

Universidade de Brasília
Instituto de Psicologia
Departamento de Processos Psicológicos Básicos
Pós-Graduação em Ciências do Comportamento



Movimentos Oculares como Biomarcadores de Desempenho em Pilotos de Helicóptero

Adriana Manso Melchides

Brasília, novembro de 2017



Movimentos Oculares como Biomarcadores de Desempenho em Pilotos de Helicóptero

Adriana Manso Melchiades

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Wânia Cristina de Souza

Co-orientadores: Prof. Dr. Gerson Américo Janczura

Tese apresentada ao Departamento de Processos Psicológicos Básicos do Instituto de Psicologia, da Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutora em Ciências do Comportamento. Área de concentração: Cognição e Neurociência do Comportamento.

Brasília, novembro de 2017.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratory of Translational Neuroscience, State University of New York, em colaboração com o Instituto de Psicologia da Universidade de Brasília.

Banca Examinadora

Professora Dr^a Wânia Cristina de Souza - Presidente
Universidade de Brasília

Professora Dr^a Héliida Arrais Costa-Vieira - Membro Externo
Universidade de Fortaleza

Professora Dr^a Graziela Furtado Scarpelli Ferreira – Membro Externo
Centro Universitário do Instituto de Educação Superior de Brasília

Professora Dr^a Maria Angela Guimarães Feitosa – Membro Interno
Universidade de Brasília

Professor Dr. Luciano Grudtner Buratto – Membro Suplente
Universidade de Brasília

\

“I would like to beg you, dear Sir, as well as I can, to have patience with everything unresolved in your heart and to try to love the questions themselves as if they were locked rooms or books written in a very foreign language. Don’t search for the answers, which could not be given to you now, because you would not be able to live them. And the point is to live everything. Live the questions now. Perhaps then, someday far in the future, you will gradually, without even noticing it, live your way into the answer.”

(Rilke, Rainer Maria, *Letters to a Young Poet*, trans. Stephen Mitchell [Vintage, 1986], p. 34)

“By the deficits, we may know the talents, by the exceptions, we may discern the rules, by studying pathology, we may construct a model of health. And – most important – from this model may evolve the insight and tools we need to affect our own lives, mold our own destiny, change ourselves and our society in ways that, as yet, we can only imagine.”

(Laurence Miller)

Agradecimentos

À Deus, por me permitir viver tantas aventuras até aqui.

À minha mãe, pelo eterno companheirismo e torcida. Obrigada pelo incentivo, certamente contribuiu para que eu chegasse até aqui.

Ao meu esposo, pela interminável paciência e tolerância com esse projeto. Por sua causa, muitas oportunidades surgiram ao longo da construção desse projeto de vida chamado doutorado. Espero que, a partir de agora, eu também possa ser intermédio de muitas outras para você. Obrigada por ter feito parte disso tudo.

À Professora Wânia, meu mais sincero muito obrigada por cada um dos puxões de orelha. Foi por sua insistência que eu iniciei essa trajetória e, mais uma vez, consegui chegar até o fim. Sem você, muito provavelmente esse capítulo da minha vida não existiria. Obrigada por tê-lo escrito comigo, ao meu lado, sempre.

Ao Professor Gérson, meu eterno carinho e gratidão. Às vezes me pego a pensar o que um professor com toda sua lucidez e conhecimento sentem e pensam quando encontram alunos como eu. Certamente eu nunca terei coragem de perguntar, não sei se quero saber a resposta! Mas certamente quero ter a oportunidade de declarar-lhe minha profunda admiração. Obrigada por toda a paciência.

À Professora Maria Angela, não tenho palavras para expressar seu significado para mim. Lembro-me da minha graduação, também nessa universidade, onde os alunos, eu inclusive, tínhamos medo de nos matricularmos em suas turmas, pois eram as disciplinas consideradas mais difíceis, com provas “estratosféricas” de tão difíceis. Ao longo do mestrado e, agora, doutorado, tive a oportunidade de estar mais próxima e, por isso, deixar de assustar-me com suas aulas e provas, passando a admirar a forma como conduz seus alunos ao amadurecimento. Obrigada por ter-me acolhido! No meu mestrado eu disse e agora repito, se um dia conseguir ser metade do modelo que a senhora é, já serei absolutamente vitoriosa.

À minha querida Helidoca, que carinho enorme tenho por você. Lembro até hoje como fiquei triste quando você voltou para sua terra. E que falta você me fez! Tinha medo que fôssemos

perder o contato e, assim, deixar para trás uma amizade que sempre me foi tão especial. Nada disso aconteceu; não pela minha falta de habilidades sociais, mas pela sua constância! Tenho muito orgulho de tê-la na minha banca, por tê-la visto crescer como acadêmica e por ter aprendido com você. Obrigada por tudo!

Aos Professores Graziela e Luciano, obrigada pelo carinho de aceitarem dividir esse momento comigo. Estou honrada por ter duas pessoas de quem só ouço elogios me prestigiando.

Aos Professores Stephen Macknik e Susana Martinez-Conde, meu eterno agradecimento por terem aberto a porta de seus laboratórios e permitido meu ingresso. Vocês mostraram-me um mundo que eu não conseguia imaginar antes. Eu nunca tive tanta noção de quão pouco eu sei, nem tanto desejo de saber mais. Lembro-me de, ainda muito antes de iniciar o doutorado, abrir o site do laboratório de vocês apenas para me encantar com suas pesquisas. Hoje, ao fazer isso, vejo meu nome entre seus colaboradores. Palavras não expressam meu espanto e gratidão por isso. Obrigada por serem minha inspiração desde antes de os conhecer pessoalmente, apenas como “nomes nas minhas listas de referências”, até se tornarem meus orientadores.

Aos queridos amigos, Ana Paula Rolins e Fabiano Casaca, Anne Tarine e Fabrício Veloso, obrigada pela enorme paciência com a minha ausência. Fico triste ao pensar em quantas coisas eu “perdi” na vida de vocês por não ter podido estar mais próxima. Mas fico também imensamente feliz por vocês nunca terem deixado que algo se “perdesse” por completo. A presença de vocês na minha vida é uma grande alegria, meus melhores companheiros de jornada.

Às minhas queridas amigas Carla e Renata. Juntas desde o mestrado, vocês duas fizeram toda essa caminhada muito mais doce. Ver vocês duas lidando com tantas situações da vida cotidiana, aprendendo, chorando, rindo e se transformando nunca me deixou esquecer de que o mundo é real, feito por pessoas reais (e muitas vezes maravilhosas!) ao nosso redor. Obrigada por me ancorarem seguramente no porto da vida. Saber que vocês estavam por perto fez dessa viagem bem mais segura. E agora, finalmente com mais tempo livre, espero que possamos navegar muito mais pelas águas da vida, sempre juntas.

À minha querida Ana Idalina, minha colega que já era doutora desde o primeiro dia de aula, obrigada por me incluir na sua vida de forma tão delicada, mas tão inteira. Lembro-me do seu

primeiro contato, pelo Facebook. Na época, você se apresentou para mim como “minha colega de doutorado”. Eu fiquei paralisada e não soube o que responder, pois ainda não tinha conseguido terminar o mestrado e então não sabia ao certo se aquela história de ser colega de doutorado de alguém iria mesmo dar certo. Mas deu! Começamos colegas, compartilhando artigos, livros, terminamos amigas, compartilhando a vida. Obrigada pela sua indescritível eficiência em me fazer parte do seu mundo!

À querida Marta Kerr, obrigada pela presença ao longo dessa caminhada, desde dividir a “sala da Wânia” para estudar até ser companheira de corrida. Quem sabe agora, voltando a ter algum tempo, a gente não retoma o projeto das maratonas (para eu passar de 0,5 para 5 Km)!

À Valéria Canto-Pereira, muito obrigada pelo incentivo dedicado a mim em tantas conversas. Obrigada por me ajudar e encorajar a viver meus potenciais da melhor forma. Ver você trilhando seu caminho e alcançando seus alvos sempre foi inspirador.

Ao Jordi Calomé e Shwetha Phatarpekar, por terem me mostrado que o amor à ciência pode fazer parte de uma vida feliz e valiosa. A empolgação e o conhecimento de vocês me inspiram.

Aos colegas de laboratório Ivan Grebot, Roberta Lasdislau, Ricardo Pereira, Juliana Aguiar, Danielle, Maiara Maia, Marta Prestes, Luciana Andrade, meu muito obrigada por todas as aventuras vividas.

Aos meus queridos colegas de laboratório durante o estágio sanduiche, Manuel Ledo, Daniel Castrollo, Nic Brunet, Rosario Malpica, Robert Alexander, Paul Custodio, Olivya Cabalero e, especialmente, Jaime Castro. Obrigada por terem feito minha estadia no laboratório tão única. Com cada um de vocês eu dividi momentos especiais que jamais serão esquecidos. E a você, Jaime, meu especial obrigada por ter me mostrado que o mundo da matemática e estatística é muito mais difícil do que eu imaginava! Como eu já disse antes, você é um gênio!

À CAPES pelo suporte financeiro

Índice

Banca Examinadora	iii
Epígrafe	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvi
Apresentação	17
Capítulo 01: Estrutura Visual Anatômica e Funcional	20
<i>Anatomia e Fisiologia do Olho</i>	20
<i>A Retina e a Transmissão da Informação Visual</i>	22
<i>O Núcleo Geniculado Lateral e o Córtex Estriado</i>	26
Capítulo 02: Movimentos Oculares	29
<i>Sacadas</i>	31
Neurofisiologia do Movimento Sacádico	33
Características e Modelos do Sistema Sacádico	35
<i>Fixações ou Movimentos Fixionais</i>	39
Tremor.....	40
Microsacadas.....	41
Drifts Oculares	43
<i>Trajatória e Rastreamento Visuais</i>	44
Tipo de Processamento Durante o Rastreamento Visual	47
<i>Eye Tracker</i>	48
Tipos de Eye Tracker	48
Medidas Aferidas pelo Eye Tracker	50
Capítulo 03: Atenção	54
<i>Atenção Visual</i>	54
Modelos atencionais baseados no espaço.	61
Modelos atencionais voltados para o objeto.	63
<i>Movimentos Oculares e Atenção Visual</i>	64
Capítulo 04: Fadiga	67
<i>Fadiga Cognitiva</i>	70
Fadiga cognitiva após um longo período de tempo.	71
<i>Medidas para a fadiga cognitiva</i>	72
<i>Pilotos, fadiga e movimentos oculares</i>	73

Impacto da fadiga sobre o processamento top-down.....	81
Capítulo 05: Expertise	84
<i>Expertise perceptual e cognitiva</i>	<i>86</i>
Expertise visual.....	88
Experimento 1	91
<i>Objetivos</i>	<i>91</i>
Objetivo Geral.....	91
Objetivos específicos.....	91
<i>Delineamento Experimental e Hipóteses.....</i>	<i>92</i>
Delineamento Experimental.....	92
Variáveis Independentes e Dependentes.....	93
Hipótese teórica.....	94
<i>Método</i>	<i>97</i>
Participantes.....	97
Instrumentos.....	98
Materiais e Equipamento.....	99
Procedimento.....	102
Análise dos dados.....	104
<i>Resultados</i>	<i>111</i>
Qualidade dos movimentos oculares.....	111
Correlações entre as variáveis.....	112
Sequência Principal.....	115
Relação entre expertise, tipo de voo e os movimentos oculares.....	116
AOIs e movimentos oculares.....	132
Entropia.....	136
Desenvolvimento de um classificador.....	137
Qualidade das fixações.....	139
<i>Discussão</i>	<i>142</i>
Experimento 02	150
<i>Objetivos</i>	<i>150</i>
Objetivo Geral.....	150
Objetivos específicos.....	150
<i>Delineamento Experimental e Hipóteses.....</i>	<i>151</i>
Delineamento Experimental.....	151
Variáveis Independentes e Dependentes.....	151
Hipótese Teórica.....	152
<i>Método</i>	<i>155</i>
Participantes.....	155
Instrumentos.....	156
Materiais e Equipamento.....	156
Procedimento.....	156
Análise de Dados.....	158

<i>Resultados</i>	158
<i>Comparação antes e depois do vídeo instrutivo</i>	158
<i>Treino e uso do classificador</i>	161
<i>Discussão</i>	166
Discussão Geral	171
<i>Principais achados</i>	171
<i>Implicações teóricas</i>	172
<i>Implicações clínicas e aplicadas</i>	173
<i>Limitações</i>	174
<i>Direções futuras</i>	174
Referências	176
Anexos	193
<i>Anexo A – Folha de Registro</i>	194
<i>Anexo B – Consentimento Informado</i>	195
<i>Anexo C – Aprovação do Estudo pelo Comitê de Ética Responsável</i>	198
<i>Anexo D – Autorização de uso dos dados pelo laboratório de origem</i>	200

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração dos músculos óculo-motores	21
Figura 2: Estrutura celular da retina	22
Figura 3: Densidade de fotoreceptores na retina	23
Figura 4: Modelo de campo receptivo ON-OFF	25
Figura 5: Camadas e posição anatômica do Núcleo Geniculado Lateral	26
Figura 6: Organização do córtex estriado	27
Figura 7: Controle neurofisiológico das sacadas	32
Figura 8: Representação de uma trajetória visual.....	46
Figura 9: Ângulo Visual.....	47
Figura 10: Possíveis análises visuais.....	53
Figura 11: Experimento clássico de Yarbus.....	59
Figura 12: Procedimento realizado no experimento origem	76
Figura 13: Efeito do tempo de voo simulado sobre a sequência principal.....	77
Figura 14: Relação entre o neurônio omnipausa e os movimentos oculares	79
Figura 15: Efeito da complexidade da tarefa sobre o EEG	80
Figura 16: Simulador de helicóptero do tipo AH-1W Super Cobra	100
Figura 17: SMI Eyetracking Glasses	101
Figura 18: Sequência de execução do experimento 1.	104
Figura 19: Diagrama de representação da K-Fold Cross Validation	109
Figura 20: Sequência de escolha e treinamento dos classificadores.....	110
Figura 21: Análise algorítmica para identificação de movimentos oculares.....	112
Figura 22: Comparação das sequências principais entre grupos e tipos de voo.	115
Figura 23: Variação da latência de sacadas conforme expertise.....	116
Figura 24: Variação do número de fixações conforme expertise durante o PE.....	118
Figura 25: Variação da duração total das fixações realizadas conforme expertise no PE	118
Figura 26: Variação da dispersão de fixações entre experts e novatos durante o PE.	119
Figura 27: Dispersão do olhar de experts sobre o cockpit	120
Figura 28: Dispersão do olhar de novatos sobre o cockpit	121
Figura 29: Variação do número de sacadas conforme expertise durante o PE.	122
Figura 30: Variação da taxa de Sacadas conforme expertise durante o PE.....	122
Figura 31: Variação da duração total das Sacadas conforme expertise durante o PE.	123
Figura 32: Variação da duração total das Sacadas conforme expertise durante o PE.	123
Figura 33: Variação do número de piscadas conforme expertise durante o VRI 2.	124
Figura 34: Duração média das fixações conforme tipo de voo	125
Figura 35: Dispersão das fixações conforme tipo de voo.....	125
Figura 36: Duração das sacadas conforme tipo de voo	126
Figura 37: Comprimento da trajetória visual conforme tipo de voo	127
Figura 38: Relações significativas após o teste de Bonferroni	128

Figura 39: Representação dimensional das regiões utilizadas para análise de entropia.....	128
Figura 40: Heatmap da probabilidade de distribuição de fixações dos participantes	129
Figura 41: Comparação entre grupos da sequência de acesso às regiões	130
Figura 42: Comparação entre grupos das revisitas às regiões	130
Figura 43: Comparação entre grupos do tempo médio de permanência nas regiões.....	131
Figura 44: Distribuição de AOIs sobre o cockpit do helicóptero.....	132
Figura 45: Comparação do tempo de permanência em AOIs entre experts e novatos.....	133
Figura 46: Variação de fixações no Triple Tarch conforme expertise durante o PE.....	135
Figura 47: Variação de revisitas ao Turn Indicator conforme expertise durante o PE.....	135
Figura 48: Variação de revisitas à Janela Esquerda conforme expertise durante o PE.....	136
Figura 49: Comparação dos classificadores treinados.....	138
Figura 50: Erros não intencionais realizados por participantes.....	140
Figura 51: Distribuição das fixações dos participantes conforme sua precisão.	141
Figura 52: Sequência de execução do experimento 2.	157
Figura 53: Desempenho dos pilotos antes e depois do vídeo.....	161
Figura 54: Classificadores treinados com os dados coletados no Experimento 2	163
Figura 55: Segundo treino de classificadores no Experimento 2.....	165

Lista de Tabelas

Tabela 1: Taxonomia dos movimentos oculomotores e seus parâmetros.	30
Tabela 2: Relação das variáveis dependentes e independentes do experimento 1.....	93
Tabela 3: Softwares utilizados para compor a análise do projeto.....	105
Tabela 4: Correlações de Pearson entre algumas das variáveis do estudo.	114
Tabela 5: Entropia da cena visual conforme tipo de voo e expertise.	137
Tabela 6: Relação das variáveis dependentes e independentes do experimento 2.....	152

Lista de Siglas e Abreviaturas

AFF: Área Fusiforme da Face
ANOVA: Análise da Variância
AOI: Área de Interesse (do inglês: Area of Interest)
CS: Colículo Superior
CVF: Campo Visual Frontal
DP: Desvio Padrão
EEG: Eletroencefalograma
EOG: Eletro-oculografia
EP: Erro Padrão
FPS: Frames per second
FR: Formação Reticular
FRPP: Formação Reticular Pontina Paramediana
GAV: Grau de Ângulo Visual
HDR: High Dynamic Range (Alto Alcance Dinâmico)
Hz: Hertz
IRMf: Imagem por Ressonância Magnética Funcional
JTP: Junção Temporo-Parietal
KNN: K-Nearest Neighbors
LDA: Linear Discriminant Analysis
LED: Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
m: minutos
M: Média
ms: milissegundos
NASA: National Aeronautics and Space Administration
NGL: Núcleo Geniculado Lateral
NOP: Neurônio Omnipausa
NTBS: National Transportation Safety Board
PE: Procedimento de Emergência
PEv: Potencial Evocado
POG: Photo-oculografia
%: Porcentagem
px: pixel
RVO: Reflexo Vestíbulo-Ocular
s: segundos
SFC: Síndrome da Fadiga Crônica
SVM: Support Vector Machines

USMC: United States Marine Corps
TIC: Teoria da Integração de Características
TC: Tronco Cerebral
V1: Área Visual V1
VD: Variável Dependente
VI: Variável Independente
VOG: Vídeo-oculografia
VRI 1: Voo por Regras Instrumentais 1
VRI 2: Voo por Regras Instrumentais 2
VRV: Voo por Regras Visuais

Resumo

Movimentos oculares têm sido utilizados como parâmetros do processamento cognitivo em diversas pesquisas ao longo das últimas décadas. Sua relação com o foco atencional e até com indicadores de processos relacionados ao julgamento e tomada de decisões está estabelecido. Recentemente, a fadiga cognitiva tem sido descrita como uma variável também relacionada ao processamento de informações, indicando a capacidade de um indivíduo manter-se em uma determinada tarefa. Neste trabalho, investigou-se como os movimentos oculares podem ser utilizados como biomarcadores para fadiga cognitiva, atenção e expertise.

Participaram do estudo 46 pilotos de helicóptero dos *United States Marine Corps*, os quais tiveram seus movimentos oculares medidos durante um voo em um simulador. O tipo de voo, o nível de experiência do piloto e o tipo de treinamento foram as variáveis independentes. Já as variáveis dependentes basearam-se em parâmetros relacionados a movimentos oculares como fixação, sacada e piscadas. Os resultados apontam para a diferença entre o processamento de informações por parte de experts e novatos, assim como, contrariamente ao que se costuma esperar, indicam que tarefas simples ou repetitivas podem induzir a fadiga cognitiva. Análises de *machine learning* indicaram, ainda, a possibilidade de movimentos oculares serem utilizados para o desenvolvimento de expertise em novos pilotos.

Palavras-chave: fadiga cognitiva; expertise, *eye tracking*; biomarcador; *machine learning*.

Abstract

Eye movements have been used as parameters of cognitive processing in several researches over the last decades. Its relationship with attentional focus and even with indicators of processes related to judgment and decision making is established. Recently, cognitive fatigue has been described as a variable also related to information processing, indicating the ability of an individual to maintain a given task. In this work, we investigated how ocular movements can be used as biomarkers for cognitive fatigue, attention and expertise. Participating in the study were 46 United States Marine Corps helicopter pilots, who had their eye movements measured during a flight simulator. The type of flight, level of pilot experience and type of training were the independent variables. The dependent variables were based on parameters related to ocular movements such as fixation, saccades and blinking. The results point to the difference between the information processing by experts and novices, as well as, contrary to what is usually expected, indicate that simple or repetitive tasks can induce cognitive fatigue. Machine learning analysis also indicated the possibility of eye movements being used to develop expertise in novice pilots.

Key-words: cognitive fatigue; expertise, eye tracking; biomarker; machine learning.

Apresentação

A ideia inicial para este projeto partiu de uma série de pesquisas prévias realizadas por Leandro DiStasi, Stephen L. Macknik e Susana Martinez-Conde e seus colaboradores (Di Stasi, Diaz-Piedra, et al., 2015; Di Stasi, McCamy, et al., 2015; Di Stasi, McCamy, et al., 2016; Macknik et al., 2013). Investigando participantes em atividades que demandam alta atenção, tais autores observaram estreita relação entre a fadiga, o declínio no desempenho atencional e os movimentos oculares. A partir de então, surgiu a necessidade de investigar melhor tais variáveis, de modo a compreender o que são, a sua relação e, em especial, como se associam com a concomitante atividade cerebral desempenhada individualmente.

Em um estudo anterior com pilotos americanos (Di Stasi, McCamy, et al., 2016), observou-se que os movimentos oculares podem, potencialmente, ser biomarcadores para a fadiga. Entretanto, chamou a atenção dos autores do estudo o porquê de pilotos jovens, bem treinados, saudáveis e com o sono regulado estarem demonstrando fadiga com apenas uma hora de voo em um simulador. Em outras palavras, talvez a fadiga que tenha causado a alteração dos movimentos oculares no estudo de Di Stasi, McCamy, et al. (2016) não tenha sido simplesmente física, mas sim cognitiva. Sendo verdade, isso significaria que a simples fadiga cognitiva, a qual se relaciona ao processamento da atenção, pode impactar os movimentos oculares e gerar importantes pistas sobre como o cérebro processa e faz uso de toda a informação que está ao seu redor. No estudo de Di Stasi, McCamy, et al. (2016) o tempo de duração da tarefa produziu alterações em parâmetros importantes relacionados aos movimentos oculares, como a ‘sequência principal’ (do inglês: *main sequence*, tradução própria). Entretanto, era necessário um estudo que controlasse melhor o tipo de fadiga e a resposta dos movimentos oculares relacionada a essa. Por exemplo, tarefas que demandam mais ou menos atenção e, portanto, têm potencial para causar

mais ou menos fadiga cognitiva, também provocam mudanças da velocidade das sacadas (o que por sua vez geraria uma mudança da sequência principal)?

Para responder aos desdobramentos vindos do estudo de Di Stasi, McCamy, et al. (2016), desenvolveu-se o projeto de pesquisa que é agora apresentado nesta tese. Uma pesquisa inédita com pilotos americanos, onde uma tarefa com diferentes níveis de complexidade foi manipulada para investigar se a fadiga cognitiva é de fato uma variável que influencia o desempenho desses pilotos. Ademais, aqui se aprimora, também, o estudo da expertise, a qual pode estar relacionada à aptidão de cada piloto em lidar com a fadiga cognitiva. O presente estudo investiga o papel dos movimentos oculares como indicadores naturais (biomarcadores) de processos cerebrais encobertos, como a atenção. Partindo-se do pressuposto de que os movimentos oculares podem ser considerados biomarcadores, este estudo investiga também sua potencial utilidade para o treinamento de novos pilotos. Para alcançar estes últimos desdobramentos, este projeto utiliza-se de análises computacionais ancoradas nas propostas de *machine learning* para, por meio de um algoritmo de classificação, diferenciar e categorizar o padrão de movimentos oculares realizados pelos participantes. Para este estudo, o treinamento dos classificadores foi feito pela extensão Scikit-learn, encontrada no Python.

Oferecendo suporte teórico ao projeto, apresenta-se brevemente a anatomia e a fisiologia oculares, no capítulo um; bem como os movimentos oculares, suas classificações e características, no capítulo dois. Os capítulos três e quatro introduzem os conceitos de atenção, atenção espacial, fadiga, fadiga cognitiva e o impacto dessas variáveis nos movimentos oculares conforme o registro de pesquisas já realizadas até o momento. Por fim, o capítulo cinco aborda o conceito de expertise e sua aplicabilidade ao estudo dos movimentos oculares. Em seguida, são apresentados os dois experimentos que compuseram o estudo, cada um detalhado em objetivos,

delineamento experimental, método, resultados e discussão. Em seguida, acham-se as considerações éticas do estudo e, finalmente, discussão geral, a qual desdobra-se em tópicos como suas indicações de uso, aplicabilidade, limitações e direções para futuras pesquisas.

Capítulo 01: Estrutura Visual Anatômica e Funcional

Anatomia e Fisiologia do Olho

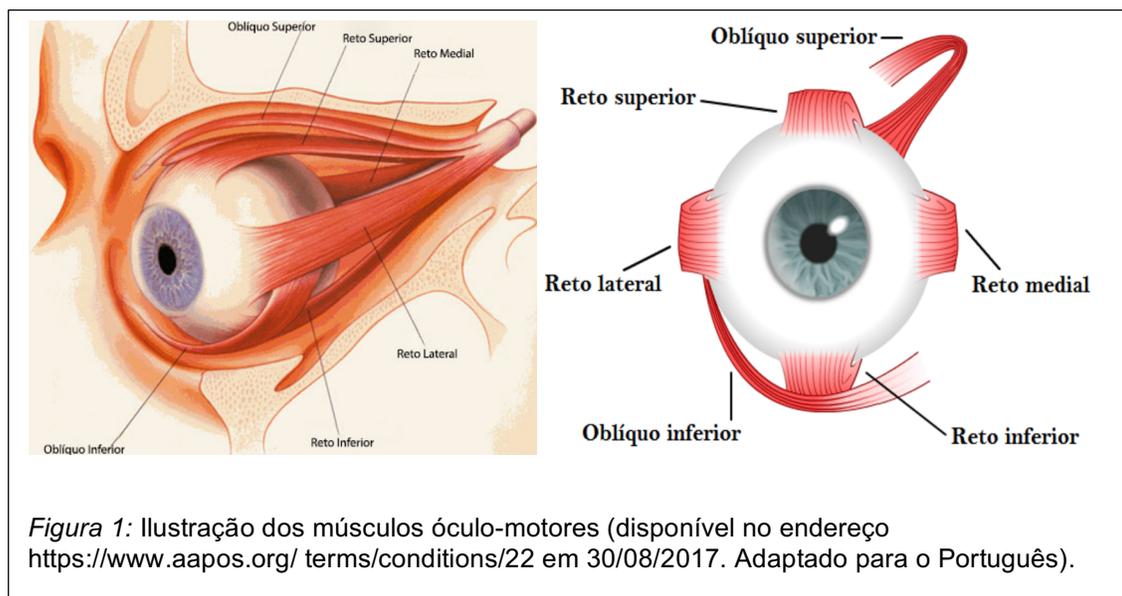
Os olhos são os órgãos sensoriais especializados na detecção, localização e análise dos componentes luminosos (Bear, Connors, & Paradiso, 2008). Sua estrutura anatômica aparentemente simples encobre um complexo sistema de transmissão nervosa, que habilita os seres vivos a entrarem em contato com o ambiente que os cerca.

A pupila é a estrutura que permite a entrada da luz até a retina. A íris, mais popularmente conhecida por conter a pigmentação que dá cor ao olho, está ligada a dois pequenos músculos ciliares capazes de contrair ou permitir a dilatação da pupila. Tanto íris quanto pupila são cobertas pela córnea, que juntamente com a esclera, ou “porção branca do olho”, formam o globo ocular (Bear et al., 2008; Carlson, 2002).

Ao todo, seis músculos oculares auxiliam na movimentação dos olhos, aumentando o alcance e a velocidade de visualização. São eles: oblíquo superior, oblíquo inferior, reto superior, reto lateral, reto medial e reto inferior, conforme ilustrado na Figura 1 (Bear et al., 2008; Carlson, 2002).

Esses seis músculos extraoculares estão organizados em três pares antagonistas em cada olho, permitindo a rotação em qualquer dos eixos das três dimensões (Liversedge, Gilchrist, & Everling, 2011). Os músculos reto lateral e reto medial são responsáveis pelos movimentos horizontais dos olhos, levando-os para direita ou esquerda. Já os retos superior e inferior realizam movimentos em relação ao eixo vertical, movendo os olhos para cima ou para baixo. Por fim, os oblíquos superior e inferior possibilitam aos olhos movimentos em diagonal e movimentos rotacionais (Carlson, 2002; Liversedge et al., 2011).

Três nervos cranianos responsabilizam-se pela neurofisiologia ocular: oculomotor, troclear e abducente (Bear et al., 2008; Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum, & Hudspeth, 2013; Milner & Goodale, 2006; Purves et al., 2012). A frequência com que os neurônios motores oculares disparam é diretamente proporcional à posição e à velocidade que os movimentos oculares irão atingir. É importante observar que dos 12 pares de nervos cranianos, três são destinados ao controle dos movimentos oculares. Tamanha proporção revela a crucial importância destes movimentos para a vida humana. A neurofisiologia dos movimentos oculares especificamente será mais profundamente abordada no capítulo dois desta tese.



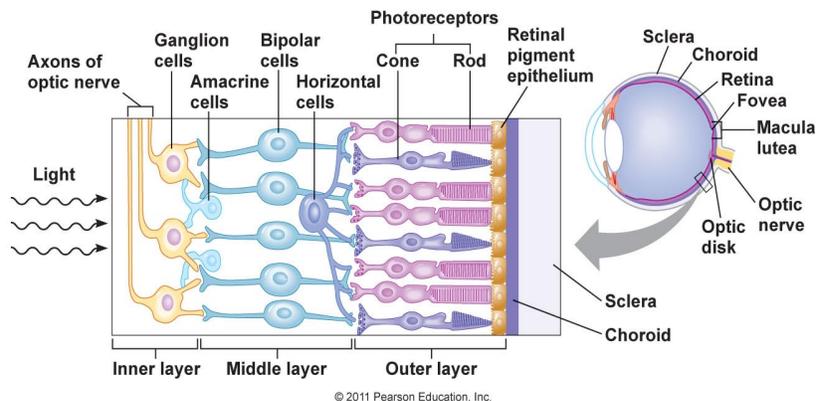
Uma vez tendo alcançado a pupila, os raios luminosos são refratados pela córnea até a retina. Uma vez lá, o conjunto de informações visuais é distribuído conforme o tipo de fotorreceptor e o tipo de condução que realizam. Por fim, o nervo óptico, reunindo os axônios da retina, encaminha o produto final desse processamento visual inicial até o encéfalo, especificamente ao córtex occipital (Bear et al., 2008; Kandel et al., 2013; Martinez-Conde & Macknik, 2014; Purves et al., 2012).

A Retina e a Transmissão da Informação Visual

Aproximadamente no centro de cada retina há uma região amarelada, chamada de mácula lútea (do latim, “mancha amarelada”), responsável pela visão central (em oposição ao que se chama visão periférica). Nesta região encontra-se a fóvea, com cerca de dois milímetros de diâmetro, a principal estrutura de onde partem as informações visuais para o restante do processamento encefálico (Bear et al., 2008; Carlson, 2002).

É sobre a estrutura laminar da retina que a energia luminosa será transduzida para sinais neurais, encaminhados então para a estrutura cerebral. A passagem do estímulo visual inicia-se na camada de fotorreceptores (cones e bastonetes), seguindo para uma camada de células bipolares e, finalmente, chegando à camada de células ganglionares, a partir de onde segue para os neurônios occipitais (Figura 2). Há ainda duas camadas de neurônios inibitórios (células horizontais e amácrinas), os quais são fundamentais para que a informação visual seja propagada adequadamente. A diferença anatômica entre cones e bastonetes reflete também diferenças funcionais. Enquanto os primeiros são fundamentais na identificação de cores, em condições escotópicas (ou de menor iluminação) são os bastonetes que contribuem para a visão (Kandel et al., 2013; Milner & Goodale, 2006; Snowden, Thopson, & Troscianko, 2012).

Figura 2: Estrutura celular da retina (disponível no endereço <https://biology.stackexchange.com/questions/30222/retina-transplant-difficulties> em 09/10/2017).



Capítulo 02: Movimentos Oculares

Estudos recentes sobre movimentos oculares, os quais estão citados na próxima página, têm previsto que estes podem ser qualificados conforme diferentes critérios, como exemplificado na Tabela 1 apresentada na página a seguir.

Em todos os primatas, a acuidade visual é intensificada na região da fóvea devido a alta concentração de fotorreceptores, tendendo a cair nas regiões periféricas da retina. Dessa forma, todo o sistema oculomotor funciona com o objetivo principal de controlar as projeções sobre a fóvea em ambos os olhos, permitindo que todo o ambiente visual seja acessado adequadamente (Kandel et al., 2013). Ou seja, a tarefa principal dos movimentos oculares é alinhar informações visuais de potencial interesse à fóvea (Milner & Goodale, 2006).

São cinco as principais classes de movimentos oculares: *smooth pursuits*, reflexos oculares, vergência, sacadas e movimentos fixionais. Dados os objetivos deste trabalho, considera-se de prioritária importância o esclarecimento dos dois últimos. Quanto aos primeiros, basta saber que os *smooth pursuits* são movimentos pequenos, lentos e voluntários que permitem a permanência do rastreamento e do contato visual entre os olhos de objetos em movimento. Os reflexos oculares (reflexo óculo-vestibular e reflexo optocinético), diretamente relacionados ao sistema vestibular, compensam e equilibram o movimento dos olhos em relação aos movimentos de corpo e cabeça. Já os movimentos de vergência são adaptações do olhar que reposiciona objetos que se encontram a diferentes distâncias ou um mesmo objeto que muda de distância em relação à fóvea do observador (Liversedge et al., 2011; Werner & Chalupa, 2014).

Tabela 1: Taxonomia dos movimentos oculomotores e seus parâmetros.

Tipo	Nome	Definição	Latência (ms)	Amplitude (GAV)	Velocidade (grau/s)	Frequência (Hz)	Duração (ms)
Deslocamento	Sacada	Rápido, reposicionamento da fóvea	100 a 1000	1 a 50 (< 15, em geral)	400-800		10 a 100
	<i>Smooth Pursuit</i>	Lento, contínuo, acompanhamento de um alvo visual	~80 a 120		10 a 30		
	Vergência	Localização do alvo em relação a profundidade	160 a 200	5	30-150		
Estacionário (Nistagmo)	Vestibulo-Ocular (RVO)	Rotação e translação da cabeça e/ou do corpo	15 a 75		Segue a cabeça por até 800°/s	0,5 a 5	
	Optocinético	Velocidade ou direção da movimentação de todo o campo visual	60		Suplementa o RVO em baixa frequência		
Fixional	Tremor	Pouco se conhece sobre sua função.		0,01	50 a 100	60 a 150	
	Microsacadas	Similares a sacadas, menor extensão.		< 1°	8 a 300	0,2 a ~2,5	~6
	<i>Drift</i>	Curvos e lentos, compensatórios		0,01 a 1	< 2		200 a 1000

Nota: Tabela organizada pela própria autora com bases nos parâmetros indicados pela literatura (Duchowski, 2017; Holmqvist et al., 2011; Kagan & Hafed, 2013; Kowler, 2011; Kowler & Collewijn, 2010; Le Meur & Liu, 2015; Leigh & Zee, 2015; Martinez-Conde, Otero-Millan, & Macknik, 2013; Martinez-Conde, Macknik, Troncoso, & Dyar, 2006; Martinez-Conde, Macknik, Troncoso, & Hubel, 2009; Munoz, Dorris, Pare, & Everling, 2000; Rolfs, 2009; Rolfs, Kliegl, & Engbert, 2008; Spering & Carrasco, 2015; Werner & Chalupa, 2014)¹

¹ A Tabela 1 foi elaborada a partir dos valores mais representativos e frequentes dos movimentos oculares referenciados pela literatura indicada. Buscou-se aqui representar os valores de cada movimento sem considerar tarefas específicas. Porém, há de se ressaltar que esses valores podem encontrar-se bastantes alterados em tarefas que envolvam cenas visuais específicas, alvos visuais específicos ou tarefas cognitivas, por exemplo. Alguns parâmetros foram riscados na tabela por não terem sido encontradas medidas referentes a eles na literatura.

Sacadas

Sacadas são movimentos oculares rápidos e balísticos, que reposicionam a fóvea em relação à cena visual a uma velocidade extremamente rápida de movimento, chegando a 400%/segundo em uma sacada de 15°. É importante compreender que os movimentos sacádicos apresentam um caráter espacial e temporal. Assim, os olhos, inicialmente estáveis, aceleram rapidamente até um pico de velocidade, percorrendo determinada excentricidade, e, então, desaceleram até retornar à estabilidade. Existe um período de latência para que se inicie uma sacada, o qual pode variar de 100 ms a 1000 ms, a depender da natureza da resposta exigida pelo estímulo visualizado (Otero-Millan, Troncoso, Macknik, Serrano-Pedraza, & Martinez-Conde, 2008; Rolfs, Knapen, & Cavanagh, 2010; Werner & Chalupa, 2014).

Em geral, durante as sacadas, novas informações não são adquiridas pelo cérebro. Ou seja, a função principal da sacada constitui-se apenas no reposicionamento da retina e, conseqüentemente, da fóvea em relação ao estímulo visual (Burr & Morrone, 2005). Tal característica, conhecida como supressão sacádica, possibilita uma percepção clara e estável do ambiente ao redor, ao inibir movimentos da retina em decorrência de movimentos oculares (Werner & Chalupa, 2014). A supressão sacádica é um mecanismo complexo e detalhado, onde o processamento de alguns estímulos é suprimido pelas sacadas, enquanto de outros não. Estímulos de baixa frequência espacial são dificilmente detectados, enquanto os de alta frequência permanecem visíveis (Melcher & Morrone, 2007; Morrone, Ross, & Burr, 2005; Werner & Chalupa, 2014).

Os movimentos sacádicos são geralmente conjugados em ambos os olhos, o que significa que eles têm magnitudes e direções similares. Em seres humanos, são esperadas por volta de duas a quatro sacadas por segundo, em média, durante a visualização livre de uma cena.

Capítulo 03: Atenção

Atenção é um processo seletivo, necessário devido à limitação humana em processar a quantidade de informações ao seu redor. Esses limites são basicamente impostos pela quantidade de energia disponível para o cérebro em comparação com o alto-custo da atividade neuronal relacionada à computação de novos dados (Carrasco, 2011; Fawcett, Risko, & Kingstone, 2015; Gazzaniga, Ivry, & Mangun, 2013).

A atenção é a chave do dinâmico comportamento humano. Ela permite o processamento de toda a torrente de informações externas ao próprio corpo, de forma que seja possível focar-se naquelas que são relevantes para se atingirem determinados objetivos, enquanto informações irrelevantes são potencialmente ignoradas (Fawcett et al., 2015).

Pesquisas na área da atenção são de amplo interesse para áreas como a biologia, a psicologia, a neurologia e as neurociências cognitivas modernas. Há, atualmente, diversas áreas de estudo relacionadas com a atenção, como atenção auditiva, consciência e tomada de decisão e até mesmo aspectos clínicos, como o déficit atencional. Para fins deste trabalho, focou-se em aspectos da atenção visuoespacial.

Atenção Visual

Conforme já explicava William James (1890/1981):

“Todos sabem o que atenção é. É o apoderar-se da mente, de forma clara e vívida, de um dentre o que parecem ser diversos objetos simultâneos ou trilhas de pensamento. Foco, concentração, consciência são a sua essência. Ela implica desistir de algumas coisas com o objetivo de lidar efetivamente com outras.

Uma vez que essas coisas são apreendidas pelos sentidos, o número delas que podem ser visitadas de uma só vez é pequeno, *‘Pluribus intentus, minor est ad singula sensus’ – Muitos filtrados em poucos para a percepção*”. (James, 1890/1981 – tradução própria).

Sendo a capacidade de processamento do ser humano limitada, o processamento dos sentidos funciona de modo a selecionar componentes específicos, tornando perceptíveis aqueles que, por algum motivo, relacionam-se com o determinado objetivo de ação em certo momento. Isto é particularmente verdadeiro para o sentido da visão. O funcionamento do sistema visual é tal que todas as pequenas informações que temos a respeito do ambiente são integradas em uma grande e coerente cena visual, a qual representa o “todo” ao nosso redor (Duchowski, 2017; Holmqvist et al., 2011).

O esforço para se definir atenção visual começou ainda no século XIX, com Hermann Von Helmholtz credenciando-a como essencial para a percepção visual. Em seu livro *Tratado de Fisiologia Óptica*, ele escreve: “nossos olhos vagam continuamente sobre o campo visual, pois esta é a única forma de vermos tão distintamente quanto possível todas as partes individuais em turnos” (Helmholtz, 1867/1925). Já nessa época, Von Helmholtz havia notado que atenção se referia a pequenas regiões espaciais. Entretanto, acreditava tratar-se de algo controlado por um esforço voluntário, o qual permite a tomada de consciência em relação a objetos na periferia sem a necessidade de que movimentos oculares em direção a esses objetos sejam efetuados. O principal entendimento de sua teoria em relação a atenção visual é de que os movimentos oculares seriam alocados em localizações espaciais específicas, o “onde” da atenção visual. Ou seja, apesar de a atenção poder ser alocada em regiões periféricas, em geral ela

funcionaria em regiões mais centralizadas, sendo que os movimentos oculares são um reflexo da mesma (Duchowski, 2017).

Em contraposição ao posicionamento de Von Helmholtz, William James entendia atenção visual como um mecanismo interno relacionado à imaginação e à antecipação (Duchowski, 2017). Em outras palavras, James (1890/1981) associava o significado de atenção ao objeto em cujo significado, identidade ou expectativa estava focada a atenção. James não negou os aspectos voluntários da atenção, embora afirmasse também contar com ingredientes passivos, reflexivos, não voluntários e não relacionados ao esforço humano.

Mais recentemente, estudiosos das neurociências cognitivas reconhecem os esforços tanto de Von Helmholtz quanto de James como tendo sido válidos e influentes na construção do conhecimento em sua época. O “quê” (*what*) de James e o “onde” (*where*) de Von Helmholtz corresponderam a aspectos foveais e parafoveais da atenção visual, respectivamente. Tal dicotomia influenciou grandemente uma explicação sobre a atenção visual baseada nos estímulos, ou seja, no processamento *bottom-up*. Reunindo o entendimento de James e Helmholtz, tem-se que objetos começariam a ser identificados parafovealmente e, sempre que necessários mais detalhes, direcionados para a fóvea, onde o “quê” (*what*) seria melhor definido (Duchowski, 2017; James, 1890/1981).

Apenas em 1941, Gibson trouxe à tona uma nova proposta, inserindo um terceiro elemento na atenção visual relacionado a intenção, o qual explicaria quando e como alguém reagiria a um estímulo ao qual prestou atenção (Gibson, 1941). Sua proposta foi bastante inovadora na medida em que inicia a inserção de um sistema responsável pelo agir (o qual futuramente seria melhor definido como o sistema frontal) diferenciado do sistema visual. Segundo a explicação de Gibson (1941), o componente intencional da atenção permitiria que um

Capítulo 04: Fadiga

Fadiga é um sintoma não específico, uma vez que pode ser o indicativo de muitas causas ou condições, incluindo estados fisiológicos, como privação de sono, atividade muscular excessiva ou condições médicas inflamatórias, virais ou mesmo autoimunes (DeLuca, 2005). Enquanto alguns autores (DeLuca, Genova, Hillary, & Wylie, 2008; Dobryakova, DeLuca, Genova, & Wylie, 2013; Lorist, Boksem, & Ridderinkhof, 2005) defendem o fenômeno da fadiga como sendo de base fisiológica, podendo ser explícita e objetivamente qualificado, outros autores preferem abordar a fadiga como uma sensação subjetiva que é auto relatada por aqueles que a têm. Nesse sentido, fadiga seria equivalente a “cansaço”, “sensação de cansaço”, “sensação de fadiga”, “sensação de fraqueza” ou “falta de energia” (Cope, 1992; DeLuca, 2005).

Apesar de um grande avanço em relação a medida fisiológica da fadiga, como exames de eletrofisiologia, quase nenhum progresso foi alcançado quanto às medidas subjetivas da mesma. Indício disso é a retirada dessa nomenclatura dos manuais diagnósticos (DeLuca, 2005). Atualmente, já se sabe que a fadiga provavelmente tem origem central e, não surpreendentemente, pacientes com relato de fadiga apresentam também relatos de maior esforço e limitações cognitivas (DeLuca, 2005).

Falando um pouco da histórica relação entre fadiga e aviação, Charles Lindberg, em 1920, foi um dos primeiros pilotos a reconhecer as implicações de atividades extremamente prolongadas sobre sua performance em voo. Em 1930 começou-se a falar sobre o efeito dos múltiplos fusos horários sobre o desempenho de aviadores. Desde então, um esforço coletivo surgiu na direção de estabelecer algumas orientações e regras que garantissem a segurança de todos os envolvidos. Entretanto, apesar do surgimento dessas regras, o esforço para, de fato, implementá-las ou ajustar limites para os tempos de voo, foram efetivamente mínimos.

Ao longo das últimas décadas, muito se investiu em pesquisas que contribuíram para o melhor entendimento da fadiga, suas causas e processos relacionados. No entanto, a assimilação do conhecimento produzido manteve-se inadequada (Dinges, Graeber, Rosekind, Samel, & Wegmann, 1996). Logicamente, essa inadequação demonstrou consequências negativas, como o aumento da incidência de problemas relacionados à fadiga dos pilotos e à segurança na aviação. Isso foi evidenciado por relatórios oficiais, estatísticas de acidentes, além da indicação de que a fadiga tem sido uma preocupação crescente entre aqueles envolvidos no campo da aviação. Uma dessas indicações, por exemplo, foi a pesquisa conduzida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), aplicada a pessoas pertencentes a uma tripulação, a qual apontou que 80% deles admitem já ter cochilado, ainda que não intencionalmente, durante alguma parte do voo (Rosekind, Gregory, Miller, & Dinges, 2000). Entre militares, a fadiga durante voos também tem sido relatada como um problema. Pilotos da Força Aérea Americana relataram a fadiga como sendo um problema operacional para suas atividades tanto quanto seus pares civis, sendo que possíveis causas para isso seriam privação de sono, questões relacionadas a suas escalas (Caldwell & Gilreath, 2001; Miller & Melfi, 2006), operações ininterruptas agendadas constantemente, duração dos voos, curtos períodos para descanso e recuperação e muitos dias consecutivos como parte de seu treinamento constante (Neville, Bisson, French, Boll, & Storm, 1994).

Mais recentemente, entre 1974 e 1992, a fadiga foi admitida como um fator potencialmente relacionado a 25% dos acidentes ocorridos durante a noite. Ainda mais recentemente, o Centro de Segurança do Exército dos Estados Unidos sugeriu que pelo menos 40% de todos os contratempos ocorridos entre 1990 e 1999 foram relacionados à fadiga (Tracey & Flower, 2014).

A presença da fadiga como um dos fatores que contribuem para acidentes, perdas e contratempos já está bem estabelecida. Entretanto, ainda precisa-se definir especificamente que tipo de erros cognitivos causados pela fadiga estão resultando nesses contratempos (Caldwell, 2005; Shappell & Wiegmann, 2000). Um aviador fadigado apresenta maior probabilidade de cometer erros relacionados à cognição durante um voo, o que potencialmente pode levar a contratempos e, mais ainda, à morte (Shappell & Wiegmann, 2000).

Apesar de haver registro de seu uso já há mais de século, o termo fadiga não recebe tão grande investimento em busca de sua clarificação por duas principais razões: (1) há uma grande dificuldade na mensuração do que é, de fato, fadiga. Por tratar-se de um construto primariamente subjetivo, a fadiga é medida sempre por via indireta, o que diminui imensamente a confiabilidade de suas medidas. (2) O termo fadiga também não é eficientemente discriminativo na prática clínica, uma vez que seus sintomas se misturam com diversos outros, não oferecendo suporte exclusivo a tantos diagnósticos. Entretanto, apesar das dificuldades e limitações explanadas, há ainda espaço para uma melhor e mais profunda revisão deste conceito. A aparente falta de simplicidade em sua medida e uso não faz necessariamente da fadiga um sintoma simplista e pouco relevante (Ackerman, 2011; DeLuca, 2005).

Na verdade, revisões mais atuais sobre o termo referem-se a ele como um sintoma de origem central (DeLuca et al., 2008). Pacientes que sofrem da Síndrome da Fadiga Crônica (SFC) reportam maior percepção de desgaste cognitivo e dificuldades cognitivas para executar tarefas do dia-a-dia. Dessa forma, a Síndrome da Fadiga Crônica, antes tida apenas como sintoma psiquiátrico, passa a ser reconhecida cada vez mais como uma patologia relacionada a percepção de esforço, tanto físico como mental (DeLuca, 2005).

Capítulo 05: Expertise

Desenvolver métodos capazes de treinar pessoas a desempenhar melhor suas tarefas, sejam simples e cotidianas ou específicas e “de alta performance”, como costuma-se dizer, já justifica o estudo da expertise. Apesar de parecer trivial, o termo inclui muitos pormenores, além de fazer parte da vida de todos, em algum grau, o que torna seu estudo mais desafiador do que pareceria a princípio.

Nesse contexto, estudos (Brochard, Dufour, & Després, 2004; Campitelli, Gobet, & Bilalić, 2014; Dismukes, Berman, & Loucopoulos, 2016; Litchfield & Donovan, 2016; Taylor, 2007; Vaci & Bilalić, 2017) têm sido feitos para se entender porque esportistas, músicos, jogadores de xadrez ou mesmo radiologistas tornam-se especialistas em habilidades específicas, tão diferentes dos não-especialistas em seu campo de atividade.

Apesar do conceito clássico de expertise envolver o treino em determinada tarefa por mais de dez mil horas (Hambrick, Campitelli, & Macnamara, 2017), atualmente tem-se tratado como expert pessoas que produzem performances claramente acima da média regular de desempenho para uma determinada tarefa (Ericsson, 2014; Ericsson, Charness, Feltovich, & Hoffman, 2006) Também é mais comum associar-se o termo com habilidades razoavelmente estáveis. Por exemplo, um radiologista torna-se um expert porque, com o passar de seu treino, ele é cada vez mais capaz de identificar detalhes específicos de um raio-x, por assim dizer, que definem se seu paciente está ou não doente. Entretanto, não é adequado aplicarmos esse conceito de expertise ao mercado financeiro, por mais habilidoso que seja um corretor de ações. O mercado financeiro tende a mudar em curtos períodos de tempo, o que não permite que o

conhecimento consolidado e estável do corretor de ações seja a principal ou maior causa de seu bom desempenho (Bilalić, 2017).

Outro desafio relacionado ao estudo da expertise é que, ao considerar-se o ambiente no qual um expert está inserido, a variedade de informações e estímulos torna difícil a discriminação daquilo que realmente atua na formação do expert (Bilalic, 2017; Ericsson et al., 2006). Apesar disso, fato é que um grão-mestre de xadrez leva um jogo ao xeque-mate em poucos movimentos e um radiologista decifra um raio-x em frações de segundos. De um lado, tem-se os processos cognitivos, como percepção, atenção e memória, os quais capacitam o expert para seu desempenho e são indicadores de como a expertise acontece em seus cérebros (Campitelli et al., 2014; Guida, Gobet, & Nicolas, 2013; Ricciardelli, Baylis, & Driver, 2000). Por outro lado, tem-se o comportamento latente do expert, onde pesquisas buscam identificar as características e atividades necessárias para que esses atinjam alta performance. É conhecido que indivíduos não se tornam experts por executarem partes de uma tarefa mais rapidamente que novatos. Na verdade, sua performance é baseada em estratégias distintas, as quais costuma-se chamar de domínio expert (Bilalić, 2017; Bilalić, Langner, Erb, & Grodd, 2015). Mais especificamente, experts, em algum momento, passam por um período chamado de aquisição de habilidades (do inglês: *skill acquisition*, tradução própria), o qual os capacita a executarem estratégias cognitivas qualitativamente distintas de novatos. Segundo Bilalić (2016), o entendimento dessa habilidade de desenvolver conhecimento em um domínio específico é central para o entendimento de como funciona a expertise.

Expertise perceptual e cognitiva

Muito da diferença entre experts e novatos, quanto ao desempenho cognitivo, está relacionado à memória de longo prazo. De alguma forma, a memória de experts não apenas registrou um maior número de combinações em que problemas podem ser apresentados, mas também uma maior quantidade de soluções para tais situações (Bilalić, 2017; Ericsson, 2014; Ericsson et al., 2006). Dessa forma, eles conseguem acessar informações cruciais quanto ao desempenho efetivo de sua tarefa de maneira mais rápida e eficiente que novatos. Essas estratégias envolvendo a memória de longo prazo permitem também que experts se mantenham focados nos aspectos mais importantes da tarefa, tendo mais facilidade para descartar informações secundárias (Ericsson, 2014; Hambrick et al., 2017).

Um termo importante ao se falar sobre as características de experts é reconhecimento de padrões. A habilidade de reconhecer padrões oferece aos experts maior agilidade no processamento de informações, pois automatiza o processamento da informação, inclusive no que se refere ao reconhecimento de objetos e posições. Experts são mais eficientes que novatos não porque eles conseguem processar rapidamente toda a informação que lhes chega. Antes, eles focam seus recursos cognitivos nos aspectos relevantes do ambiente, desconsiderando informações que não sejam úteis para o momento (Bilalić, 2017; Bilalić et al., 2015).

Outro termo importante e bastante atual relacionado à expertise é aprendizagem perceptual (Gibson, 1967; Watanabe & Sasaki, 2015). Significa o processo pelo qual a habilidade do sistema sensorial para responder a estímulos do ambiente, é aprimorada por meio da experiência (Kawato et al., 2014). A aprendizagem perceptual ocorre tanto pela interação entre o indivíduo que aprende e o ambiente quanto pela prática de tarefas específicas. Acredita-

Experimento 1

Objetivos

Objetivo Geral.

Investigar se o nível de complexidade de uma tarefa e o nível de expertise de um piloto afetam sua performance de voo final, considerando-se como resultados as medidas de seus movimentos oculares e padrões de trajetória visual. O escopo teórico deste trabalho baseia-se na perspectiva de que uma maior complexidade de tarefa pode acarretar maior demanda atencional e, portanto, maior fadiga cognitiva.

Objetivos específicos.

- Calcular a sequência principal de novatos e experts e identificar possíveis diferenças entre as mesmas que se relacionem com a atenção e a fadiga cognitiva;
- Avaliar como a expertise relaciona-se com possíveis diferenças de performances de movimentos oculares entre experts e novatos em relação às variáveis dependentes (VDs) do estudo;
- Avaliar as possíveis diferenças de performance dos participantes conforme os quatro distintos tipos de voo, os quais apresentam diferentes níveis de complexidade;
- Verificar o quanto a interação entre as variáveis independentes (VIs) expertise e tipos de voo relaciona-se com as VDs propostas no estudo;

- Identificar se o nível de expertise dos participantes relaciona-se com o acesso e permanência do olhar em diferentes áreas de interesse no painel de controle do helicóptero;
- A partir da identificação de diferentes métricas relacionadas aos movimentos oculares entre pilotos experientes e novatos, desenvolver um algoritmo de categorização destes movimentos, capaz de identificar a categoria de expertise ao qual cada piloto pertence. Tal algoritmo baseia-se nos princípios básicos de *machine learning*, onde o processamento categórico do próprio algoritmo cria uma base de amostras suficientes para a identificação dos movimentos oculares a serem analisados (tal método está melhor descrito na sessão referente à análise de dados);
- A partir da identificação da trajetória visual dos pilotos, considerar a relação entre complexidade das tarefas e expertise e entropia;
- Avaliar qualitativamente a precisão de fixações realizadas pelos participantes, identificando se há diferenças conforme a expertise dos pilotos.

Delineamento Experimental e Hipóteses

Delineamento Experimental.

Metodologicamente, este estudo é classificado como quase-experimental, haja vista não haver meios de selecionar seus participantes aleatoriamente. Conta-se com uma estrutura multifatorial, cuja configuração de níveis das VIs é 4 x 2, envolvendo uma comparação intra e uma entre sujeitos para as diferentes VDs.

Variáveis Independentes e Dependentes.

Especificamente, as VIs são Tipo de Voo, com quatro níveis, e Expertise, com dois níveis. Para tipos de voo, os níveis da VI denominam-se Voo por Regras Visuais (VRV), Voo por Regras Instrumentais 1 (VRI 1), Procedimento de Emergência (PE) e Voo por Regras Instrumentais 2 (VRI 2). Já a VI Expertise encontra-se subdividida em Experts e Novatos, sendo essa a variável entre-sujeitos.

O nível de complexidade da tarefa foi definido conforme o tipo de voo a ser realizado pelo piloto, considerando-se mais complexo o voo em que os pilotos têm menor possibilidade de recorrer a informações externas ao helicóptero que pilotam (ambiente externo) e, por isso, recorrem apenas aos instrumentos de controle de bordo da aeronave (voo entre nuvens), como é o caso de VRI 1 e 2. Durante o voo considerado mais simples (VRV), os pilotos têm acesso visual a todo o ambiente ao seu redor. Mais complexo que todos os demais voos é o PE, uma vez que envolve uma situação de emergência onde o piloto é surpreendido com uma inesperada pane no helicóptero.

A tabela 2 apresenta de forma esquematizada as VDs investigadas e as VIs manipuladas, bem como os níveis de cada uma destas últimas.

Tabela 2: *Relação das variáveis dependentes e independentes do experimento 1.*

Variáveis Dependentes	Variáveis Independentes	
Número de piscadas	Tipo de voo	Expertise
Taxa de piscadas (número/s);	VRV	Expert
Tempo total em piscadas (ms);	VRI 1	Novato
Duração média em piscadas (ms);	PE	
Número de fixações	VRI 2	
Taxa de fixações (número/s);		
Tempo total de fixações (ms);		
Duração média das fixações (ms);		

Dispersão total das fixações (px);
Dispersão média das fixações (px);
Comprimento da trajetória visual (px);
Número de sacadas
Taxa de sacadas (número/s);
Tempo total em sacadas (ms);
Duração média das sacadas (ms);
Amplitude total das sacadas (\hat{A}°)
Amplitude média das sacadas (\hat{A}°)
Velocidade total das sacadas (\hat{A}°/s)
Velocidade média das sacadas (\hat{A}°/s)
Latência média das sacadas (ms)
Sequência principal
Entropia (bits)
Tempo de permanência em AOI (ms)
Número de revisitas à AOI
Sequência de acesso às AOIs

Hipótese teórica.

Movimentos oculares e o processamento visual estão integrados com todo o sistema neurovisual, de forma que alterações nos primeiros podem estar relacionadas a alterações neurofisiológicas ou neurofuncionais. Sendo assim, os movimentos oculares podem servir como biomarcadores sinalizadores dos demais processamentos cerebrais a eles concomitantes, além de indicar a quantidade de informação a ser processada visualmente a cada instante. A partir desse paradigma de conexão entre os movimentos oculares e a neurofisiologia cerebral, delineiam-se hipótese experimental e previsões de resultados para o experimento proposto nesse estudo.

Hipótese Experimental.

- As VIs tipo de voo, com níveis de complexidade, e expertise relacionam-se diferentemente com o comportamento de movimentos oculares apresentado pelos

participantes. Essas diferenças podem revelar a fadiga cognitiva e processos atencionais visuoespaciais demandados pela tarefa experimental. Espera-se que experts tenham melhor desempenho oculomotor em tarefas de maior complexidade, indicando menor fadiga cognitiva e maior atenção. Por exemplo, é esperado que experts e novatos apresentem uma sequência principal menor em tarefas de maior complexidade, bem como menor dispersão das sacadas e fixações ao longo dos diferentes tipos de voo. Entretanto, espera-se que novatos tenham ainda menor sequência principal, haja vista ser maior o impacto da fadiga em seu desempenho.

Hipótese Nula.

- Não há influência do tipo de voo e expertise associados à fadiga, não havendo, pois, alterações nos movimentos oculares de pilotos de helicópteros em simuladores conforme variam a expertise e o tipo de voo.

Previsões de Resultados.

A partir dos objetivos e da hipótese apresentada, espera-se observar os seguintes resultados no trabalho proposto:

- Voos com maior complexidade demandam mais atenção e, por isso, pilotos apresentam maior fadiga cognitiva durante sua realização. Assim, é possível que a complexidade do voo afete métricas como a sequência principal, tornando-a menor. Entretanto, pilotos novatos e experts são impactados de forma diferenciada por tal fadiga. Tal observação deve poder ser observada a partir da

comparação de suas sequências principais, onde novatos apresentaram menor inclinação que experts;

- A complexidade do voo pode afetar o desempenho de pilotos, tanto experts quanto novatos, o que pode ser observado por mudanças em sacadas (quantidade, taxa, duração e amplitude) e fixações (quantidade, taxa, duração e dispersão). Espera-se que em voos de maior complexidade, haja menor dispersão do olhar, menor número de sacadas e maior número ou duração de fixações;
- Ao serem apresentados a tarefas de mesma complexidade, experts e novatos apresentam performances de movimentos oculares distintas, especialmente em relação a sacadas (quantidade, taxa, duração e amplitude) e fixações (quantidade, taxa, duração e dispersão). Experts dispersam menos o olhar, efetuam mais sacadas e mais fixações;
- Novatos apresentaram um conjunto de fixações mais dispersas, com maior entropia, que pilotos com maior treino. Tal hipótese também se evidenciará na análise das AOIs utilizadas pelos participantes. Assim, experts demonstram maior uso de AOIs mais relevantes para o voo, efetuando nelas diferentes sequências de fixações, revisitação e permanência do olhar;
- É possível o desenvolvimento de um código de *machine learning* para categorizar experts e novatos por meio da análise de seus movimentos oculares.

Método

Participantes.

Compuseram a amostra desse estudo 20 participantes, sendo 11 considerados experts e nove novatos. Dentre esses, há apenas uma participante mulher (5% da amostra). Foram considerados experts participantes com mais de 600 horas de voo, no total ($M = 1420h$, $DP = 579,97h$). Em oposição, participantes com menos horas de voo compuseram o grupo dos novatos ($M = 297,22h$, $DP = 172,55$). Como esperado, o grupo considerado expert apresentou maior média etária ($M = 32,73$, $DP = 3,33$) em relação aos novatos ($M = 25,89$, $DP = 1,67$).

Todos os participantes eram pertencentes ao Corpo de Marines dos Estados Unidos da América, mais especificamente do *Marine Light Attack Helicopter Training Squadron 303*. Todos possuem, ao menos, o equivalente ao Ensino Médio Completo. Os participantes, como pertencentes ativos à Marinha Americana, encontravam-se em bom estado de saúde, sem déficit visual e sem histórico de doenças neurológicas, psiquiátricas ou crônicas. Não há relatos ou registros de transtornos de humor ou ansiedade. É importante ressaltar que todos os participantes realizavam avaliação médico-clínica mensal para que se mantivessem em atividade. Todos os participantes foram orientados a não ingerir produtos que contivessem cafeína ou quaisquer outros estimulantes nas 24h anteriores ao experimento, bem como solicitados a um mínimo de 7h de sono na noite anterior. Foram considerados critérios de inclusão no estudo ser um piloto do USMC, estar em bom estado físico de saúde e liberado para tarefas de trabalho pelos superiores médicos responsáveis, não ter feito ingestão de cafeína nas 24h horas anteriores ao experimento e ter tido um mínimo de 7h de sono na noite anterior.

Apesar da presente pesquisa não ter sido desenvolvida no Brasil, em respeito a Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde, buscou-se minimizar as possibilidades

de exposição e vulnerabilidade dos participantes da pesquisa. A participação foi voluntária e todos foram esclarecidos sobre a natureza das tarefas e dos procedimentos realizados. Por serem militares e pelo fato da pesquisa utilizar como equipamento um simulador de voo dentro da base militar, os superiores dos participantes tinham acesso ao desempenho dos mesmos. Entretanto, independente da qualidade do desempenho, garantiu-se aos participantes que este não lhes seria contabilizado como hora de treino, bem como não haveria qualquer benefício ou prejuízo para suas carreiras decorrentes de sua participação. Todos os participantes leram e assinaram o TCLE para o estudo (Anexo B).

Instrumentos.

Apesar da pesquisa contar com critérios de inclusão, não foi feito uso de instrumentos adicionais para avaliação de transtornos do humor, ansiedade ou alerta. Também se optou por não realizar entrevistas ou longas checagens sobre o estado percebido de saúde dos pilotos. Tal decisão baseou-se na simples necessidade de tornar o tempo de duração de cada sessão experimental o menor possível. A coleta de dados deste estudo foi realizada em ambiente militar. Por regras estabelecidas pela própria Marinha Americana, a presença de civis na base militar deve resumir-se ao mínimo necessário. Além disto, a coleta deu-se de forma voluntária, mas conforme a própria rotina de atividades e treinos dos pilotos, sendo o horário determinado para coleta de dados inflexível e insuficiente para o uso de mais instrumentos. De qualquer forma, estudos anteriores não apontaram relevância primordial para dados advindos de questionários em estudos com medidas fisiológicas mais precisas (Di Stasi, Diaz-Piedra, et al., 2015).

O único instrumento adicional utilizado foi uma folha de registro simples, desenvolvida pela própria pesquisadora, com o objetivo de registrar os tempos de execução das tarefas e a performance dos participantes (conforme pode ser visto no Anexo A).

Materiais e Equipamento.

O estudo foi realizado em Camp Pendleton, Califórnia, EUA, em uma base dos USMC pertencente à Marinha. Todos os pilotos participantes do estudo tinham em suas rotinas de treinamento o uso de simuladores de voo, como parte da preparação para voos reais. No caso específico deste estudo, os pilotos participantes treinavam rotineiramente em um simulador de helicóptero AH-1W Super Cobra, o qual pode ser observado na Figura 16 a seguir.

Além do simulador AH-1W Super Cobra, também se utilizou equipamento adequado para registro dos movimentos oculares dos participantes. Trata-se do *eye tracker* 'SMI Eyetracking Glasses 2w Analysis Pro®' (SensoMotoric Instruments, Teltow, Germany), o qual permite o rastreamento do olhar binocular em tempo real (Figura 17). Tal instrumento é capaz de registrar o posicionamento do olhar a uma taxa de 60 Hz, com precisão espacial de 0,1 GAV e um amplitude de rastreamento do olhar de 80 GAV horizontalmente e 60 GAV verticalmente.

A câmera externa, voltada para o cenário visual, apresenta resolução de 1280x960 em cadência de 24 *frames per second* (fps) ou 960x720 em 30 fps; com formato de vídeo de H.264; modo HDR (*high dynamic range*) com alta sensibilidade a baixa luminosidade.

O sistema também conta com um *software* de análise denominado *BeGaze*, o qual permite a análise parcial dos dados descrita adiante.

Procedimento.

Conforme já esclarecido anteriormente, os participantes desse estudo não foram recrutados aleatoriamente. Antes, eram pilotos do USMC, que trabalhavam na base militar de Camp Pendleton, Califórnia.

Para a coleta de dados, a pesquisadora foi até Camp Pendleton, levando consigo o *SMI Eyetracking Glasses*. A base dos USMC em Camp Pendleton é a maior base na costa oeste, localizada no sudoeste da Califórnia, no condado de San Diego. A área da base é de 497 km², dividida em partes sul e norte. Foi estabelecida em 1942, sendo declarada a primeira instalação permanente para *Marines* nos Estados Unidos da América. A escolha para este local de coleta é a presença do simulador AH-1W Cobra, sendo também o local de mais conveniente acesso aos participantes. O simulador fica localizado em uma câmara escura e completamente isolada do ambiente externo. Assim, os únicos ruídos existentes no ambiente de coleta eram os sons do próprio simulador, o que manteve as condições de simulação as mais próximas da realidade possíveis.

Cada participante foi agendado individualmente para o experimento, pela manhã, de modo que todas as coletas foram realizadas em horários semelhantes. Uma vez dentro da câmara onde se localiza o simulador, os pilotos receberam uma breve explicação sobre o experimento, seguida da leitura e assinatura do TCLE (Anexo B). Brevemente, o piloto foi questionado a respeito de suas horas de sono e consumo de cafeína nas últimas 24 horas. Confirmando-se a aptidão para participar do estudo, o piloto foi posicionado no *cockpit* do simulador.

Feito isto, o piloto foi conduzido a posicionar adequadamente o *Eyetracking Glasses*, sendo orientado a não o mover ou ajustar após a calibração. O piloto então recebia as

orientações para calibragem do equipamento e, em seguida, colocava os fones de ouvido.

Finalmente, realizava-se a calibragem e dava-se início ao experimento.

O procedimento experimental baseia-se na execução de um voo de helicóptero em simulador, constando de quatro fases, sendo que três delas duraram aproximadamente 15 minutos cada e a outra, apenas 3 minutos, em média. Tal tarefa foi delineada pelos pesquisadores e programada no simulador Super Cobra AH-1W utilizado pelos pilotos. É importante ressaltar, porém, que a tarefa experimental não faz parte do treinamento diário dos pilotos, diminuindo-se, assim, a interferência de efeitos de habituação e aprendizagem. Durante a primeira fase, chamada de VRV, o piloto teve acesso a todas as informações do ambiente externo a seu redor. Tratava-se do que seria uma simulação de voo aberto, em um dia com condições meteorológicas brandas, onde o piloto enxergava todo o espaço aéreo a seu redor durante o voo. A segunda fase, chamada de VRI 1, caracterizou-se por aproximadamente 15 minutos de voo sem acesso as condições ambientais. Era o que pilotos costumam chamar de ‘voo entre nuvens’. Ou seja, para guiarem-se durante esse período, os pilotos tinham necessariamente que basearem-se nos instrumentos de voo à sua frente, uma vez que todas as informações ambientais estavam visualmente encobertas por nuvens. Em seguida, os pilotos foram surpreendidos pelo PE, terceira fase da tarefa experimental. Nesse momento, uma sequência de procedimentos de emergência subitamente acontecia. Primeiro os pilotos tinham que lidar com a perda do monitor de controle de velocidade do ar, em seguida com a falha do primeiro motor e, finalmente, com a falha no segundo motor da aeronave. Assim, em uma rápida sequência que durava alguns segundos, os pilotos viam-se em queda livre, tendo que lidar com o desafio de pousar a aeronave da melhor forma possível. Após a queda, cujo resultado era uma aterrissagem de emergência ou a destruição da aeronave, o simulador reconduzia os pilotos à condição de voo VRI e os pilotos permaneciam por mais 15 minutos nesse último ciclo

Discussão

Tendo em vista o resultado de trabalhos anteriores, onde o tempo de duração de uma tarefa impactou a sequência principal dos movimentos oculares, indicando fadiga e declínio atencional, este trabalho propôs-se a reexaminar a questão. Agora, apresentando aos participantes tarefas com diferentes complexidades, pois a hipótese era de que o declínio na sequência principal não vinha apenas da duração da tarefa, mas das demandas cognitivas da mesma. Aproveitou-se, aqui, para também investigar se experts e novatos lidam com essas diferentes complexidades de voo de forma distinta, o que se espera ser verdade.

O primeiro resultado a chamar atenção no estudo é a sequência principal (Bahill et al., 1975; Stasi et al., 2011). Esperava-se obter uma menor relação entre a velocidade de sacadas e a magnitude das mesmas com o passar do tempo e com a apresentação de tarefas mais complexas. Ou seja, era esperado que a sequência principal diminuísse em VRI 1 e, então, diminuísse ainda mais para o PE e VRI 2, haja vista VRI 1 ser mais complexo que VRV e PE ser mais complexo que ambos. Deve-se ressaltar aqui que em VRV os pilotos tinham acesso visual aos arredores. Assim, podiam utilizar pistas visuais externas ao helicóptero para guiar seus voos. Já em VRI 1 e 2, os pilotos voavam entre nuvens. Assim, nada podiam ver ao redor do helicóptero, pautando seus voos apenas pelas informações obtidas pelos instrumentos do *cockpit*. Já o PE era esperado que fosse de maior complexidade pois, repentinamente, o helicóptero sofria três panes consecutivas (falha no controle de velocidade, perda do primeiro motor e perda do segundo motor). Assim, o piloto via-se em queda-livre, tendo a responsabilidade de tomar decisões rápidas que o permitissem pousar o helicóptero.

Surpreendentemente, o resultado obtido demonstra que a sequência principal foi menor em VRV, contradizendo a expectativa original. Algumas explicações parecem razoáveis

para tal achado. Primeiramente, é possível que a fadiga cognitiva não exerça influência sobre as métricas oculares dos participantes. Assim, a complexidade da tarefa, mesmo tendo o potencial de demandar mais atenção, ou não causa fadiga cognitiva suficiente para ser medida, ou simplesmente não a causa. Ou, ainda, simplesmente não foi medida neste estudo de forma a revelar seu impacto. Considerando-se um estudo recente (Montalvo, Kozachuk, Rupp, & McConnell, 2016) que buscou desenvolver tarefas que gerem fadiga cognitiva no contexto de laboratório, identificou-se que tarefas com menos de 30 minutos não causam fadiga cognitiva. Sendo isso verdade, é possível que o delineamento experimental desse estudo, com tarefas de 15 minutos, não tenha atingido a demanda mínima necessária para desencadear respostas de fadiga cognitiva. Entretanto, nesse caso, seria lógico esperar que a sequência principal mantivesse-se estável em todos os tipos de voo, ou decaísse apenas ao final, o que não é o caso.

Uma segunda explicação plausível para a diminuição da sequência principal em VRV é a de que, na verdade, o que causa a fadiga cognitiva é a repetitividade da tarefa, não necessariamente apenas uma maior demanda cognitiva. Essa explicação transforma o entendimento do fenômeno fadiga cognitiva costumeiramente apresentado até então. Em geral, fadiga cognitiva é tida como uma piora do desempenho de um participante em função de alta demanda cognitiva (principalmente atencional) de uma tarefa (Ackerman, 2011; Lorist et al., 2005). Considerando-se apenas esse conceito, os participantes desse estudo não apresentaram fadiga cognitiva, uma vez que a diminuição da sequência principal deu-se apenas no voo de menor complexidade (Pattyn, Neyt, Henderickx, & Soetens, 2008). Entretanto, Wylie, Genova, DeLuca e Dobryakova (2017) propõem que o termo fadiga cognitiva abranja também mudanças na proporção esforço/recompensa. Em seu estudo recentemente realizado, utilizando técnicas de imagem juntamente com medidas de auto relato, eles identificaram que ao se tornarem

fadigados, participantes respondiam com maior latência e maior acurácia para tarefas mais difíceis, em oposição a apresentarem um declínio de acurácia nos momentos de fadiga cognitiva. Diante desses resultados, os autores especularam a possibilidade de que o cérebro detecta essas modificações, sendo que a fadiga cognitiva é gerada como uma forma de sinalizar para o cérebro que o esforço demandado para uma certa tarefa já não é vantajoso, dada a recompensa a ser recebida. Ou seja, para estes autores, fadiga cognitiva passa a ser uma espécie de ferramenta protetiva, evitando que o cérebro continue a desperdiçar energia em uma tarefa que já não produz recompensas (Dobryakova et al., 2013; Wylie, Genova, DeLuca, & Dobryakova, 2017). Em relação ao presente estudo, essa pode ser uma maneira de interpretar a fadiga cognitiva apresentada em VRV. Ora, sendo o voo por regras visuais o mais fácil e repetitivo para pilotos profissionais, é possível que a fadiga cognitiva esteja funcionando como um mecanismo de defesa, impedindo que os pilotos empenhem mais energia do que a necessária para executar a simples tarefa. Consequentemente, por ser o voo mais simplista, VRV gera alta fadiga cognitiva e, por isso, apresenta menor relação entre velocidade e magnitude de sacadas.

O presente estudo também identificou que diversas métricas oculares podem ser sensíveis ao nível de treinamento de um piloto (Duchowski, 2017; Holmqvist et al., 2011, 2012; Land, 2006). Portanto, sacadas, fixações, piscadas e a trajetória visual, de alguma forma, indicam o distinto processamento cerebral de experts e novatos (Hayhoe, 2004; Malcolm, 2010; Sparks, 2002). De todos os tipos de voo, o PE mostrou-se mais sensível para captar as diferenças entre experts e novatos. Tal resultado parece lógico ao se pensar que durante o PE os pilotos precisam tomar decisões rápida e acertadamente. Não há tempo para dúvidas ou mudanças nos procedimentos de voo, uma vez que essas podem ser fatais. Considerando a interação das duas VIs do estudo, durante esse tipo de voo, experts e novatos obtiveram diferenças significativas em

relação ao número, duração e dispersão das fixações, assim como número, taxa e duração das sacadas. Tais métricas informam como experts e pilotos utilizam-se de seus movimentos oculares nesse momento específico da tarefa experimental. Chama a atenção aqui, especialmente, a diferença de dispersão de fixações (Thaler, Schütz, Goodale, & Gegenfurtner, 2013). Pensando na disposição dos instrumentos no *cockpit*, o fato de experts apresentarem menor dispersão que novatos mostra que esses mantêm seu foco nos instrumentos centrais (os quais são também os mais informativos). Experts também produzem mais movimentos oculares que novatos, uma vez que emitem mais fixações e mais sacadas. Esse resultado é um indicativo de que o treino para expertise prepara o piloto para investigar melhor o *cockpit* e, muito provavelmente, interagir com ele de forma mais eficiente (Jiao & He, 2007; Zhu & Ji, 2005). Afinal, experts movem mais o seu olhar sobre o *cockpit* da aeronave (Caldwell, Jr., Caldwell, Brown, & Smith, 2004; Yesavage et al., 2011).

Outra medida interessante que ressalta a complexidade do PE é a entropia. Considerando-a como a medida do número de estados igualmente prováveis do sistema visual, observou-se que o fator H aumenta conforme aumenta a complexidade das tarefas, atingindo seu pico durante o PE. Ou seja, tanto experts quanto novatos demonstraram maior carga de trabalho atencional durante o PE, o que indica ser esta etapa de voo a mais indicada para a comparação entre os grupos. Ainda falando de entropia, a comparação entre expert e novatos não foi significativa. Cabe aqui fazer a ressalva de que possivelmente uma maior amostra poderia influenciar nesse resultado, haja vista a proximidade do valor p do valor considerado significativo ($p < 0,05$). Assim, não se pode desconsiderar o uso da entropia como indicador da habilidade dos grupos e não apenas da complexidade das tarefas (Alzubaidi, Black, Patel, & Panchanathan, 2009; Alzubaidi et al., 2010; Di Stasi, Diaz-Piedra, et al., 2016).

Há necessidade, no entanto, de serem testadas outras análises relacionadas a entropia e *cockpit* de aeronaves. A análise de entropia de Shannon (Alzubaidi et al., 2010; Shannon, 1948), aqui utilizada, é mais comum em trabalhos envolvendo um campo visual estático, como a análise de desenhos ou imagens radiológicas, por exemplo. No caso desse estudo, o *cockpit* do helicóptero caracteriza-se como uma cena visual dinâmica, haja vista a movimentação esperada dos instrumentos de controle de voo. Tal dinamicidade acarreta mudanças na probabilidade de dispersão do olhar às quais relacionam-se não aos contrastes entre as partes da imagem em si, mas às informações comunicadas por cada instrumento e alterações de composição da imagem. Assim sendo, análises entrópicas derivadas ou que considerem aspectos como velocidade da movimentação do olhar ou contraste dinâmico (Michael B McCamy et al., 2014) podem fortalecer o escopo de estudos nessa área.

Uma última métrica óculo-motora a ser destacada aqui é o número de piscadas. A literatura, já sabidamente, associa o número de piscadas a uma maior fadiga cognitiva (Benedetto et al., 2011; Boksem et al., 2005, 2006; McIntire et al., 2014). Este estudo encontrou o resultado de que na última etapa do experimento (VRI 2) o número de piscadas entre experts e novatos foi significativamente distinto, sendo que experts piscaram bem menos que novatos. Tal dado indica que, potencialmente, os dois grupos de participantes lidam com a fadiga gerada pela demanda cognitiva e duração da tarefa de forma distinta. Experts parecem mais resistentes à fadiga que novatos, já que apresentam menor número de piscadas.

A análise de AOIs também revela que experts e novatos utilizam-se do *cockpit* de forma distinta. Experts não apenas apresentam uma menor dispersão de fixações e, por conseguinte, maior concentração nos instrumentos centrais, eles também demonstram uma diferente sequência de apreciação das AOIs, diferente tempo de permanência e diferente número

de revisitas para algumas das AOIs, como apresentado na seção de resultados. Não parece exagero dizer que achar diferenças quanto ao acesso e uso das AOIs entre experts e novatos parece um resultado até mesmo intuitivo. Certamente, a diferença de horas de treinamento entre os grupos proporciona maior ou menos habilidade em lidar com os instrumentos de voo e executar tarefas no helicóptero.

Cabe aqui discutir-se o quanto essas diferenças têm sido utilizadas de forma proveitosa para o treino daqueles que têm menor experiência. É comum encontrar na literatura relatos de que expertise reflete um conhecimento nem sempre categórico ou explícito por parte daquele que a detém (Ericsson et al., 2006; Hambrick et al., 2017). Isso significa que não necessariamente experts saberiam expressar verbalmente que tipo de estratégia utilizam ou que procedimentos seguem. Entretanto, estudos como este, que revelam diferenças entre o comportamento de experts e novatos em aspectos específicos, têm o potencial de serem utilizados para potencializar o treinamento de novatos. Por exemplo, saber a sequência de AOIs acessada por um expert pode ajudar na instrução de que sequência deveria ser utilizada e treinada pelo novato. Identificar questões de uso prático das AOIs mostra-se, pois, um dos potenciais de aplicabilidade prática do estudo (Duchowski et al., 2010; Feusner & Lukoff, 2008; Jarodzka, Holmqvist, & Nyström, 2010; Toh et al., 2011). Há, porém, necessidade de se investigar melhor qual o grau de informatividade (McCamy et al., 2014) e relevância de cada instrumento em um *cockpit*, o que viabiliza que o treinamento para uso dos mesmos seja realizado de forma adequada.

Outro resultado relevante do estudo foi identificar que, possivelmente, pilotos estão realizando erros pela forma automatizada como escaneiam o *cockpit* com o olhar (Kovach & Adolphs, 2014; Spring, Pomplun, & Carrasco, 2011). Avaliando-se qualitativamente todas as

68.840 fixações realizadas em áreas consideradas demandantes de precisão (conforme esclarecido na sessão de resultados), tem-se que experts fazem mais que o dobro de fixações precisas que novatos. Considerou-se como fixação precisa aquela feita em uma região de menos de 2 GAV de diferença entre a fixação e a área alvo.

Conhecendo-se a neurofisiologia do sistema visual, sabe-se que apenas informações contidas em uma distância de até 2 GAV do local da fixação são absorvidas e processadas (Hubel, 1988; Snowden et al., 2012). Assim, tratando-se de um piloto, por exemplo, é necessário que estes fixem seu olhar precisamente em áreas informativas do *cockpit*. Apenas assim terão acesso a informações determinantes sobre as próximas decisões a serem tomadas em um voo, por exemplo. Saber que experts estão emitindo duas vezes mais fixações precisas que novatos indica que novatos estão acessando apenas metade das informações oferecidas pelo *cockpit* em relação a suas contrapartes. Logo, treinar novatos para que consigam efetuar fixações mais precisas deve ser um ponto estratégico a ser enfatizado em seu treinamento. Especialmente porque é possível que os mesmos nem mesmos estejam cientes do erro que cometem (Baxter, Besnard, & Riley, 2007). Afinal, ao observarem um instrumento, a visão periférica os norteia em relação ao que observam. Assim, novatos podem estar concluindo que tiveram acesso a determinada informação sem que, de fato, o tenham tido.

Voltando a considerar a neurofisiologia visual, é sabido que depois de encaminhadas à área V1, as informações visuais são codificadas por neurônios conforme o sistema de orientação destes (Kandel et al., 2013; Purves et al., 2012). Ou seja, cada orientação espacial é processada por neurônios especializados no processamento daquela orientação específica. O *cockpit* de um helicóptero faz uso de diversas orientações espaciais (Casner, 2009; Strickland, Pioro, & Ntuen, 1996). Em especial, alguns instrumentos de voo contam com íntima

relação com a orientação, pois fazem uso de agulhas que indicam ao piloto a velocidade da aeronave, ou a altitude, posição em relação ao solo, número de rotações do motor, etc. Ou seja, a grande maioria dos instrumentos de voo ainda é analógica e usa ponteiros para transmitir a informação. Juntando-se esse saber ao conhecimento que se tem sobre percepção de orientações no cérebro, conclui-se que, a depender da orientação de cada ponteiro, neurônios diferentes iram disparar em V1, gerando a informação visual.

Dentro desse contexto, é importante pensar o papel da aprendizagem perceptual no treinamento de futuros pilotos (Amitay et al., 2014; Appelbaum, Schroeder, Cain, & Mitroff, 2011; Szpiro et al., 2014). Sabendo-se que a identificação rápida de padrões perceptuais, assim como estratégias de tomada de decisões específicas podem ser decisivos no desenvolvimento da expertise (Vendetti, Starr, Johnson, Modavi, & Bunge, 2017), faz-se importante que esses conceitos sejam absorvidos e utilizados na prática do treinamento de pilotos. A aprendizagem perceptual dos pilotos deve basear-se no extensivo treino de percepção de contrastes e contornos (Appelbaum et al., 2011; Watanabe & Sasaki, 2015). Uma rápida leitura das informações do *cockpit* é fundamental para o sucesso de um voo. Na verdade, o desenvolvimento dos chamados *cockpits* cognitivos tem sido estudado por diversos grupos e métodos, sendo claro o investimento feito no desenvolvimento de um sistema mais orgânico e interativo, capaz de auxiliar os pilotos na identificação e correção de eventuais erros de performance (Harris et al., 2005; Stanton et al., 2009). Tal medida, na prática, não apenas garante melhores desempenhos como assegura a vida daqueles que trabalham com esses instrumentos de voo.

Experimento 02

Objetivos

Objetivo Geral.

Investigar se movimentos oculares podem ser utilizados como parte de um programa de treinamento para desenvolvimento de expertise de pilotos de helicóptero. Partindo-se do princípio de que movimentos oculares são respostas orgânicas e neurofisiológicas de um indivíduo mediante uma tarefa, o registro de tais medidas e posterior apresentação para pilotos em treinamento pode ser útil no desenvolvimento das habilidades necessárias para desempenho da mesma tarefa.

Objetivos específicos.

- Comparar o desempenho de pilotos de helicóptero após apresentação de um vídeo instrucional, no qual os pilotos em treinamento poderão ou não observar os movimentos oculares de um expert treinado e com bom desempenho em voos;
- A partir do algoritmo de categorização dos movimentos oculares desenvolvido no experimento 1 deste estudo, categorizar quantitativamente as mudanças de performance dos movimentos oculares dos pilotos em treinamento, antes e depois da apresentação do vídeo instrucional;
- A partir da identificação de diferentes métricas relacionadas aos movimentos oculares entre pilotos experientes e novatos, desenvolver um algoritmo de categorização destes movimentos, capaz de identificar o tipo de treinamento

recebido pelo piloto. Como no experimento anterior, tal algoritmo é baseado nos princípios básicos de *machine learning*.

Delineamento Experimental e Hipóteses

Delineamento Experimental.

Assim como o anterior, este estudo também é classificado como quase-experimental, haja vista não haver meios de selecionar seus participantes aleatoriamente. Há apenas uma variável independente envolvida nesse estudo. Inicialmente, o delineamento experimental previa duas variáveis, tipo de vídeo e categoria de treino do piloto. Entretanto, precisou-se reduzir o estudo para apenas uma VI, pois por falhas técnicas do equipamento, o material coletado de alguns pilotos teve de ser descartado. Assim, não se fez possível a formação de dois grupos com categorias de treino distintas.

Variáveis Independentes e Dependentes.

Para este estudo, há apenas uma VI sendo controlada: Tipo de Apresentação de Vídeo, dividida em dois níveis, com ou sem indicação dos movimentos oculares de um piloto expert. Todos os pilotos que participaram desse experimento possuem menos de 300 horas de treino em voo de simuladores de helicópteros AH-1W Super Cobra, podendo ser considerados novatos. Entretanto, alguns deles iniciaram seu programa de treinamento em voos de helicóptero com esse tipo de helicóptero, outros treinam em um tipo de helicóptero distinto.

A tabela 4 apresenta de forma esquematizada as VDs investigadas e a VI manipulada, bem como seus níveis.

Tabela 6: *Relação das variáveis dependentes e independentes do experimento 2.*

Variáveis Dependentes	Variável Independente
Número de piscadas	<i>Tipo de Apresentação do Vídeo</i>
Taxa de piscadas (número/s);	
Tempo total em piscadas (ms);	Com indicação do olhar
Duração médio em piscadas (ms);	Sem indicação do olhar
Número de fixações	
Taxa de fixações (número/s);	
Tempo total de fixações (ms);	
Duração média das fixações (ms);	
Dispersão total das fixações (px);	
Dispersão média das fixações (px);	
Tamanho da trajetória visual (px);	
Número de sacadas	
Taxa de sacadas (número/s);	
Tempo total em sacadas (ms);	
Duração média das sacadas (ms);	
Amplitude total das sacadas (Â°)	
Amplitude média das sacadas (Â°)	
Velocidade total das sacadas (Â°/s)	
Velocidade média das sacadas (Â°/s)	
Latência média das sacadas (ms)	

Hipótese Teórica.

Movimentos oculares e o processamento visual estão integrados com todo o sistema neurovisual, de forma que alterações nos primeiros podem estar relacionadas a alterações neurofisiológicas ou neurofuncionais. Sendo assim, os movimentos oculares podem servir como biomarcadores sinalizadores dos demais processamentos cerebrais a eles concomitantes, além de indicar a quantidade de informação a ser processada visualmente a cada instante. Por tratar-se de um produto orgânico, resultante do próprio funcionamento neurofisiológico, é possível que os movimentos oculares possam ser utilizados como treinamento para aqueles que buscam

desenvolver habilidades semelhantes a de seus mestres. Dessa forma, no treinamento de habilidades específicas que envolvam movimentos oculares, é possível que o comportamento do expert possa guiar o treinamento daquele que busca aprimorar sua habilidade.

Hipótese Experimental.

- Movimentos oculares podem servir como instrumento de instrução e treinamento de pilotos novatos para que atinjam expertise mais facilmente, além de medirem, em si, o grau de treinamento já atingido por determinado piloto. Com essa hipótese sustenta-se a ideia de que a observação dos movimentos oculares de um expert treinado pode oferecer suporte à aprendizagem do indivíduo em treinamento, haja vista ser o movimento ocular uma resposta orgânica e relacionada a todo processamento cognitivo responsável pelas decisões tomadas pelo expert, a cada momento de um voo, por exemplo.

Hipótese Nula.

- Movimentos oculares não apresentam o potencial de serem utilizados no treinamento de pilotos com menos experiência. Por tanto, observar o posicionamento do olhar e os movimentos oculares de um expert não influenciaria na performance do treinando.

Expectativas de Resultados.

- Pilotos que têm a oportunidade de observar os movimentos oculares de um expert desempenhando a mesma atividade para a qual eles são treinados, apresentam

melhora de seu desempenho. Dessa forma, métricas como dispersão de fixações, taxa de fixações ou número de sacadas expressas por tais pilotos em treinamento são mais semelhantes às métricas de um expert após a observação dos movimentos oculares do expert;

- Movimentos oculares têm o potencial de serem informativos para o treinamento de novos pilotos. Assim, mesmo pilotos que são geralmente treinados em outro tipo de helicóptero podem beneficiar-se do vídeo apresentando os movimentos oculares dos experts;
- O código de *machine learning* para categorizar experts e novatos por meio da análise de seus movimentos oculares desenvolvido no experimento anterior é capaz de identificar as diferenças de performance dos participantes antes e depois da apresentação do vídeo desse experimento, indicando se novatos que receberam instruções dos movimentos oculares de um expert tiveram seu desempenho aproximado desses.
- É possível treinar-se um código específico de *machine learning* para indicação do benefício do treinamento realizado por meio do vídeo instrucional com os movimentos oculares de um expert desenvolvendo a mesma atividade para qual o novato é treinado. Dessa forma, um código específico relativo ao treinamento é capaz de identificar as diferenças de performance entre aqueles que assistiram ao vídeo com a indicação dos movimentos oculares do expert, ou sem.

Método

Participantes.

Compuseram a amostra desse estudo 26 participantes, todos distintos do experimento anterior. Entretanto, dois participantes foram excluídos da amostra final do experimento em virtude de falhas técnicas com o equipamento durante a coleta de dados (os dados dos participantes nem mesmo chegaram a ser coletados). Dos 24 participantes que compuseram a amostra final do estudo, todos eram considerados novatos quanto ao número de horas em voo ($M=227,29$, $DP = 41,68$). Novamente, apenas uma participante mulher (4,16% da amostra). A média etária foi de $M 26,79$, $DP = 2,56$.

O restante das características citadas anteriormente para descrever os participantes é válido também aqui. Todos eram pertencentes a Corpo de Marines dos Estados Unidos da América (USMC – *United States Marine Corps*), *Marine Light Attack Helicopter Training Squadron 303*. Todos possuem, ao menos, o equivalente ao Ensino Médio Completo e encontram-se em bom estado de saúde, sem déficit visual e sem histórico de doenças neurológicas, psiquiátricas ou crônicas. Novamente, todos foram orientados a não ingerir produtos que contivessem cafeína ou quaisquer outros estimulantes nas 24h anteriores ao experimento, bem como solicitados a um mínimo de 7h de sono na noite anterior. Os mesmos critérios de inclusão foram utilizados, com exceção de que para este estudo os pilotos incluídos deveriam ter no máximo 300 horas de voo no total, além de poderem treinar em diferentes tipos de plataforma (não apenas no helicóptero Super Cobra AH-1W).

As mesmas considerações éticas aplicadas ao experimento anterior valeram também para este experimento. Todos os participantes leram e assinaram o TCLE para o estudo (Anexo B).

Instrumentos.

As mesmas considerações sobre instrumentos feitas para o estudo anterior são válidas também para este estudo. A única folha de registros utilizada em ambos os experimentos está disponível no Anexo A.

Materiais e Equipamento.

Este estudo foi desenvolvido na mesma base militar de Camp Pendelton, CA, EUA, já referenciada no experimento anterior. O simulador de helicóptero Super Cobra AH-1W e o eye tracker '*SMI Eyetracking Glasses 2w Analysis Pro*'[®] (SensoMotoric Instruments, Teltow, Germany) foram também utilizados para a realização do experimento 2.

Procedimento.

O segundo experimento ocorreu no mesmo local e espaço físico já descritos anteriormente. Novamente, os participantes foram agendados individualmente para o experimento, pela manhã. Também como no primeiro experimento, todos os participantes foram convidados a ler e assinar o TCLE (Anexo B), bem como foram assegurados a respeito da privacidade e sigilo de seus dados.

Após essas orientações iniciais, os participantes foram também questionados a respeito de suas horas de sono e consumo de cafeína nas últimas 24 horas. Confirmando-se a aptidão para participar do estudo, os pilotos foram posicionados no *cockpit* do simulador.

Exatamente da mesma forma como no experimento anterior, os pilotos foram então conduzidos a posicionarem adequadamente o *Eyetracking Glasses*, sendo-lhes orientado a não o mover ou ajustar após a calibração. O piloto recebeu então as orientações de como era

realizada a calibração e, em seguida, coloca os fones de ouvido. Em seguida, realizou-se a calibragem e deu-se início ao experimento.

O tempo de realização deste segundo experimento foi o mesmo. Entretanto, nessa etapa, ao invés de voarem um único voo, com diferentes fases, os pilotos foram solicitados a voar uma sequência de 5 PEs, com as mesmas características que o PE do primeiro experimento. Em seguida, assistiram a um vídeo de um piloto expert lidando também com uma sequência de 5 PEs do mesmo tipo que acabaram de enfrentar. Por fim, os pilotos voaram uma nova sequência de 5 PEs, como os anteriores. O procedimento utilizado para esse experimento está ilustrado na Figura 52 a seguir.

Discussão

A ideia principal acerca desse experimento era que a observação de movimentos oculares realizados por um piloto experiente poderia auxiliar o treinamento de pilotos novatos. Para verificar essa hipótese, pediu-se que pilotos de helicóptero novatos voassem, em um simulador, cinco procedimentos de emergência, sempre nas mesmas condições. Após esses voos, era-lhes apresentado um vídeo referente a um expert realizando os mesmos 5 voos de emergência. Então, os pilotos eram solicitados a voar novamente os PEs, havendo a expectativa, por parte dos experimentadores, de que eles apresentariam melhor performance.

Testes-t comparando pilotos que assistiram ao vídeo com a indicação do olhar de um expert com aqueles que assistiram ao vídeo sem essa informação foram realizados e observou-se que as médias de número, taxa, dispersão e duração de fixações, assim como número, taxa e duração de sacadas varia significativamente entre os grupos, como foi relatado na sessão de resultados. Tal resultado indica que existe mudança nos grupos após a observação dos vídeos. Entretanto, é difícil concluir se o tipo de mudança decorre apenas da observação do vídeo, uma vez que outros fatores, como, por exemplo, a repetição da tarefa por diversas vezes (efeito de aprendizagem) pode igualmente ajudar na melhora do desempenho.

É importante ressaltar que há também uma mudança no resultado da performance dos pilotos. Cada PE executado culmina em dois possíveis resultados. Ou os pilotos conseguem pousar a aeronave, ou terminam com ela destruída. Quando são comparados os resultados dos PE antes e depois do vídeo, pilotos que assistiram ao vídeo com o movimento ocular são mais bem-sucedidos que pilotos que não o fizeram. Ou seja, há uma taxa de sucesso maior na aterrissagem do helicóptero quando o vídeo instrucional apresenta os movimentos oculares do expert. Tal resultado indica que, apesar da estatística clássica não ser conclusiva a respeito do tipo de

mudança no comportamento dos pilotos no que se refere a movimentos oculares, é possível que alguma outra variável interfira no comportamento dos participantes. Sabendo-se que processos de tomada de decisão são apontados como uma importante diferença entre experts e novatos, é plausível considerar que o vídeo instrucional esteja afetando os pilotos quanto a essa medida (Thibaut & French, 2016; Vendetti et al., 2017). Ou seja, após assistirem ao vídeo, os novatos que puderam observar os movimentos oculares do expert passaram a optar por diferentes soluções para os PE.

A análise de classificadores efetuadas nesse estudo terminou por ser diferente do que se esperava. Inicialmente, esperava-se utilizar o classificador desenvolvido no Experimento 1 para avaliar os dados do presente estudo. A expectativa é de que, uma vez tendo-se desenvolvido o classificador no Experimento 1, esse seria capaz de identificar se, após a apresentação do vídeo, os participantes que observaram os movimentos oculares do expert apresentariam um comportamento mais próximo de um expert que os demais participantes. Entretanto, o classificador não apresentou boa acurácia para classificação, chegando a apenas 40% de identificações corretas. Diante disso, optou-se por desenvolver novo classificador, buscando-se a identificação dos participantes que assistiram ao vídeo com ou sem movimentos oculares. Foram treinados novos classificadores para a tarefa e obteve-se a acurácia de 85% de acerto, considerada boa para os parâmetros de *machine learning* (Lou, Liu, Kaakinen, & Li, 2017; Saß, Schütte, & Lindner, 2017).

Como um último teste, treinou-se um classificador também para identificar se os dados analisados pertenciam ao grupo de dados de antes ou depois do vídeo, independente do grupo experimental. Entretanto, tal classificador não obteve uma boa acurácia, chegando ao máximo de 64% de acerto. Tal resultado era, de certa forma, esperado, pois, neste caso, o

classificador não recebia informações sobre o grupo a que pertencia o participante (vídeo com ou sem o movimento ocular do expert). Entretanto, um resultado pior nesta análise fortalece a ideia de que o vídeo instrucional está, de fato, produzindo algum efeito. Afinal, o classificador que considera os grupos experimentais alcança melhor acurácia.

É importante manter a ressalva de que *machine learning* baseia-se em uma tecnologia aplicada (Geitgey, 2014; Jordan & Mitchell, 2015). Ou seja, classificadores são poderosos instrumentos de identificação e categorização de dados, porém servem às necessidades daqueles que o produzem. Por exemplo, ao desenvolver-se um classificador capaz de identificar se um determinado e-mail pertence ao grupo de *spams* ou não, o operador de *machine learning* que treina o classificador é quem vai estabelecer o grau de acurácia necessária para o mesmo. Como a perda de e-mails relevantes pode ser danosa ao usuário, é provável que a acurácia estabelecida para esse classificador seja alta. No caso desse estudo, o desenvolvimento de classificadores tem caráter inédito, não tendo sido relatado na literatura o uso de classificadores para movimentos oculares.⁸ Assim, não é possível se comparar as acurácias encontradas com o trabalho produzido por demais pesquisadores. Trabalhos que envolvam *machine learning* e movimentos oculares certamente são ainda necessários e têm sido desenvolvidos. Em breve, acredita-se que o diálogo entre os resultados obtidos nesse trabalho e a produção de demais laboratórios será possível.

Considerando-se a definição utilizada nesse trabalho de biomarcador como uma medida biológica quantificável que indique alteração (geralmente declínio) na performance de um indivíduo (Strimbu & Tavel, 2010), a sensibilidade dos classificadores treinados indica ser

⁸ É bastante conhecida na literatura o uso de *machine learning* para identificação e categorização de faces, objetos, palavras, frases e linguagem de maneira geral. Entretanto, especificamente para métricas oculares (sacadas, fixações, trajetória visual, etc), não.

possível a utilização de movimentos oculares como tal. Neste estudo, os classificadores de *machine learning* desenvolvidos captaram a diferença de movimentos oculares conforme o treinamento recebido por pilotos e foram capazes de identificar tal treinamento. Isso indica que os movimentos oculares dos pilotos refletem aquilo com o que interagem no ambiente e as mudanças encobertas acarretadas por tais interações. Certamente, há ainda muito o que se crescer em relação ao conceito de movimentos oculares como biomarcadores. Entretanto, não se deve negligenciar o fato de que os mesmos têm sido apontados como potencial biomarcador em diversos estudos (Di Stasi, McCamy, et al., 2016; Di Stasi et al., 2011; Macknik et al., 2013; Vendetti et al., 2017), inclusive este, e que os bons resultados no uso de tecnologias relativas a Inteligência Artificial e *machine learning* sustenta a ideia de que movimentos oculares expressam de forma quantificada e sistematizada fenômenos relativos ao processamento cerebral.

Por fim, cabe, também, referenciar nessa discussão a limitação tecnológica encontrada na coleta de dados. O *eye tracker* utilizado no estudo registra movimentos oculares com uma taxa de apenas 60 Hz. Ele tornou-se útil e interessante para esse estudo, especificamente, por ser portátil e de fácil adaptação ao local onde os dados foram coletados. Logo, foi possível que o estudo se tornasse praticável. A utilização de um *eye tracker* mais preciso, porém que necessitasse ser instalado em uma mesa, não atenderia a necessidade experimental do estudo. Entretanto, apesar de vantajoso nesse aspecto, o instrumento não permite o registro de todos os movimentos oculares, como microsacadas, por exemplo; além de não ser tão eficaz em sua taxa de registro (Hansen & Hammoud, 2007). Assim sendo, para um estudo com poucos participantes, torna-se difícil comparar grupos em aspectos relacionados a tarefas de alta precisão. Logicamente o estudo permite comparar grupos de forma geral e a

quantidade de dados de movimentos oculares é imensa. Entretanto, tratando-se de tarefas onde uma delicada diferença pode indicar o resultado que se espera obter, é possível que a eficácia e a precisão do instrumento possam ser influentes. Infelizmente, não existe, ainda, melhores opções instrumentais disponíveis que mantenham a portabilidade, com melhor taxa de registro (Richardson & Spivey, 2004; Vertegaal, Slagter, Van Der Veer, & Nijholt, 2001).

Discussão Geral

Principais achados

Dois experimentos compuseram esta tese, ambos com pilotos de helicóptero utilizando um simulador de voo. Registrou-se seus movimentos oculares para que, então, se pudesse verificar se diferentes complexidades de voo ou diferentes expertises afetam as métricas oculares. No segundo experimento, apresentou-se aos participantes um vídeo com um piloto expert desempenhando as mesmas tarefas que eles foram convidados a executar. Assim, objetivou-se comparar o desempenho dos grupos que assistiram ao vídeo com e sem a indicação dos movimentos oculares do expert.

De forma geral, foram observadas diferenças entre os grupos de ambos os experimentos, o que indica o potencial uso dos movimentos oculares para investigar a diferença do nível de treinamento de pilotos e da complexidade da tarefa que lhes é apresentada. Os resultados também definiram o potencial dos movimentos oculares como ferramentas para o treinamento de novos pilotos, dado seu potencial para transmitir ao piloto em treinamento informações valiosas sobre como o expert toma decisões e maneja os desafios encontrados ao longo de um voo. Pode-se dizer que movimentos oculares são úteis até mesmo para a identificação de possíveis erros na execução de tarefas durante um voo. Assim, na medida em que se estabelecerem novas tecnologias que forneçam feedback em tempo real para os pilotos, tais erros podem vir a ser evitados. Movimentos oculares oferecem, então, suporte para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Merece destaque o uso dos movimentos oculares para o desenvolvimento de classificadores com base em *machine learning*. Quanto a isso, o presente estudo oferece

resultados que sugerem a aplicabilidade dos movimentos oculares para o desenvolvimento de plataformas e métodos de treinamento futuros. Assim, sendo os movimentos oculares biomarcadores para a potencial habilidade do piloto, classificadores podem identificar e classifica-los de acordo com o parâmetro desejado (por exemplo, piloto expert ou novato; ou pilotos com uma habilidade X desenvolvida ou não). Em breve, acredita-se que um piloto poderá receber treinamento adequado para seu nível de habilidade.

Implicações teóricas

Os dados coletados sustentam a ideia de que o processamento visual acontece de forma holística, pois a simples captação da informação das partes não oferece aos pilotos as informações necessárias para executar os procedimentos de voo. Isso fica claro no uso do *cockpit*, pois a simples visualização de um instrumento de voo é pouco informativo para a tarefa de pilotar. Pilotos revisitam as áreas mais importantes diversas vezes em busca manter uma visão integral, mas dinâmica, do *cockpit*.

Experts e novatos executaram a tarefa de forma diferenciada, sendo que o processamento de funções cognitivas altas, como tomada de decisões, realmente parece estar envolvido com a expertise, como afirma a literatura. O conceito de aprendizagem perceptual também tem sido relacionado à aprendizagem. Esse trabalho oferece suporte à ideia de que tal aprendizagem é fundamental para o desenvolvimento de expertise em pilotos, devendo ser incorporado de forma mais robusta no treinamento dos novatos.

Finalmente, este trabalho deparou-se com novos aspectos do conceito de fadiga cognitiva. Até recentemente, era considerado que a fadiga cognitiva era resultado de tarefas de alta demanda cognitiva, tendo como resultados o declínio da performance, diminuição da atenção

e declínio em parâmetros oculares como a sequência principal. Neste estudo, não foi observada fadiga cognitiva no tangente aos aspectos clássicos da mesma. Entretanto, a literatura recente propõe uma mudança nesse conceito, abrangendo-o para a relação esforço/recompensa. Assim, como também visto neste estudo, a medida em que o cérebro identifica mudanças no ambiente, fadiga cognitiva é gerada como uma ferramenta sinalizadora de que as recompensas obtidas por uma tarefa já não valem o esforço de desempenhar a tarefa em questão.

Implicações clínicas e aplicadas

Ao se pensar na aplicabilidade clínica do presente estudo, dois pontos não devem poder deixar de ser abordados. Primeiro, a medida em que este estudo identificou potenciais erros de escaneamento do *cockpit* por parte de pilotos, a remodelação ergonômica do *cockpit* passa a ser uma boa proposta. O aumento de contraste e dinamicidade em áreas para onde os pilotos deveriam devotar sua atenção pode auxiliá-los a identificar os objetos-alvo para os quais devem fixar seu olhar. Tais melhorias tenderiam a facilitar também o uso de aprendizagem categórica no treinamento de pilotos. Por exemplo, o aumento de realce de ponteiros pode facilitar o treinamento de piloto quanto ao treino de reconhecimento de orientações.

Em segundo lugar, dada a natureza aplicada das propostas de *machine learning*, o uso de movimentos oculares como classificadores traz ampla inovação acessível à indústria aeronáutica e militar. É possível o uso de bancos de dados, como o formado a partir desse trabalho, para desenvolver tecnologias capazes de oferecer feedback em tempo real aos pilotos. Essa novidade, potencialmente, oferece aos mesmos a opção de identificar possíveis desvios em sua performance e corrigi-los antes que um erro seja estabelecido, por exemplo.

Limitações

Um dos fatores limitantes do estudo é o baixo número de participantes. Apesar de esta ser uma barreira intransponível no caso deste estudo em particular, dadas às condições limitadas de espaço e disponibilidade dos participantes, certamente interfere no resultado final.

O equipamento utilizado para a coleta dos dados também é, de certa forma, uma barreira para o estudo. Foi ideal para a coleta desses dados devido a sua portabilidade. Assim, pode-se coletar os dados no verdadeiro local de treinamento dos pilotos, durante a execução de uma tarefa real. Entretanto, a taxa de registro de apenas 60 Hz impede a coleta de movimentos oculares como microsacadas, as quais poderiam oferecer informações relevantes a respeito do direcionamento da atenção, por exemplo. Também se perde precisão e acurácia nos registros, uma vez que só há o registro dos movimentos a cada 0,16 ms.

Direções futuras

Há necessidade do desenvolvimento de melhores tecnologias para a coleta e estudos de movimentos oculares. Atualmente, apesar de existirem *eye trackers* que obtêm informações de movimentos oculares em alta frequência, *eye trackers* portáteis ainda coletam dados em baixa frequência. O desenvolvimento de tecnologias que permitam maior flexibilidade para equipamentos de melhor alcance e precisão é necessário para a coleta de mais e melhores dados. No caso desse estudo, por exemplo, maior quantidade de dados e maior precisão nos dados coletados poderia ter permitido o desenvolvimento de um classificador com melhor acurácia. Pensando-se no uso dessa metodologia para o treinamento de futuros pilotos, a melhora na qualidade dos dados fornecidos à pesquisa básica é ainda mais importante.

Finalmente, o presente estudo deixa claro o potencial de uso dos movimentos oculares para o desenvolvimento de novos métodos de treinamento e prática para pilotos. Movimentos oculares permitem a identificação de erros, estratégias e o monitoramento do desempenho em tempo real. Abrem, também, campo para o desenvolvimento de tecnologias de treinamento e alcance de expertise entre pilotos. Há, pois, necessidade de investimento em estudos nas áreas de neurociências, psicologia, fisiologia ocular, engenharia, matemática e ciências da computação para que os sustentáculos de tais progressos sejam estabelecidos.

Referências

- Ackerman, P. L. (2011). *Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. Washington: APA.
- Adler, F. H., & Fliegelman, A. B. (1934). Influence of fixation on the visual acuity. *Archives of Ophthalmology*, 12(4), 475–483. <http://doi.org/10.1001/archoph.1934.00830170013002>
- Ahlstrom, C., Nyström, M., Holmqvist, K., Fors, C., Sandberg, D., Anund, A., ... Åkerstedt, T. (2013). Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: Eye movements improve the sleep/wake predictor. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 20–32. <http://doi.org/10.1016/j.trc.2012.07.008>
- Alzubaidi, M., Black, J. A., Patel, A., & Panchanathan, S. (2009). Conscious vs. subconscious perception, as a function of radiological expertise. In *IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*. <http://doi.org/10.1109/CBMS.2009.5255353>
- Alzubaidi, M., Patel, A., Panchanathan, S., & Black, Jr., J. a. (2010). Reading a radiologist's mind: Monitoring rising and falling interest levels while scanning chest x-rays. In *SPIE - Medical Imaging 2010: Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment* (Vol. 7627). <http://doi.org/10.1117/12.844521>
- Amitay, S., Zhang, Y.-X., Jones, P. R., & Moore, D. R. (2014). Perceptual learning: Top to bottom. *Vision Research*, 99, 69–77. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2013.11.006>
- Anderson, N. C., Anderson, F., Kingstone, A., & Bischof, W. F. (2015). A comparison of scanpath comparison methods. *Behavior Research Methods*, 47(4), 1377–1392. <http://doi.org/10.3758/s13428-014-0550-3>
- Appelbaum, L. G., Schroeder, J. E., Cain, M. S., & Mitroff, S. R. (2011). Improved visual cognition through stroboscopic training. *Frontiers in Psychology*, 2(10), 276. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00276>
- Augusto, A., & Campos, T. de. (2010). Movimentos sacádicos em indivíduos com alterações cerebelares. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 76(1), 51–58. <http://doi.org/10.1590/S1808-86942010000100010>
- Bahill, A. T., Clark, M. R., & Stark, L. (1975). The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, 24, 191–204. [http://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90075-9](http://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90075-9)
- Bahill, A. T., & Stark, L. (1975). Neurological control of horizontal and vertical components of oblique saccadic eye movements. *Mathematical Biosciences*, 27, 287–298. [http://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90107-8](http://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90107-8)
- Bahill, A. T., & Stark, L. (1977). Oblique saccadic eye movements: Independence of horizontal

- and vertical channels. *Archives of Ophthalmology*, 95(7), 1258–1261.
<http://doi.org/10.1001/archophth.1977.04450070156016>
- Baluch, F., & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neurosciences*, 34(4), 210–224. <http://doi.org/10.1016/j.tins.2011.02.003>
- Barreto, A. M. (2012). Eye tracking como método de investigação aplicado às ciências da comunicação. *Revista Comunicando*, 1(1), 168–186.
- Baxter, G., Besnard, D., & Riley, D. (2007). Cognitive mismatches in the cockpit: Will they ever be a thing of the past? *Applied Ergonomics*, 38(4), 417–423.
<http://doi.org/10.1016/j.apergo.2007.01.005>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2008). *Neurociências: Desvendando o sistema nervoso*. Porto Alegre: Artmed.
- Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A., & Montanari, R. (2011). Driver workload and eye blink duration. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(3), 199–208. <http://doi.org/10.1016/j.trf.2010.12.001>
- Betta, E., & Turatto, M. (2006). Are you ready? I can tell by looking at your microsaccades. *Neuroreport*, 17(10), 1001–1004.
- Bilalić, M. (2017). *The neuroscience of expertise*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bilalić, M., Langner, R., Erb, M., & Grodd, W. (2015). Neural implementations of expertise. *Frontiers in Human Neuroscience*, 139(4), 728–742. <http://doi.org/10.1037/a0020756>
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107–116.
<http://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011>
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2006). Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*, 72(2), 123–132.
<http://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>
- Briand, K. A., & Klein, R. M. (1987). Is Posner’s “beam” the same as Treisman’s “glue”? On the relation between visual orienting and feature integration theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(2), 228–241.
<http://doi.org/10.1037/0096-1523.13.2.228>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. Oxford: Pergamon Press.
- Brochard, R., Dufour, A., & Després, O. (2004). Effect of musical expertise on visuospatial abilities: Evidence from reaction times and mental imagery. *Brain and Cognition*, 54(2), 103–109. [http://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00264-1](http://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00264-1)
- Burr, D., & Morrone, M. C. (2005). Eye movements: Building a stable world from glance to

glance. *Current Biology*, 15(20), 839–840. <http://doi.org/10.1016/B978-008044980-7/50012-4>

Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2007). Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science*, 315(5820), 1860–1862. <http://doi.org/10.1126/science.1138071>

Caldwell, Jr., J. A., Caldwell, J. L., Brown, D. L., & Smith, J. K. (2004). The effects of 37 hours of continuous wakefulness on the physiological arousal, cognitive performance, self-reported mood, and simulator flight performance of F-117A pilots. *Military Psychology*, 16(3), 163–181. http://doi.org/10.1207/s15327876mp1603_2

Caldwell, J. A. (2001). Efficacy of stimulants for fatigue management: The effects of Provigil® and Dexedrine® on sleep-deprived aviators. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 4(1), 19–37. [http://doi.org/10.1016/S1369-8478\(01\)00011-0](http://doi.org/10.1016/S1369-8478(01)00011-0)

Caldwell, J. A. (2005). Fatigue in aviation. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 3(2), 85–96. <http://doi.org/10.1016/j.tmaid.2004.07.008>

Caldwell, J. A. (2012). Crew schedules, sleep deprivation, and aviation performance. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 85–89. <http://doi.org/10.1177/0963721411435842>

Caldwell, J. A., Mallis, M. M., Caldwell, J. L., Paul, M. A., Miller, J. C., & Neri, D. F. (2009). Fatigue countermeasures in aviation. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 80(1), 29–59. <http://doi.org/10.3357/ASEM.2435.2009>

Caldwell, J. L., & Gilreath, S. R. (2001). Work and sleep hours of U.S. Army aviation personnel working reverse cycle. *Military Medicine*, 166, 159–166.

Campitelli, G., Gobet, F., & Bilalić, M. (2014). Cognitive processes and development of chess genius: An integrative approach. In D. K. Simonton (Ed.), *The Wiley handbook of genius* (pp. 350–374). <http://doi.org/10.1002/9781118367377.ch17>

Carlson, N. R. (2002). *Sensação e percepção*. Rio de Janeiro: Manole.

Carpenter, R. H. S. (1988). *Movements of the eyes*. London: Pion Limited.

Carpenter, R. H. S., & Williams, M. L. L. (1995). Neural computation of log likelihood in control of saccadic eye movements. *Nature*. <http://doi.org/10.1038/377059a0>

Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1484–1525. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>

Casner, S. M. (2009). Perceived vs. measured effects of advanced cockpit systems on pilot workload and error: Are pilots' beliefs misaligned with reality? *Applied Ergonomics*, 40(3), 448–456. <http://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.10.002>

- Cerezuela, G. P., Tejero, P., Chóliz, M., Chisvert, M., & Monteagudo, M. J. (2004). Wertheim's hypothesis on "highway hypnosis": Empirical evidence from a study on motorway and conventional road driving. *Accident Analysis and Prevention*, *36*(6), 1045–1054. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2004.02.002>
- Chan, L. K. H., & Hayward, W. G. (2009). Feature integration theory revisited: Dissociating feature detection and attentional guidance in visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*(1), 119–32. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.35.1.119>
- Christodoulou, C., DeLuca, J., Ricker, J. H., Madigan, N. K., Bly, B. M., Lange, G., ... Ni, A. C. (2001). Functional magnetic resonance imaging of working memory impairment after traumatic brain injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, *71*(2), 161–168.
- Cooke, L. (2005). Eye tracking: How it works and how it relates to usability. *Technical Communication*, *52*(4), 456–463.
- Cope, H. (1992). Fatigue: a non-specific complaint? *Review of Psychiatry*, *4*, 273–280.
- Corbetta, M., Akbudak, E., Conturo, T. E., Snyder, A. Z., Ollinger, J. M., Drury, H. a., ... Shulman, G. L. (1998). A common network of functional areas for attention and eye movements. *Neuron*, *21*(4), 761–773. [http://doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)80593-0](http://doi.org/10.1016/S0896-6273(00)80593-0)
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 201–215. <http://doi.org/10.1038/nrn755>
- DeLuca, J. (2005). *Fatigue as a window to the brain*. Cambridge: MIT Press.
- Deluca, J., Genova, H. M., Hillary, F. G., & Wylie, G. (2008). Neural correlates of cognitive fatigue in multiple sclerosis using functional MRI, *270*, 28–39. <http://doi.org/10.1016/j.jns.2008.01.018>
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, *70*(1), 80–90.
- Di Stasi, L. L., Antolí, A., & Cañas, J. J. (2011). Main sequence: An index for detecting mental workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics*, *42*(6), 807–813. <http://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.01.003>
- Di Stasi, L. L., Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., Sánchez Carrión, J. M., Martín Berrido, M., Olivares, G., & Catena, A. (2016). Gaze entropy reflects surgical task load. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, *30*(11), 5034–5043. <http://doi.org/10.1007/s00464-016-4851-8>
- Di Stasi, L. L., Diaz-Piedra, C., Suárez, J., McCamy, M. B., Martínez-Conde, S., Roca-Dorda, J., & Catena, A. (2015). Task complexity modulates pilot electroencephalographic activity during real flights. *Psychophysiology*, *52*(7), 951–957. <http://doi.org/10.1111/psyp.12419>

- Di Stasi, L. L., Mccamy, M. B., Martinez-conde, S., Gayles, E., Hoare, C., Foster, M., ... Macknik, S. L. (2016). Effects of long and short simulated flights on the saccadic eye movement velocity of aviators. *Physiology & Behavior*, *153*, 91–96. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.10.024>
- Di Stasi, L. L., McCamy, M. B., Pannasch, S., Renner, R., Catena, A., Cañas, J. J., ... Martinez-Conde, S. (2015). Effects of driving time on microsaccadic dynamics. *Experimental Brain Research*, *233*(2), 599–605. <http://doi.org/10.1007/s00221-014-4139-y>
- Dinges, D. F., Graeber, R. C., Rosekind, M. R., Samel, A., & Wegmann, H. M. (1996). *Principles and guidelines for duty and rest scheduling in commercial aviation (NASA Technical Memorandum No. 110404)*. Moffett Field, CA.
- Dismukes, R. K., Berman, B. A., & Loucopoulos, L. D. (2016). *The Limits of Expertise: Rethinking Pilot Error and the Causes of Airline Accidents*. New York: Routledge.
- Ditchburn, R. W., & Ginsborg, B. L. (1953). Involuntary eye movements during fixation. *Journal of Physiology*, *119*, 1–17.
- Dobryakova, E., DeLuca, J., Genova, H. M., & Wylie, G. R. (2013). Neural correlates of cognitive fatigue: Cortico-striatal circuitry and effort–reward imbalance. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *19*(8), 849–853. <http://doi.org/10.1017/S1355617713000684>
- Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *34*(4), 455–470. <http://doi.org/10.3758/BF03195475>
- Duchowski, A. T. (2017). *Eye tracking methodology: Theory and practice*. Clemson: Springer.
- Duchowski, A. T., Driver, J., Jolaoso, S., Tan, W., Ramey, B. N., & Robbins, A. (2010). Scanpath comparison revisited. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications - ETRA '10* (Vol. 1, p. 219). <http://doi.org/10.1145/1743666.1743719>
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology. General*, *113*(4), 501–17. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.113.4.501>
- Egley, R., Driver, J., & Rafal, R. D. (1994). Shifting visual attention between objects and locations: Evidence from normal and parietal lesions subjects. *Journal of Experimental Psychology. General*, *123*, 161–177.
- Engbert, R., & Kliegl, R. (2003). Microsaccades uncover the orientation of covert attention. *Vision Research*, *43*(9), 1035–1045. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(03\)00084-1](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(03)00084-1)
- Engbert, R., & Mergenthaler, K. (2006). Microsaccades are triggered by low retinal image slip. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(18), 7192–7. <http://doi.org/10.1073/pnas.0509557103>

- Ericsson, K. A. (2014). Creative genius: A view from the expert-performance approach. In D. K. Simonton (Ed.), *The Wiley handbook of genius*. (pp. 321–349).
<http://doi.org/10.1002/9781118367377.ch16>
- Ericsson, K. A., Charness, N., Feltovich, P. J., & Hoffman, R. R. (2006). *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Eriksen, C. W., & St. James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, *40*(4), 225–240.
<http://doi.org/10.3758/BF03211502>
- Eriksen, C. W., & Yeh, Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *11*(5), 583–597.
<http://doi.org/10.1037/0096-1523.11.5.583>
- Everling, S., Paré, M., Dorris, M. C., & Munoz, D. P. (1998). Comparison of the discharge characteristics of brain stem omnipause neurons and superior colliculus fixation neurons in monkey: Implications for control of fixation and saccade behavior. *Journal of Neurophysiology*, *79*(2), 511–528.
- Fawcett, J. M., Risko, E. F., & Kingstone, A. (2015). *The handbook of attention*. Cambridge: MIT Press.
- Feusner, M., & Lukoff, B. (2008). Testing for statistically significant differences between groups of scan patterns. In *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications - ETRA '08* (p. 43). <http://doi.org/10.1145/1344471.1344481>
- Finke, R. A. (1989). *Principles of Mental Imagery*. Cambridge: MIT Press.
- Galy, E., Cariou, M., & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology*, *83*(3), 269–275. <http://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023>
- Gancarz, G., & Grossberg, S. (1998). A neural model of the saccade generator in the reticular formation. *Neural Networks*, *11*, 1159–1174. [http://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00096-3](http://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00096-3)
- Gancarz, G., & Grossberg, S. (1999). A neural model of saccadic eye movement control explains task-specific adaptation. *Vision Research*, *39*(18), 3123–3143.
[http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00049-8](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00049-8)
- Ganel, T., Valyear, K. F., Goshen-gottstein, Y., & Goodale, M. A. (2005). The involvement of the “fusiform face area” in processing facial expression. *Neuropsychologia*, *43*, 1645–1654.
<http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.012>
- Gauthier, I., Tarr, M. J., Anderson, A. W., Skudlarski, P., & Gore, J. C. (1999). Activation of the middle fusiform “face area” increases with expertise in recognizing novel objects. *Nature Neuroscience*, *2*(6), 568–73. <http://doi.org/10.1038/9224>

- Gauthier, I., Williams, P., Tarr, M. J., & Tanaka, J. (1998). Training “greeble” experts: A framework for studying expert object recognition processes. *Vision Research*, 38(15–16), 2401–2428. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00442-2](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00442-2)
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2013). *Cognitive neuroscience: The biology of the mind*. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- Geitgey, A. (2014). Machine learning is fun! Retrieved January 1, 2016, from <https://medium.com/@ageitgey/machine-learning-is-fun-80ea3ec3c471>
- Gibson, E. J. (1967). *Principles of perceptual learning and development*. New York: Meredith Corporation.
- Gibson, J. J. (1941). A critical review of the concept of set in contemporary experimental psychology. *Psychological Bulletin*, 38(9), 781–817.
- Greschner, M., Bongard, M., Rujan, P., & Ammermüller, J. (2002). Retinal ganglion cell synchronization by fixational eye movements improves feature estimation. *Nature Neuroscience*, 5, 341–347. <http://doi.org/10.1038/nn821>
- Grossman, G. E., & Robinson, D. A. (1988). Ambivalence in modelling oblique saccades. *Biological Cybernetics*, 58, 13–18. <http://doi.org/10.1007/BF00363952>
- Guida, A., Gobet, F., & Nicolas, S. (2013). Functional cerebral reorganization: A signature of expertise? Reexamining Guida, Gobet, Tardieu, and Nicolas’ (2012) two-stage framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1–5. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00590>
- Hafed, Z. M. (2013). Alteration of visual perception prior to microsaccades. *Neuron*, 77(4), 775–786. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.12.014>
- Hafed, Z. M., & Clark, J. J. (2002). Microsaccades as an overt measure of covert attention shifts. *Vision Research*, 42(22), 2533–2545. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00263-8](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00263-8)
- Hafed, Z. M., Goffart, L., & Krauzlis, R. J. (2009). A neural mechanism for microsaccade generation in the primate superior colliculus. *Science*, 323(5916), 940–943. <http://doi.org/10.1126/science.1166112>
- Hambrick, D. Z., Campitelli, G., & Macnamara, B. M. (2017). *The science of expertise: Behavioral, neural, and genetic approaches to complex skill*. New York: Routledge.
- Hansen, D. W., & Hammoud, R. I. (2007). An improved likelihood model for eye tracking. *Computer Vision and Image Understanding*, 106(2–3), 220–230. <http://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.06.012>
- Harris, D., Stanton, N. A., Marshall, A., Young, M. S., Demagalski, J., & Salmon, P. (2005). Using SHERPA to predict design-induced error on the flight deck. *Aerospace Science and Technology*, 9(6), 525–532. <http://doi.org/10.1016/j.ast.2005.04.002>

- Hayhoe, M. M. (2004). Advances in Relating Eye Movements and Cognition. *Infancy*, 6(2), 267–274. http://doi.org/10.1207/s15327078in0602_7
- Helmholtz, H. Von. (1925). *Tratado de Fisiologia Óptica*. Rochester: Dover Phoenix. (Originalmente publicado em 1867).
- Henderson, J. M., & Hollingworth, A. (1999). High-level scene perception. *Annual Review of Psychology*, 50, 243–271. <http://doi.org/10.1146/annurev.psych.50.1.243>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. New York: Oxford University Press.
- Holmqvist, K., Nyström, M., & Fiona, M. (2012). Eye tracker data quality: What it is and how to measure it. In *Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (Vol. 1, pp. 45–52). Santa Barbara-CA. <http://doi.org/10.1145/2168556.2168563>
- Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H., & Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, 3(3), 284–291. <http://doi.org/10.1038/72999>
- Hubel, D. H. (1988). *Eye, brain, and vision*. New York: Scientific American Library.
- International Labour Organization. (2011). Mental Fatigue. In *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety* (5a ed., pp. 1643–1662). ILO.
- James, W. (1981). *The Principles of Psychology (Vol I)*. Cambridge: Harvard University Press. (Obra original publicada em 1890).
- Jarodzka, H., Holmqvist, K., & Nyström, M. (2010). A vector-based, multidimensional scanpath similarity measure. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications - ETRA '10* (Vol. 1, p. 211). <http://doi.org/10.1145/1743666.1743718>
- Jiao, F., & He, G. (2007). Real-time eye detection and tracking under various light conditions. *Data Science Journal*, 6, 636–640. <http://doi.org/10.2481/dsj.6.S636>
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255–260. <http://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
- Kagan, I., & Haged, Z. M. (2013). Active vision: Microsaccades direct the eye to where it matters most. *Current Biology*, 23(17), 712–714. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2013.07.038>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2013). *Principles of neural science*. Palatino: McGraw Hill.
- Kaneko, C. R. S., Binder, M. D., Nobutaka, H., & Windhorst, U. (2009). Omnipause neurons. In *Encyclopedia of Neuroscience* (pp. 3026–3030). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2>
- Kawato, M., Lu, Z.-L., Sagi, D., Sasaki, Y., Yu, C., & Watanabe, T. (2014). Perceptual learning

- The past, present and future. *Vision Research*, 99, 1–4.
<http://doi.org/10.1016/j.visres.2014.05.002>
- Kliegl, R., Nuthmann, A., & Engbert, R. (2006). Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135(1), 12–35. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.135.1.12>
- Ko, H.-K. (2010). *Eye movements in high acuity tasks (tese de doutorado)*. Disponível no banco de teses e dissertações ProQuest. University of Boston.
- Ko, H.-K., Poletti, M., & Rucci, M. (2010). Microsaccades precisely relocate gaze in a high visual acuity task. *Nature Neuroscience*, 13(12), 1549–1553. <http://doi.org/10.1038/nn.2663>
- Kosslyn, S. M. (1988). Aspects of cognitive neuroscience of mental imagery. *Science*, 240(4859), 1621–1626.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain*. Cambridge: MIT Press.
- Kovach, C. K., & Adolphs, R. (2014). Investigating attention in complex visual search. *Vision Research*, 116, 127–141. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2014.11.011>
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1457–1483. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2010.12.014>
- Kowler, E., & Collewijn, H. (2010). The eye on the needle. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(12), 1443–1444. <http://doi.org/10.1038/nrn1210-1443>
- Kowler, E., & Steinman, R. M. (1979). Miniature saccades: Eye movements that do not count. *Vision Research*, 19, 105–108.
- Kramer, A. F., & Hahn, S. (1995). Splitting the beam: Distribution of attention over noncontiguous regions of the visual field. *Psychological Science*, 6(6), 381–386. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00530.x>
- Kramer, A. F., & Jacobson, A. (1991). Perceptual organization and focused attention: The role of objects and proximity in visual processing. *Perception & Psychophysics*, 50(3), 267–284. <http://doi.org/10.3758/BF03206750>
- Land, M. F. (2006). Eye movements and the control of actions in everyday life. *Progress in Retinal and Eye Research*, 25(3), 296–324. <http://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2006.01.002>
- Le Meur, O., & Liu, Z. (2015). Saccadic model of eye movements for free-viewing condition. *Vision Research*, 116, 152–164. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2014.12.026>
- Leigh, R. J., & Zee, D. S. (2015). *The neurology of eye movements*. Oxford: Oxford University Press. <http://doi.org/10.1093/med/9780199969289.001.0001>
- Litchfield, D., & Donovan, T. (2016). Worth a quick look? Initial scene previews can guide eye movements as a function of domain-specific expertise but can also have unforeseen costs.

Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 42(7), 982–994.
<http://doi.org/10.1037/xhp0000202>

- Liversedge, S., & Findlay, J. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 6–14. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01418-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01418-7)
- Liversedge, S. P., Gilchrist, I. D., & Everling, S. (2011). *The Oxford handbook of eye movements*. New York: Oxford University Press.
- Lorist, M. M. (2008). Impact of top-down control during mental fatigue. *Brain Research*, 1232, 113–123. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.053>
- Lorist, M. M., Boksem, M. A. S., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 199–205. <http://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018>
- Lou, Y., Liu, Y., Kaakinen, J. K., & Li, X. (2017). Using support vector machines to identify literacy skills: Evidence from eye movements. *Behavior Research Methods*, 49(3), 887–895. <http://doi.org/10.3758/s13428-016-0748-7>
- Macknik, S. L., Di, L. L., Catena, A., Ca, J. J., Martinez-Conde, S., Di Stasi, L. L., ... Martinez-Conde, S. (2013). Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(5), 968–975. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.011>
- Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2007). The role of feedback in visual masking and visual processing. *Advances in Cognitive Psychology*, 3(1–2), 125–152. <http://doi.org/10.2478/v10053-008-0020-5>
- Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2009). The role of feedback in visual attention and awareness. In M. Gazzaniga (Ed.), *Cognitive Neuroscience*. Cambridge-MA: MIT Press.
- Malcolm, G. L. (2010). Combining top-down processes to guide eye movements during real-world scene search. *Journal of Vision*, 10(2), 1–11. <http://doi.org/10.1167/10.2.4>
- Martinez-Conde, S., & Macknik, S. L. (2015). From exploration to fixation: An integrative view of Yarbus's vision. *Perception*, 44(8–9), 884–899. <http://doi.org/10.1177/0301006615594963>
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews. Neuroscience*, 5(3), 229–40. <http://doi.org/10.1038/nrn1348>
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., Troncoso, X. G., & Dyar, T. A. (2006). Microsaccades counteract visual fading during fixation. *Neuron*, 49(2), 297–305. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.11.033>
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., Troncoso, X. G., & Hubel, D. H. (2009). Microsaccades: A

- neurophysiological analysis. *Trends in Neurosciences*, 32, 463–475.
<http://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.006>
- Martinez-Conde, S., Otero-Millan, J., & Macknik, S. L. (2013). The impact of microsaccades on vision: Towards a unified theory of saccadic function. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(2), 83–96. <http://doi.org/10.1038/nrn3405>
- Martinez-Conde, S., & Macknik, S. L. (2014). Visual system. In Gale (Ed.), *Discoveries in Modern Science: Exploration, Invention, Technology* (pp. 1188–1191). New York: Macmillan Publishing.
- McCamy, M. B., Otero-millan, J., Di Stasi, L. L., Macknik, S. L., Martinez-conde, S., Luigi, L., ... Martinez-conde, S. (2014). Highly informative natural scene regions increase microsaccade production during visual scanning. *The Journal of Neuroscience*, 34(8), 2956–66. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4448-13.2014>
- McCamy, M. B., Otero-Millan, J., Macknik, S. L., Yang, Y., Troncoso, X. G., Baer, S. M., ... Martinez-Conde, S. (2012). Microsaccadic efficacy and contribution to foveal and peripheral vision. *Journal of Neuroscience*, 32(27), 9194–9204.
<http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0515-12.2012>
- McIntire, L. K., McKinley, R. A., Goodyear, C., & McIntire, J. P. (2014). Detection of vigilance performance using eye blinks. *Applied Ergonomics*, 45(2), 354–362.
<http://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.020>
- Melcher, D., & Morrone, C. (2007). Transsaccadic memory: Building a stable world from glance to glance. In R. P. G. van Gompel, M. H. Fischer, W. S. Murray, & R. L. Hill (Eds.), *Eye movements: A window on mind and brain*. Amsterdam: Elsevier.
- Miller, J. C. C., & Melfi, M. L. (2006). *Causes and effects of fatigue in experienced military aircrew*. Brooks City.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (2006). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.
- Montalvo, F., Kozachuk, J., Rupp, M. A., & McConnell, D. S. (2016). Examining methods to induce cognitive fatigue. In *Human Factors and Applied Psychology Conference* (pp. 1–15).
- Morris, T. L., & Miller, J. C. (1996). Electrooculographic and performance indices of fatigue during simulated flight. *Biological Psychology*, 42, 343–360.
- Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience*, 8(7), 950–954. <http://doi.org/10.1038/nn1488>
- Munoz, D. P., Dorris, M. C., Pare, M., & Everling, S. (2000). On your mark, get set: Brainstem circuitry underlying saccadic initiation. *Canadian Journal of Physiology Pharmacology*, 78(11), 934–944. <http://doi.org/10.1139/y00-062>

- Munoz, D. P., & Everling, S. (2004). Look away: The anti-saccade task and the voluntary control of eye movement. *Nature Reviews. Neuroscience*, 5, 218–228. <http://doi.org/10.1038/nrn1345>
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Neville, K. J., Bisson, R. U., French, J., Boll, P. A., & Storm, W. F. (1994). Subjective fatigue of C-141 aircrews during Operation Desert Storm. *Human Factors*, 36(2), 339–349.
- Nicol, J. (2014). Spatial Attention. In K. N. Ochsner & S. M. Kosslyn (Eds.), *The Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience, Vol I* (pp. 237–254). New York: Oxford University Press.
- Noton, D., & Stark, L. (1971). Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns. *Vision Research*, 11(9), 929–42. [http://doi.org/10.1016/0042-6989\(71\)90213-6](http://doi.org/10.1016/0042-6989(71)90213-6)
- Nyström, M., Andersson, R., Holmqvist, K., & van de Weijer, J. (2013). The influence of calibration method and eye physiology on eyetracking data quality. *Behavior Research Methods*, 45(1), 272–288. <http://doi.org/10.3758/s13428-012-0247-4>
- Ochsner, K. N., & Kosslyn, S. M. (2014). *The Oxford handbook of cognitive neuroscience*. New York: Oxford University Press.
- Oliva, A., & Torralba, A. (2006). Building the gist of a scene: The role of global image features in recognition. *Progress in Brain Research*, 155, Part, 23–36. [http://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)55002-2](http://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)55002-2)
- Otero-Millan, J., Macknik, S. L., Langston, R. E., & Martinez-Conde, S. (2013). An oculomotor continuum from exploration to fixation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(15), 6175–80. <http://doi.org/10.1073/pnas.1222715110>
- Otero-Millan, J., Macknik, S. L., Serra, A., Leigh, R. J., & Martinez-Conde, S. (2011). Triggering mechanisms in microsaccade and saccade generation: A novel proposal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1233(1), 107–116. <http://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06177.x>
- Otero-Millan, J., Troncoso, X. G., Macknik, S. L., Serrano-Pedraza, I., & Martinez-Conde, S. (2008). Saccades and microsaccades during visual fixation, exploration, and search: Foundations for a common saccadic generator. *Journal of Vision*, 8(14), 1–18. <http://doi.org/10.1167/9.8.447>
- Paradiso, M. A., Meshi, D., Pisarcik, J., & Levine, S. (2012). Eye movements and visual perception. *Journal of Vision*, 12(13), 1–14. <http://doi.org/10.1167/12.13.11.Introduction>
- Pattyn, N., Neyt, X., Henderickx, D., & Soetens, E. (2008). Psychophysiological investigation of vigilance decrement: Boredom or cognitive fatigue? *Physiology and Behavior*, 93(1–2), 369–378. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.09.016>

- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Mental workload and driving. *Frontiers in Psychology*, 5(12), 1–11. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01344>
- Poggio, T. A., & Anselmi, F. (2016). *Visual Cortex and Deep Networks: Learning Invariant Representations*. Cambridge-MA: MIT Press.
- Posner, M. I. (2012). *Cognitive Neuroscience of Attention*. New York: Guilford Press.
- Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. Bowhuis (Eds.), *Attention and performance X* (pp. 531–556). Hillsdale: Erlbaum. <http://doi.org/10.1162/jocn.1991.3.4.335>
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Reviews of Neuroscience*, 13, 25–42. <http://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Posner, Snyder, & Davidson. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109(2), 160–174. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.109.2.160>
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., & White, L. E. (2012). *Neuroscience*. Sunderland: Sinauer.
- Ratliff, F., & Riggs, L. (1950). Involuntary motions of the eye during monocular fixation. *Journal of Experimental Psychology*, 40(6), 687–701. <http://doi.org/10.1037/h0057754>
- Ricciardelli, P., Baylis, G., & Driver, J. (2000). The positive and negative of human expertise in gaze perception. *Cognition*, 77(1), 1–14. [http://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00092-5](http://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00092-5)
- Richardson, D. C., & Spivey, M. J. (2004). Eye-tracking: Characteristics and methods (part 1) and Eye-tracking: Research areas and applications (part 2). In *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering* (pp. 1–32). <http://doi.org/10.1081/E-EBBE-120013920>
- Robinson, D. A. (1968). The oculomotor control system: A review. *Proceedings of the IEEE*, 56(6), 1032–1049. <http://doi.org/10.1109/PROC.1968.6455>
- Robinson, D. A. (1973). Models of the saccadic eye movement control system. *Kybernetik*, 14(2), 71–83. <http://doi.org/10.1007/BF00288906>
- Rolfs, M. (2009). Microsaccades: Small steps on a long way. *Vision Research*, 49(20), 2415–2441. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2009.08.010>
- Rolfs, M., Kliegl, R., & Engbert, R. (2008). Toward a model of microsaccade generation: The case of microsaccadic inhibition. *Journal of Vision*, 8(11), 1–23. <http://doi.org/10.1167/8.11.5>
- Rolfs, M., Knapen, T., & Cavanagh, P. (2010). Global saccadic adaptation. *Vision Research*, 50(18), 1882–1890. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2010.06.010>
- Rosekind, M. R., Gregory, K. B., Miller, D. L., & Dinges, D. F. (2000). *Crew factors in flight operations XII: A survey of sleep quantity in on-board crew rest facilities (NASA/TM-2000-*

209611).

- Rossion, B., & Retter, T. L. (2015). Holistic face perception: Mind the gap! *Visual Cognition*, 23(3), 379–398. <http://doi.org/10.1080/13506285.2014.1001472>
- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: Where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews*, 35(2), 146–160. [http://doi.org/10.1016/S0165-0173\(01\)00044-3](http://doi.org/10.1016/S0165-0173(01)00044-3)
- Saß, S., Schütte, K., & Lindner, M. A. (2017). Test-takers' eye movements: Effects of integration aids and types of graphical representations. *Computers and Education*, 109, 85–97. <http://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.02.007>
- Schall, J. D. (2004). On the role of frontal eye field in guiding attention and saccades. *Vision Research*, 44(12), 1453–1467. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2003.10.025>
- Schiller, P. H., True, S. D., & Conway, J. L. (1980). Deficits in eye movements following frontal eye-field and superior colliculus ablations. *Journal of Neurophysiology*, 44(6), 1175–1189.
- Scudder, C. A. (1988). A new local feedback model of the saccadic burst generator. *Journal of Neurophysiology*, 59(5), 1455–75.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <http://doi.org/10.1145/584091.584093>
- Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2000). *The human factors analysis and classification system - HFACS*. Washington.
- Shibata, K., Sasaki, Y., Kawato, M., & Watanabe, T. (2016). Neuroimaging evidence for 2 types of plasticity in association with visual perceptual learning. *Cerebral Cortex*, 26(9), 3681–3689. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhw176>
- Silva, F. P. (2014). Mental workload, task demand and driving performance: What relation? *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 162, 310–319. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.212>
- Snowden, R., Thopson, P., & Troscianko, T. (2012). *Basic vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Soetedjo, R., Kaneko, C. R. S., & Fuchs, A. F. (2002). Evidence that the superior colliculus participates in the feedback control of saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 87(2), 679–695.
- Sparks, D. L. (2002). The brainstem control of saccadic eye movements. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(12), 952–964. <http://doi.org/10.1038/nrn986>
- Sparks, D. L., & Travis, R. P. (1971). Firing patterns of reticular formation neurons during horizontal eye movements. *Brain Research*, 33(2), 477–481. <http://doi.org/10.1016/0006->

- Spering, M., & Carrasco, M. (2015). Acting without seeing: Eye movements reveal visual processing without awareness. *Trends in Neurosciences*, 38(4), 247–258. <http://doi.org/10.1016/j.tins.2015.02.002>
- Spering, M., Pomplun, M., & Carrasco, M. (2011). Tracking without perceiving: A dissociation between eye movements and motion perception. *Psychological Science*, 22(2), 216–225. <http://doi.org/10.1177/0956797610394659>
- Stanton, N. A., Salmon, P., Harris, D., Marshall, A., Demagalski, J., Young, M. S., ... Dekker, S. (2009). Predicting pilot error: Testing a new methodology and a multi-methods and analysts approach. *Applied Ergonomics*, 40(3), 464–471. <http://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.10.005>
- Stark, L., & Young, L. R. (1963). Variable feedback experiments testing a sampled data model for eye tracking movements. *IEEE, HFE-4*(1), 38–51. <http://doi.org/10.1109/THFE.1963.231285>
- Steinman, R. M., Haddad, G. M., Skavensky, A. A., & Wyman, D. (1973). Miniature eye-movements. *Science*, 181(4102), 810–819.
- Strickland, D., Pioro, B., & Ntuen, C. (1996). The impact of cockpit instruments on pilot exhaustion. *Computers & Industrial Engineering*, 31(1–2), 483–486. [http://doi.org/10.1016/0360-8352\(96\)00180-5](http://doi.org/10.1016/0360-8352(96)00180-5)
- Strimbu, K., & Tavel, J. A. (2010). What are biomarkers? *Current Opinion in HIV and AIDS*, 5(6), 463–466. <http://doi.org/10.1097/COH.0b013e32833ed177>
- Sunday, M., & Gauthier, I. (2017). The neural underpinnings of perceptual expertise. In D. Z. Hambrick, G. Campitelli, & B. M. Macnamara (Eds.), *The science of expertise: Behavioral, neural, and genetic approaches to complex skill* (pp. 200–237). New York: Routledge.
- Szpiro, S. F. A., Spering, M., & Carrasco, M. (2014). Perceptual learning modifies untrained pursuit eye movements. *Journal of Vision*, 14(8), 1–13. <http://doi.org/10.1167/14.8.8>
- Tarr, M. J., & Gauthier, I. (2000). FFA: A flexible fusiform area for subordinate-level visual processing automatized by expertise. *Nature Neuroscience*, 3(8), 764–769. <http://doi.org/10.1038/77666>
- Tatler, B. W., Wade, N. J., Kwan, H., Findlay, J. M., & Velichkovsky, B. M. (2010). Yarbus, eye movements, and vision. *I-Perception*, 1(1), 7–27. <http://doi.org/10.1068/i0382>
- Taylor, P. M. (2007). A review of research into the development of radiologic expertise: Implications for computer-based training. *Academic Radiology*, 14(10), 1252–1263. <http://doi.org/10.1016/j.acra.2007.06.016>
- Tennison, M. N., & Moreno, J. D. (2012). Neuroscience, ethics, and national security: The state

- of the art. *PLoS Biology*, *10*(3), 3–6. <http://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001289>
- Thaler, L., Schütz, a. C., Goodale, M. a., & Gegenfurtner, K. R. (2013). What is the best fixation target? The effect of target shape on stability of fixational eye movements. *Vision Research*, *76*, 31–42. <http://doi.org/10.1016/j.visres.2012.10.012>
- Thibaut, J. P., & French, R. M. (2016). Analogical reasoning, control and executive functions: A developmental investigation with eye-tracking. *Cognitive Development*, *38*, 10–26. <http://doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.12.002>
- Thomas, M. L., & Russo, M. B. (2007). Neurocognitive monitors: Toward the prevention of cognitive performance decrements and catastrophic failures in the operational environment. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *78*(5 Suppl), B144-52. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17547315>
- Thompson, P. (1980). Margaret Thatcher: A new illusion. *Perception*, *4*, 483–484. <http://doi.org/10.1068/p090483>
- Toh, W. L., Rossell, S. L., & Castle, D. J. (2011). Current visual scanpath research: A review of investigations into the psychotic, anxiety, and mood disorders. *Comprehensive Psychiatry*, *52*(6), 567–79. <http://doi.org/10.1016/j.comppsy.2010.12.005>
- Tracey, I., & Flower, R. (2014). The warrior in the machine: Neuroscience goes to war. *Nature Reviews. Neuroscience*, *15*(12), 825–34. <http://doi.org/10.1038/nrn3835>
- Treisman, A. (1998). Feature binding, attention and object perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, *353*(1373), 1295–1306. <http://doi.org/10.1098/rstb.1998.0284>
- Treisman, A., Kahneman, D., & Burkell, J. (1983). Perceptual objects and the cost of filtering. *Perception & Psychophysics*, *33*(6), 527–532.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*(1), 97–136. [http://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](http://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5)
- Tweed, D., & Vilis, T. (1987). Implications of rotational kinematics for the oculomotor system in three dimensions. *Journal of Neurophysiology*, *58*(4), 832–849.
- Tweed, D., & Vilis, T. (1990). Geometric relations of eye position and velocity vectors during saccades. *Vision Research*, *30*(1), 111–127.
- Vaci, N., & Bilalić, M. (2017). Chess databases as a research vehicle in psychology: Modeling large data. *Behavior Research Methods*, *49*(4), 1227–1240. <http://doi.org/10.3758/s13428-016-0782-5>
- Vendetti, M. S., Starr, A., Johnson, E. L., Modavi, K., & Bunge, S. A. (2017). Eye movements reveal optimal strategies for analogical reasoning. *Frontiers in Psychology*, *8*(6), 2–10. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00932>

- Vertegaal, R., Slagter, R., Van Der Veer, G., & Nijholt, A. (2001). Eye gaze patterns in conversations: There is more to conversational agents than meets the eye. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 301–308). <http://doi.org/10.1145/365024.365119>
- Vuilleumier, P. (2005). How brains beware: Neural mechanisms of emotional attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(12), 585–94. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2005.10.011>
- Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2015). Perceptual learning: Toward a comprehensive theory. *Annual Review of Psychology*, 66(1), 197–221. <http://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015214>
- Werner, J. S., & Chalupa, L. M. (2014). *The new visual neurosciences*. Massachusetts: MIT Press.
- Wurtz, R. H., & Goldberg, M. E. (1972). Activity of superior colliculus in behaving monkey. III. Cells discharging before eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 35(4), 575–586.
- Wylie, G. R., Genova, H. M., DeLuca, J., & Dobryakova, E. (2017). The relationship between outcome prediction and cognitive fatigue: A convergence of paradigms. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. <http://doi.org/10.3758/s13415-017-0515-y>
- Yang, G. Z., Dempere-Marco, L., Hu, X. P., & Rowe, A. (2002). Visual search: Psychophysical models and practical applications. *Image and Vision Computing*, 20(4), 291–305. [http://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00022-7](http://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00022-7)
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press.
- Yesavage, J. A., Jo, B., Adamson, M. M., Kennedy, Q., Noda, A., Hernandez, B., ... Taylor, J. L. (2011). Aviator performance. *Health Care*, 66, 1–10. <http://doi.org/10.1093/geronb/gbr031>. Advance
- Young, L. R., & Sheena, D. (1975). Eye-movement measurement techniques. *American Psychologist*, 30(3), 315–330. <http://doi.org/10.1037/0003-066X.30.3.315>
- Zee, D. S., Optican, L. M., Cook, J. D., Robinson, D. A., & Engel, W. K. (1976). Slow saccades in spinocerebellar degeneration. *Archives of Neurology*, 33(4), 243–251. <http://doi.org/10.1001/archneur.1976.00500040027004>
- Zee, D. S., & Robinson, D. A. (1979). A hypothetical explanation of saccadic oscillations. *Annals of Neurology*, 5(5), 405–414. <http://doi.org/10.1002/ana.410050502>
- Zhu, Z., & Ji, Q. (2005). Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations. *Computer Vision and Image Understanding*, 98(1), 124–154. <http://doi.org/10.1016/j.cviu.2004.07.012>