]
GLOSSÁRIO

- **Exposição Radiante** [H] é a irradiância acumulada durante um determinado intervalo tempo de exposição. Energia eletromagnética incidente acumulada por unidade de área (Q_e/A) . Algumas vezes chamada impropriamente de dose. Unidade: J/m². 23, 33, 34, 37, 38, 63, *veja* irradiância
- **Fluxo Luminoso** $[\Phi_v]$ é a energia luminosa por unidade de tempo (Q_v/t) que pode produzir estímulo visual. Também chamado de Potência Luminosa. Unidade: lm. veja energia luminosa
- Fluxo Radiante $[\Phi_e]$ é a energia radiante por unidade de tempo (Q_e/t) . Também chamado de Potência Radiante. Unidade: W. *veja* energia radiante
- Iluminância $[E_v]$ é o fluxo luminoso (ou energia luminosa por unidade de tempo) por unidade de área (Φ_v/A). Unidade: lx. 42, *veja* fluxo luminoso
- Irradiância [E] é a densidade superficial de fluxo radiante ou potência incidente por unidade de área (Φ_e/A). Não se deve usar o termo "intensidade" pois esse termo tem significados distintos em diferentes áreas como óptica, fotometria e radiometria. Unidade: W/m². 23, 37, 38, *veja* fluxo radiante
- Irradiância Espectral $[E(\lambda, \mathbf{r}, t)]$ é a irradiância por comprimento de onda (E/λ) . Irradiância monocromática. Unidade: W/m²/nm. 23, 32, 35, 38, 39, 47, *veja* irradiância
- Luminância $[L_v]$ é o brilho aparente, quão brilhante um objeto ou fonte de luz aparece ao olho humano. Unidade: cd/m². 23, 27, 30–32, 34–36, 40–46, 49, 51, 52, 56
- **Radiância** $[L_e]$ é o fluxo radiante por unidade de área por ângulo sólido. Unidade: W/m²/sr. 43, *veja* fluxo radiante
- **Squint** significa franzir os músculos da testa para aproximar as sobrancelhas e fechar parcialmente as pálpebras. 11, 13, 30, 32, 44, 56, 58, 61

ÍNDICE

Campo de visão, 11, 30, 32, 61 FOV, 23, 30, 32, 34, 43-47, 49, 52, 56 - 59Exposição radiante, 23, 33, 34, 36–38, 63 FORTRAN, 36 Gauss-Legendre Quadratura, 49 Iluminância, 42 Influxo, 23, 30, 34, 35, 46, 47, 49, 55, 56, 58, 59, 61 Irradiância, 23, 28, 31, 37, 38 espectral, 23, 32, 35, 38, 39, 47 Lagrange Interpolação, 49 Luminância, 23, 27, 30–32, 34–36, 40–46, 49, 51, 52, 56 Óculos de sol, 11, 27–30, 32–34, 36, 37, 46, 47, 49, 52, 53, 55, 56, 61, 63 escuros, 11, 28-31, 34, 35, 46, 47, 53, 56-58, 61 Pupila, 11, 30, 32, 34, 35, 43, 44, 46, 47, 49, 61 diâmetro, 31, 32, 35, 36, 43, 44, 46, 49 Pupilometria, 43 Radiância, 43 SMARTS2, 39, 40, 42, 47 Squint, 11, 13, 30, 32, 44, 56, 58, 61 Transmitância espectral, 47, 53 Ultravioleta, 11, 27